

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОУ ВПО «МАРИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Ю.А. Александров

ОСНОВЫ РАДИАЦИОННОЙ ЭКОЛОГИИ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Йошкар-Ола, 2007

ББК 40.1
УДК 631.5
А 46

Рецензенты:

Т.М. Быченко, канд. биол. наук, доц. Иркутского гос. пед. ун-та;
О.Л. Воскресенская, канд. биол. наук, доц. МарГУ;
В.Н. Самарцев, канд. биол. наук, проф. МарГУ

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом МарГУ

Александров Ю.А.
А 46 **Основы радиационной экологии:** Учебное пособие /Мар. гос. ун-т; Ю.А. Александров. – Йошкар-Ола, 2007. – 268 с.

ISBN 978-5-94808-312-4

Пособие предназначено в качестве дополнительного для студентов биологических, экологических и сельскохозяйственных специальностей для изучения дисциплин «Радиационная экология», «Сельскохозяйственная радиобиология». Оно соответствует учебной программе, утвержденной УМО по классическому университетскому образованию Российской Федерации; УМО по зооветеринарным специальностям: 110403 – Ветеринария, 110401 – Зоотехния; УМО по агрономическим специальностям: 110305 – Технология производства и переработки продукции сельского хозяйства, 110203 – Агроэкология, 110201 – Агрономия (специализации «Экологическое земледелие»).

В нем изложен теоретический материал по радиационной экологии. Оно включает введение, 4 основных раздела, приложения, список использованной литературы, краткий терминологический словарь.

ББК 40.1
УДК 631.5

© Александров Ю.А., 2007
© ГОУВПО «Марийский государственный университет», 2007

ISBN 978-5-94808-312-4

Посвящается 80-летнему юбилею
Василия Алексеевича Киршина



КИРШИН Василий Алексеевич –
лауреат государственной премии СССР,
доктор ветеринарных наук, профессор.

Учебное пособие «Основы радиационной экологии» посвящается 80-летнему юбилею (1928 г.) моего научного руководителя и учителя, доктора ветеринарных наук, профессора, члена-корреспондента АН Республики Татарстан, лауреата Государственной премии СССР (1979), заслуженного деятеля науки Татарской АССР **Василия Алексеевича Киршина**.

Киршин В.А. – автор фундаментальных трудов в области патологии и патогенеза радиационных поражений, обоснования первичности реакции иммунной системы в развитии лучевого поражения, разработки средств эффективной противорадиационной защиты, проблем использования ионизирующих излучений для повышения продуктивности животноводства, разработки технологии получения иммунодиагностикумов и иммунопрепаратов для диагностики и лечения радиационных воздействий, явления эмбрионального и постэмбрионального радиационного гормезиса и методов их использования в животноводстве.

Он основал отдел радиобиологии в Казанской государственной академии ветеринарной медицины, во Всероссийском научно-исследовательском ветеринарном институте (г. Казань).

Созданная В.А. Киршиным Казанская школа ветеринарной радиобиологии насчитывает двадцать пять докторов и восемьдесят шесть кандидатов наук.

Он опубликовал более шестисот научных работ, три учебника и пять учебных пособий, радиобиологический справочник, радиобиологический словарь, четыре руководства по защите животных, получил пятьдесят пять авторских свидетельств и шесть патентов на изобретения,

разработал более ста двадцати рекомендаций и наставлений, утвержденных ГУВ МСХ СССР, России, Белоруссии, Украины, для использования в сельскохозяйственном производстве.

В.А. Киршин награжден двумя орденами «Знак Почета», пятью медалями, четырьмя медалями «Отличник высшей школы», почетным знаком ГО, нагрудным знаком участника ликвидации последствий аварий на Чернобыльской аварии, удостоен звания «Изобретатель СССР».

Он является членом Российского и Белорусского экспертного Совета по ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС.

Желаем многоуважаемому Василию Алексеевичу Киршину здоровья, благополучия и творческого успеха.

Юрий Александрович Александров (1991 г.) доцент, канд. биол. наук, зав. кафедрой зоотехнии Маргосуниверситета; *Алексей Гаврилович Махоткин* (1982 г.) доцент, канд. вет. наук, заслуженный деятель науки Марийской АССР (1995 г.), лауреат Государственной премии Республики Марий Эл (2005 г.).

Радиоактивность и сопутствующие ей ионизирующие излучения существовали задолго до зарождения жизни на Земле. Считается, что ионизирующие излучения сопровождали большой взрыв, с которого, как мы сейчас полагаем, началось существование нашей Вселенной около 20 млрд лет назад. С того времени радиация постоянно наполняет космическое пространство, а радиоактивные материалы вошли в состав Земли с самого ее рождения. Даже человек слегка радиоактивен, так как в любой живой ткани присутствуют в следовых количествах радиоактивные вещества. Да и само зарождение жизни на Земле происходило в присутствии радиационного фона окружающей среды. Ученые часто дискутируют о том, шло ли развитие жизни наперекор постоянному скрытому патогенному воздействию радиации или же способность ионизирующих излучений вызывать мутации и послужила основной причиной непрерывной эволюции биологических видов в сторону повышения их организации. Однако в настоящее время никто не сможет с уверенностью сказать, как в действительности обстоит дело. И новое, что создал человек в этом отношении, это лишь дополнительная радиационная нагрузка, которой подвергаются люди, например, во время медицинских рентгенологических исследований, при полетах в самолетах и космических кораблях, при выпадении радиоактивных осадков, образующихся после испытания ядерного оружия или в результате работы атомных электростанций.

В результате этого в настоящее время миллионы людей контактируют с ионизирующими излучениями, загрязняя порой окружающий мир, а внешняя среда является постоянным источником низко интенсивного радиационного воздействия на организм человека.

Овладение энергией атомного ядра вовлекло огромные контингенты людей в сферу контактов с ионизирующим излучением (ИИ), а развитие ядерной энергетики как составной части научно-технического прогресса, применение ИИ и радиоактивных веществ в биологии, медицине, в сельском хозяйстве и в других областях расширило эти контакты, увеличило риск возможного воздействия на человека ионизирующей радиации. Расширение контактов человечества с ионизирующей радиацией, как составной частью внешней среды, делает особенно актуальным изучение их биологического действия и профилактику возможного повреждающего действия его.

Предмет радиационной экологии и ее задачи

Термин «**экология**» (от греч. *ойкос* – дом, жилище, место обитания и *логос* – учение) был предложен в

1866 году немецким биологом-эволюционистом Эрнстом Геккелем. Он понимал экологию как науку, изучающую взаимоотношения животного с окружающей средой, как органической, так и неорганической.

В современном понимании, экология – это наука о взаимоотношениях между живыми организмами и средой их обитания. Предмет экологии – изучение совокупности живых организмов, взаимодействующих друг с другом и образующих с окружающей средой некое единство (систему), в пределах которого осуществляется процесс трансформации энергии и органического вещества. Основная задача экологии – изучение взаимодействия энергии и материи в экологической системе.

Сообщества живых организмов, обитающих на планете, образуют с окружающей средой экологическую систему, в которой осуществляются трансформация энергии и круговорот веществ. Согласно современным взглядам, экосистема – это совокупность различных видов растений, животных и микробов, взаимодействующих друг с другом и с окружающей средой таким образом, что вся совокупность может существовать неопределенно долгое время. Другими словами, экосистема – это структурная и функциональная единица, состоящая из взаимодействующих биотических и абиотических компонентов, через которые проходит поток энергии.

Как наука и учебная дисциплина экология основывается на разных отраслях биологии (физиологии, радиобиологии, токсикологии, генетике и др.), а также физике, химии, геологии, математике и других небиологических науках. С другой стороны, формирование экологии еще не завершено и часто вопросы, относящиеся к ней, излагают в курсах биологии, гигиены, географии и др. Тем не менее в составе экологии выделился ряд в значительной мере самостоятельных направлений, к числу которых относится и **радиационная экология**.

На современном этапе развития радиационной экологии главными ее задачами являются:

1. Продолжение изучения воздействия радиоактивного излучения на растительные и животные организмы, популяции и экосистемы и прогнозирование последствий радиоактивного загрязнения биосферы.
2. Исследование путей распространения радиоактивных изотопов в природной среде.

3. Разработка безопасных для животных организмов норм радиоактивного загрязнения компонентов природной среды.
4. Изучение выживания и адаптации живых организмов в условиях хронического облучения радионуклидами.
5. Исследование длительного действия на живые организмы малых доз радиации и прогнозирование отдаленных последствий такого облучения.
6. Немаловажной задачей радиационной экологии является популяризация этой науки среди широких слоев общественности, поскольку радиационная опасность осознана пока далеко не всеми.
7. Специалисты в области радиационной экологии должны широко использовать радиоэкологический мониторинг, т.е. систему наблюдений за изменением состояния окружающей среды под действием ее радиоактивного загрязнения.

История развития радиационной экологии

Открытие Вильгельмом Конрадом Рентгеном в 1895 году X-лучей, названных впоследствии рентгеновскими (рентгеновыми) и сообщение 24 февраля 1896 года на заседании Французской академии наук профессора Анри Беккереля о том, что соединения урана испускают лучи, обладающие свойством ионизировать воздух, которое затем было названо естественной радиоактивностью, дало начало развитию ядерной физики и радиационной биологии, экологии.

Открытием А. Беккереля заинтересовались крупнейшие ученые того времени, среди которых в первую очередь необходимо назвать Марию и Пьера Кюри, Э. Резерфорда и Ф. Содди. Впоследствии было открыто много других радиоактивных элементов, но внимание исследователей сосредоточилось вокруг трех из них – урана, тория и радия. Все это привело к зарождению совершенно новой науки – ядерной физики, бурное развитие которой началось уже в новом XX веке и привело в конце концов к созданию управляемых ядерных реакторов и атомного оружия. Это произошло в сороковых годах прошлого века сначала в США, а затем в Советском Союзе. Таким образом, 40-е годы XX столетия можно считать началом вступления человечества в атомную эру.

Интенсивные испытания сверхдержавами ядерного и термоядерного оружия в 50-х – 60-х и быстрое развитие атомной энергетики привело к выбросам в биосферу огромных масс радиоактивных веществ. К этому надо добавить загрязнение окружающей среды радионуклидами, вследствие проводимых взрывов атомных зарядов в мирных целях.

К другим источникам радиоактивного загрязнения, нарушающим сложившийся за миллионы лет радиационный фон на нашей планете, следует отнести добычу и переработку урановых и ториевых руд, производство ядерного оружия, эксплуатацию ядерных реакторов на кораблях, исследовательские работы в области ядерной физики, а также использование радиоизотопов в науке, промышленности, сельском хозяйстве и медицине.

Перечисленные факторы свидетельствуют о том, что миллионы людей в мире проживают сейчас в неблагоприятной радиационной обстановке, что стало особенно ясно после аварии на Чернобыльской АЭС в середине восьмидесятых годов, когда произошло весьма значительное увеличение глобального радиационного фона.

Аварии на ядерных установках и утечки радионуклидов в биосферу на данном этапе развития цивилизации – явление далеко не редкое. Поэтому каждый сознательный житель планеты должен знать радиационную обстановку на территории, где он проживает, иметь представление об основных естественных и искусственных радионуклидах, поражающих действиях радиоактивных веществ, их физических и химических свойствах, закономерностях концентрации их в различных сферах окружающей среды, влиянии на живые организмы, продвижении радиоизотопов по пищевым цепочкам, методах экспрессной оценки радиоактивности различных объектов и способах защиты от внешнего и внутреннего радиоактивного облучения.

Названными и многими другими проблемами занимается радиационная экология, которая в настоящее время в виде отдельного предмета или в виде раздела в других дисциплинах преподается на многих естественных факультетах и отделениях высших и средних специальных учебных заведений и даже в старших классах некоторых школ.

5 декабря 1995 г. Государственной Думой Российской Федерации был принят закон «О радиационной безопасности населения». Он наделил органы государственной власти субъектов федерации полномочиями разрабатывать на основе упомянутого федерального закона нормативно-правовые акты субъектов федерации и реализовывать свои программы в области радиационной безопасности населения.

Начиная с середины 40-х годов XX века, со времени первого испытания атомной бомбы в Аламогордо, сверхдержавами мира было произведено около 1900 ядерных взрывов в атмосфере, гидросфере и литосфере, которые привели к значительным всплескам глобального радиационного фона. К этому надо добавить десятки аварий на реакторах атомных электростанций, боевых кораблей, хранилищах радиоак-

тивных отходов, на предприятиях, производящих обогащение ядерного материала.

Вторая половина XX столетия ознаменовалась бурным развитием энергетики особого типа, основанной на радиоактивном распаде. В настоящее время в мире насчитывается несколько сотен энергетических установок, работающих на ядерном топливе. Кроме того при крупных научных центрах, ведущих исследования в области атомного ядра, функционируют сотни исследовательских реакторов. В дальнейшем, по мере исчерпания ресурсов горючих полезных ископаемых, этот вид получения энергии будет приобретать все большее ускорение. Расчеты показывают, что при современных мировых темпах потребления углеводородного сырья разведанных его запасов хватит лишь на 100 лет. Учитывая молниеносное развитие цивилизации, легко предсказать, что уже в ближайшем будущем человечество столкнется с проблемой энергетического голода, если выработка электроэнергии будет и впредь базироваться на сжигании органического топлива. Если прибавить к этому фактор вредности сжигания каустобиолитов, то станет вполне очевидным, что альтернативным источником энергии на данном этапе развития человеческого общества могут быть только АЭС. В соответствии с этим многократно возрастет количество радиоактивных отходов, требующих надежного захоронения, хранения и вторичной переработки.

Радионуклиды быстрыми темпами проникают в науку и технику. Уже сейчас сотни тысяч предприятий и учреждений в разных странах используют в своей повседневной работе источники ядерных излучений. Создаются все новые приборы и установки, принцип работы которых основан на радиоактивных препаратах. Их применяют в самых различных отраслях промышленности, сельского хозяйства, в медицине и космической технике.

Развитие ядерного производства потребовало извлечения из глубин Земли колоссального количества радиоактивного сырья. За последние 50 лет из земных недр добыты и переработаны многие миллионы тонн урановых и ториевых руд. Содержание полезного компонента в радиоактивных рудах невелико, вследствие чего после их обогащения остается огромная масса «пустой» породы, которая может повысить местный радиационный фон в несколько раз.

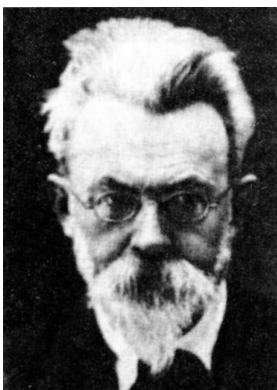
Все это поставило людей в совершенно новые условия жизни, когда использование радиоактивных веществ буквально пронизывает все отрасли деятельности человека. Связанное с этим повышение местного радиационного фона во многих регионах планеты, рост числа зон локального загрязнения окружающей среды нарушают природное равновесие, которое сложилось за длительный период, измеряемый в геоло-

гическом масштабе времени. Уже сейчас средний уровень глобального загрязнения составляет: по цезию-137 – $0,08 \text{ Ки/км}^2$, по стронцию-90 – $0,045 \text{ Ки/км}^2$, по плутонию-239 – $0,005 \text{ Ки/км}^2$, а *мощность гамма-излучения* на высоте 1 м – 10-15 мкР/ч (Булатов, 1996). Загрязнение радионуклидами биогеноценозов действует на популяции животных, которые длительно находились в условиях неизменного радиационного фона. Если не поставить заслон безудержному и бесконтрольному распространению радионуклидов в биосфере, то это приведет к непредсказуемым генетическим изменениям в животном и растительном мире и даже к гибели отдельных видов, а возможно и целых экологических сообществ.

Требуется качественно новый уровень культуры обращения людей с материалами, содержащими радионуклиды, ибо от этого будет зависеть само существование жизни на Земле.

В связи с этим изучение процессов накопления радиоактивных веществ организмами, их миграции в биосфере, взаимодействия живых организмов друг с другом и со средой обитания в условиях радиоактивного загрязнения приобретает все большую актуальность. Этими вопросами уже на протяжении полувека занимается одна из отраслей экологии – радиационная экология.

Зарождение этой науки в нашей стране произошло в конце 20-х годов XX столетия с экспериментов В.И. Вернадского по накоплению радия живыми организмами.



ВЕРНАДСКИЙ
Владимир Иванович
1863-1945

К началу сороковых годов относится публикация научных работ В.Ф. Натали о влиянии ионизирующего излучения на половую систему рыб. Бурное же становление радиоэкологии относится к пятидесятым годам, когда было установлено, что в результате испытаний атомного оружия биосфера Земли может быть загрязнена в глобальном масштабе.

Взрывы ядерных устройств над городами Хиросимой и Нагасаки, военные учения армий США и СССР, в ходе которых проводились эксперименты на животных и людях, аварии на атомных кораблях и электростанциях, оснащенных атомными реакторами, предоставили исследователям богатейший фактический материал относительно последствий радиоактивного облучения человека, животных и растений.

Испытания атомного оружия с 1944 по 1963 годы вызвали глобальное загрязнение продуктами радиоактивного распада поверхности планеты и ее подвижных оболочек. Стало известно, что продукты ядерных взрывов поглощаются атмосферной пылью, переносятся на большие расстояния и выпадают на поверхность Земли с дождем и снегом, загрязняя почву радионуклидами. Последние, передвигаясь по пищевым цепочкам от зерна и травы через мясо и молоко животных, попадают в организм человека и разрушают его. Биологи поняли, что отныне вся биота Земли вынуждена будет существовать в совершенно новых, непривычных для нее условиях – в обстановке повышенной радиации. Поэтому потребовалось срочно переориентировать значительные научные силы в русло изучения влияния ионизирующих излучений на живые организмы.

В 1957 году состоялось совещание биологов СССР, организованное Академией Наук СССР, на котором было принято решение о значительном усилении исследований в области радиобиологии. Вслед за этим в срочном порядке во многих академических учреждениях страны были организованы и технически оснащены лаборатории радиобиологии. Ими руководили ведущие специалисты в области биологии: В.М. Ключковский, А.М. Кузин, Н.П. Дубинин, А.А. Передельский, П.П. Вавилов и многие другие. Это научное направление было новым в системе Академии наук, поэтому потребовались значительные усилия для подготовки специалистов. В их воспитании принял активное участие знаменитый биолог-генетик Н.В. Тимофеев-Ресовский, работавший тогда в Ильменском заповеднике (г. Миасс). Экологам потребовалось изучать судьбу радиоактивных веществ, попавших в окружающую среду, воздействие их на отдельные особи, популяции и экосистемы. Уже к началу 60-х годов были получены многочисленные данные, характеризующие радиочувствительность отдельных видов и сообществ организмов к облучению от внешних источников и при радиоактивном загрязнении среды обитания.

Во всем мире эту зарождающуюся науку называли тогда радиационной биогеоценологией (Тимофеев-Ресовский Н.В., 1957). Уже в то время в радиоэкологии выделились два главных направления: изучение влияния



Тимофеев-Ресовский
Николай Владимирович
1900-1981

ионизирующих излучений на живые организмы и закономерности распределения, накопления радионуклидов в природных сообществах. Главным научным учреждением, сосредоточившим исследования по накоплению и распределению радионуклидов по основным компонентам биогеоценозов, стал тогда Институт биологии Уральского филиала АН СССР, впоследствии переименованный в Институт экологии растений и животных. Руководство работами осуществлял Н.В. Тимофеев-Ресовский.

По мере накопления информации в радиозэкологии постепенно стали формироваться две главные отрасли – морская и континентальная, занимающиеся, соответственно, экосистемами океанов и континентов. В свою очередь в континентальной радиозэкологии выделились два направления – радиозэкология суши и континентальных водоемов.

Крупной отраслью континентальной радиозэкологии стала радиозэкология животных, которая интенсивно развивалась в трудах А.И. Ильенко, Д.А. Криволуцкого и В.Е. Соколова. Этим же ученым принадлежат основные исследования влияния ионизирующей радиации на популяции, много научных статей по накоплению стронция пресноводными рыбами принадлежит Г.Д. Лебедевой (1961, 1962, 1968).

В пятидесятые годы в печати появились первые результаты исследований по загрязнению континентальных водоемов радиоактивным стронцием и движению его по пищевым цепям (Марей А.М., 1955, 1958, 1961).

В последующие годы континентальная радиозэкология получила развитие в фундаментальных трудах уральских ученых Н.В. Куликова и И.В. Молчановой (1975, 1977, 1988). Еще в пятидесятые-шестидесятые годы этими учеными были получены данные о скорости и прочности фиксации радионуклидов различными почвами, степени подвижности радиоактивных элементов в системах «почва – раствор», «почва – растение» и «вода – гидробионты». Этими же исследователями проведены эксперименты по изучению радиочувствительности сотен видов культурных растений, определены значения коэффициентов накопления радионуклидов в представителях пресноводной фауны и флоры.

Морская радиозэкология последовательно развивалась в трудах Г.Г. Поликарпова и его учеников (Поликарпов, 1964; Поликарпов, Егоров, 1986), а затем в работе А.Е. Каткова (1985).

Бурное развитие атомной энергетики в 70-е – 80-е годы способствовало повороту внимания исследователей в сторону экологических проблем, непосредственно связанных с эксплуатацией энергоустановок на ядерном топливе. В этот период при крупных атомных электростанциях

были созданы лаборатории, занимающиеся радиоэкологическими проблемами, касающимися наземных и пресноводных экосистем. Исследования на Биофизической станции Института экологии растений и животных УО РАН при Белоярской АЭС показали, что осторожная и грамотная эксплуатация объектов атомной энергетики абсолютно безопасна для окружающей среды. В 1986 году по халатности руководства произошла крупная авария на Чернобыльской АЭС, след от которой окутал всю планету, повысив глобальный радиационный фон. Выпало большое количество радиоактивных осадков. Специалисты радиоэкологии используют это, изучая процессы взаимодействия выпадающих из атмосферы радиоактивных примесей с почвенно-растительным покровом, явления сорбции и прочности фиксации многих искусственных радионуклидов в различных почвах, закономерности усвоения их живыми организмами и движения радиоактивных элементов по пищевым цепочкам.

Беспрецедентная по масштабам авария на Чернобыльской АЭС заставила многократно увеличить масштаб радиоэкологических исследований. Как никогда возросло международное сотрудничество ученых в этой области, поскольку с развитием атомной энергетики и увеличением количества разрабатываемых ядерных технологий неизбежно возрастает и радиационная опасность. К настоящему времени уже достаточно хорошо изучено распределение радионуклидов в организмах наземных животных и в гидробионтах, а также движение естественных и искусственных радиоактивных элементов по пищевым цепям.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ БИОЛОГИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ (ИИ)

1.1. СТРОЕНИЕ АТОМА. ПОНЯТИЕ РАДИОАКТИВНОСТИ

АТОМ – самая маленькая часть химического элемента, сохраняющая все его свойства, его размеры 10^{-8} см, состоит из положительно заряженного ядра и отрицательно заряженных электронов, движущихся в виде электронного облака по электронным орбиталиям. Атом в целом электронейтрален.

ЭЛЕКТРОН – устойчивая элементарная частица с массой покоя, равной 0,000548 атомной единицы массы (а.е.м.) или $9,1 \times 10^{-28}$ грамм. Электрон несет один элементарный отрицательный заряд электричества, равный $1,6 \times 10^{-19}$ Кл, который в ядерной физике принят за единицу.

Электроны перемещаются по эллиптическим орбитам, образуя электронную оболочку атома в виде облачка, они группируются на той или иной электронной орбите в зависимости от энергии. Число электронных орбиталей колеблется от одной до семи соответственно группам химических элементов периодической системы Д.И. Менделеева, обозначаются буквами латинского алфавита.

ЯДРО – атомов состоят из положительно заряженных частиц – протонов, и нейтральных в электрическом отношении частиц – нейтронов, которые в целом называются нуклонами. Они находятся в постоянном движении и между ними действуют внутриядерные силы притяжения. Число протонов в ядре равно порядковому номеру элемента в периодической системе Д.И. Менделеева и обозначается в левом нижнем углу символа элемента буквой Z, а суммарное число протонов и нейтронов – в левом верхнем углу и обозначается буквой M, оно соответствует атомной массе химического элемента. Например: ${}_{92}^{235}\text{U}$.

Протон (p) – устойчивая элементарная частица с массой покоя равной 1,00758 а.е.м. ($1,6725 \times 10^{-24}$ г), примерно в 1840 раз больше массы покоя электрона, имеет один элементарный заряд, равный заряду электрона.

Нейтрон (n) – электрически нейтральная частица, масса покоя которой равна массе покоя протона (1 а.е.м). Вследствие своей электрической нейтральности нейтрон не отклоняется под воздействием магнитного поля, не отталкивается атомным ядром, обладает большой проникающей способностью и биологической эффективностью.

Таким образом, атомы химических элементов *электронейтральны*. При сообщении электронам извне дополнительной энергии они могут переходить с одного энергетического уровня (орбиты) на другой или даже покидать пределы данного атома. Атомы, обладающие избытком энергии, называют возбужденными. Переход электронов с внешних орбит на внутренние сопровождается рентгеновским излучением. При сильных электрических воздействиях электроны вырываются из атома, удаляются за его пределы, а атом превращается в положительный ион, а атом, присоединивший один или несколько электронов – в отрицательный. Процесс образования ионов из нейтральных атомов называется **ионизацией**.

В природе большинство химических элементов состоит из смеси атомов с различным числом нейтронов, но с постоянным числом протонов – такие атомы называются *изотопами*. Атомы химического элемента с одинаковым массовым числом, но ядра которых находятся в различном энергетическом состоянии, называются **изомерами**. Ядра всех изотопов химических элементов принято называть **нуклидами**. Например: элемент уран состоит из изотопов ^{238}U – 98,5% и ^{235}U – 1,5%. Изотопы подразделяются на 2 группы: стабильные и радиоактивные. **Радионуклиды** – это радиоактивные атомы с данным массовым числом (суммарным числом протонов и нейтронов) и атомным номером или с данным энергетическим состоянием атомного ядра (для изомеров).

РАДИОАКТИВНОСТЬ – превращение атомных ядер одних химических элементов в ядра других химических элементов с выделением энергии в виде электромагнитного излучения (гамма- и рентгеновское излучения) и корпускулярных частиц (альфа-, бета-, нейтронное, позитронное излучения).

Радиоактивные излучения, происходящие в природе без внешнего воздействия, называются естественной радиоактивностью, а в искусственно полученных под воздействием альфа-, нейтронного излучений веществах (через ядерные реакции) – искусственной или наведенной радиоактивностью. В настоящее время известны 3 естественных радиоактивных семейства:

1. Урана-радия – ${}_{92}^{238}\text{U}$ и ${}_{88}^{226}\text{Ra}$, которые через 8 альфа- и 6 бета-распадов превращаются в стабильный изотоп свинца – ${}_{82}^{208}\text{Pb}$.

2. Тория – ${}^{232}\text{Th}$, который через 6 альфа- и 4 бета-распадов превращается в стабильный изотоп свинца.

3. Актиния-урана – ${}_{92}^{235}\text{U}$ и ${}_{89}^{235}\text{Ac}$, которые в результате 7 альфа- и 4 бета-распадов также превращаются в стабильный изотоп свинца.

1.2. Единицы радиоактивности

Скорость ядерных превращений характеризуется активностью – числом ядерных превращений в единицу времени. В системе СИ за единицу активности радионуклидов принимается единица беккерель (Бк), равная одному ядерному превращению в 1 секунду:

$$1 \text{ Бк} = 1 \text{ расп./с.}$$

Применяются также кратные величины:

$$\text{МБк} = 10^6 \text{ Бк};$$

$$\text{ГБк} = 10^9 \text{ Бк};$$

$$\text{ТБк} = 10^{12} \text{ Бк};$$

$$\text{ПБк} = 10^{15} \text{ Бк}.$$

Внесистемной единицей активности радионуклидов является единица Кюри (Ки) – это такое количество радиоактивных веществ, в котором число радиоактивных превращений в 1 секунду равно $3,7 \times 10^{10}$. Эта величина соответствует радиоактивности 1 г радия.

$$1 \text{ Ки} = 3,7 \times 10^{10} \text{ расп./с} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Бк}.$$

Применяются также дольные величины:

$$\text{мКи} = 10^{-3} \text{ Ки};$$

$$\text{мкКи} = 10^{-6} \text{ Ки};$$

$$\text{нКи} = 10^{-9} \text{ Ки};$$

$$\text{пКи} = 10^{-12} \text{ Ки}.$$

Единицами удельной активности или концентрации, т.е. активности на единицу массы или объема являются следующие величины: Ки/мл, Ки/г, Бк/г, Бк/мл и др.

Единицей гамма-активности радиоактивных источников является эквивалент 1 мг радия. *Миллиграмм эквивалент радия* (мг-экв. радия) равен активности любого радиоактивного препарата, гамма-излучение которого создает при одинаковых условиях такую же мощность экспозиционной дозы, как гамма-излучение 1 мг радия **Государственного**

этало́на при платиновом фильтре 0,5 см на расстоянии 1 см от источника. Точечный источник в 1 мг (1 мКи) радия создает мощность экспозиционной дозы 8,4 Р/ч. Эта величина называется ионизационной гамма-постоянной радия и обозначается символом K_γ .

Например, гамма-постоянная Со-60 составляет 13,5 Р/ч – это значит, что активность Со-60 в 1,6 раза выше, чем 1 мг (1 мКи) радия.

Гамма-эквивалент любого изотопа М связан с его активностью А (мКи) через ионизационную гамма-постоянную радия соотношениями:

$$M = A \times K_\gamma / 8,4; \quad A = M \times 8,4 / K_\gamma.$$

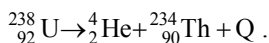
Эти соотношения позволяют сделать переход от активности РВ, выраженной в мг-экв. радия, к активности, выраженной в мКи, и наоборот.

1.3. ТИПЫ ЯДЕРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИИ С ВЕЩЕСТВАМИ. ВИДЫ ИИ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКА

Ядра атомов в стабильном состоянии устойчивы, но изменяют свое состояние при нарушении определенного соотношения протонов и нейтронов. Если в ядре слишком много протонов или нейтронов, то такие ядра неустойчивы и претерпевают радиоактивные превращения, в результате которых изменяется состав ядра, т.е. ядро атома одного химического элемента превращается в ядро атома другого химического элемента – это явление называется *радиоактивностью, а сам процесс – ядерным (радиоактивным) распадом или ядерным превращением*.

1.3.1. Альфа-распад

Этот вид ядерных превращений сопровождается испусканием из ядра альфа – частицы, представляющей собой ядро атома гелия, что приводит к уменьшению порядкового номера нового химического элемента на 2 единицы и массового числа (атомной массы) на 4 единицы. Например:



Этот вид ядерных превращений характерен для естественных радиоактивных элементов с большими порядковыми номерами: ядра с порядковыми номерами больше 82, за редким исключением, альфа-активны (${}^{60}\text{Co}$ и др.), превращения их ядер сопровождаются испусканием альфа-

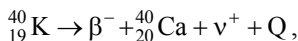
частиц, представляющих собой ядра атомов гелия ${}^4\text{He}$, при этом ядро радиоактивного элемента теряет 2 протона и 2 нейтрона, образующийся элемент смещается влево относительно исходного на 2 клетки периодической системы Д.И. Менделеева.

Альфа-частицы имеют положительный заряд, скорость распространения 20 000 км/с, обладают большой массой – 4,003 а.е.м., большой энергией – 2-11 МэВ (мегаэлектронвольт), проникающая способность в воздухе 2-10 см, в биологических тканях – несколько десятком микрометров.

Проходя через вещество, положительно заряженная альфа частица постепенно теряет свою энергию за счет взаимодействия с электронами атомов или других отрицательно заряженных частиц, вызывая их ионизацию, часть энергии теряется на возбуждение атомов и молекул. В воздухе на 1 см пути альфа-частица образует 100-250 тыс. пар ионов, при попадании в организм они крайне опасны для человека и животных (плотно ионизирующее радиоактивное излучение).

1.3.2. Бета-распад

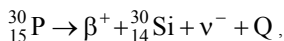
Ряд естественных и искусственных радиоактивных элементов претерпевают распад с испусканием электронов и позитронов. Электроны и позитроны, испускаемые ядрами, называются бета-частицами или бета-излучением, а сами ядра – бета-активными. Если в ядре имеется избышек нейтронов, то происходит **электронный бета-распад**. При этом виде ядерных превращений один из нейтронов превращается в протон, а ядро испускает **электрон** и **антинейтрино** и возникает ядро нового элемента при неизменном массовом числе. Вылет электронов сопровождается выбросом антинейтрино – элементарной частицы с массой менее 1/2000 массы покоя электрона, дочерний элемент сдвинут в таблице Д.И. Менделеева на 1 поле. Например:



где ν – антинейтрино.

При избышке протонов происходит **позитронный (β^{+}) бета-распад**. Он сопровождается образованием нового элемента, расположенного в периодической таблице Д.И. Менделеева на 1 позицию влево от материнского; протон превращается в нейтрон, энергия выделяется также в виде элементарной частицы – нейтрино. Позитрон срывает с электронной оболочки электрон, образует пару позитрон – электрон, при взаи-

модействии которых образуются 2 гамма-кванта (процесс аннигиляции).
Например:



где Q – энергия двух гамма-квантов. Взаимодействие между электронами и веществом также приводит к процессам ионизации и возбуждения атомов и молекул. При взаимодействии с орбитальными электронами бета-частица отклоняется от первоначального пути (одноименные заряды отталкиваются), поэтому глубина проникновения бета-частиц в вещество меньше, чем длина пробега.

Бета-частицы (бета-излучение) распространяются со скоростью света, проникающая способность в воздухе до 25 метров, а в биологических тканях – до 1 см, в воздухе на 1 см пробега образует 50-100 пар ионов (редко ионизирующее излучение).

Возникающее при перестройке ядер атомов радиоактивных элементов излучение также моноэнергетично (то есть имеет линейный спектр) или характеризуется ограниченным числом фиксированных энергий (до нескольких МэВ).

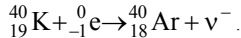
Тормозное и характеристическое излучения обычно относят к рентгеновским лучам, а образующееся при ядерных перестройках – к гамма-излучению. При таком разделении спектры рентгеновских и γ -лучей перекрываются. Нет принципиальных различий между ними и по физическим свойствам. Часто, независимо от происхождения, излучение с энергией фотонов до 250 кэВ относят к рентгеновскому излучению, а выше 250 кэВ – к гамма-излучению. По длине волны эта граница соответствует примерно 0,05 ангстрем.

Гамма-излучение – это коротковолновое электромагнитное излучение, распространяется прямолинейно со скоростью света, энергия его колеблется от 0,01 МэВ до 3 МэВ. Гамма-кванты испускаются при альфа- и бета-распадах ядра природных и искусственных радионуклидов, лишены массы покоя, не имеют заряда, поэтому проникающая способность в воздухе составляет 150 метров, в биологических тканях – десятки см.

Рентгеновское излучение также является электромагнитным излучением, возникает при торможении электронов в электрическом поле ядра атомов (тормозное рентгеновское излучение) или при перестройке электронных оболочек атомов при ионизации и возбуждении атомов и молекул (характеристическое рентгеновское излучение).

1.3.3. К-захват электронов ядром

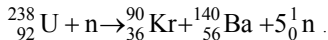
При этом процессе протон ядра атома захватывает электрон с ближайшей к ядру К-орбитали или реже с L-орбитали, имеет место такое же превращение ядра, как и при позитронном распаде. Например:



При К-захвате единственной вылетевшей частицей является антинейтрино, возникает также характеристическое рентгеновское излучение.

1.3.4. Самопроизвольное деление ядер

Этот процесс наблюдается у радиоактивных элементов с большими атомными номерами – ${}^{235}\text{U}$, ${}^{239}\text{Pu}$ и др. при захвате их ядрами медленных нейтронов.



Одни и те же ядра при делении образуют различное число осколков и избыточное количество нейтронов.

Нейтроны не несут заряда (электронейтральны), проникающая способность в воздухе и в биологических тканях очень большая, они являются плотно ионизирующими, атомные ядра при поглощении нейтронов становятся неустойчивыми, распадаются с испусканием протонов, альфа-частиц, фотонов гамма-излучения, осколков ядра.

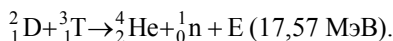
В результате взаимодействия с веществами медленные нейтроны (0,025-0,1 МэВ) проникают в ядро атома, где они «захватываются» или удерживаются. Быстрые нейтроны (с энергией более 0,1 МэВ) взаимодействуют путем упругого столкновения с ядром.

Преимущественный вклад того или иного вида ядерного взаимодействия в поглощение нейтронного излучения зависит от состава облучаемого вещества и от кинетической энергии нейтронов. В зависимости от энергии нейтроны могут быть разделены на следующие группы:

- сверхбыстрые или релятивистские ($E > 10^3$ МэВ);
- очень больших энергий ($E = 10 \cdot 10^3$ МэВ);
- быстрые ($E = 0,1 \cdot 10$ МэВ);
- промежуточные ($E = 0,5 \cdot 100$ кэВ);
- медленные ($E = 0,1$ эВ – $0,5$ кэВ);
- тепловые ($E < 0,1$ эВ).

1.3.5. Термоядерные реакции

Термоядерные реакции протекают при температурах, достигающих нескольких миллионов градусов. В этих условиях ядра легких элементов, двигаясь с большими кинетическими энергиями, будут сближаться и объединяться в ядра более тяжелых элементов, например:



На этом принципе основано устройство термоядерных зарядов, состоящих из плутониевого запала, служащего для создания высокой температуры, и смеси изотопов водорода – дейтерия и трития.

π -мезоны – отрицательно заряженные элементарные частицы, масса больше в 273 раза массы электрона, энергия 25-100 МэВ, при взаимодействии с веществами вызывают разрушение ядер с вылетом нейтронов, альфа-частиц, ионов лития, бериллия и др. (микровзрыв ядер).

Скоростью потери энергии определяется еще одно важное свойство ионизирующих излучений – **проникающая способность**. Глубина проникновения ионизирующих излучений зависит, с одной стороны, от состава и плотности облучаемого объекта, а с другой, – от природы и свойств излучения. Чем больше величина линейной передачи энергии (ЛПЭ), тем меньше проникающая способность излучения в данном веществе.

За меру проникающей способности для ускоренных заряженных частиц принимают расстояние, на котором частица замедляется до энергии, близкой к средней энергии теплового движения. Для квантов рентгеновских и гамма-лучей за меру проникающей способности принимают расстояние, на котором мощность излучения падает в e раз (где e – основание натуральных логарифмов).

Излучения с высокой проникающей способностью называют *жесткими*. Если же проникающая способность мала, то такое излучение называют *мягким*. Однако эти термины весьма относительны, так как, например, бета-излучение по сравнению с альфа-частицами будет жестким, а по сравнению с гамма-лучами – мягким.

Все виды ионизирующих излучений прямо или косвенно вызывают ионизацию или возбуждение атомов вещества, и поэтому возникающие первичные изменения качественно не зависят от вида излучения. Однако при облучении в равных дозах (то есть при одном и том же количестве поглощенной единицей массы вещества энергии) возникают количественно разные биологические эффекты, что связано с ЛПЭ. В зависимости от величины ЛПЭ все ионизирующие излучения делят на

редко- и плотноионизирующие. К редкоионизирующим относятся все виды излучения, имеющие ЛПЭ менее 10 кэВ/мкм. Это в основном электроны, а также гамма- и рентгеновские лучи, ионизирующее действие которых также осуществляется электронами. К плотноионизирующим (ЛПЭ > 10 кэВ/мкм) относят протоны, α -частицы и другие тяжелые частицы, а также нейтроны, биологическое действие которых реализуется за счет вторичных ускоренных заряженных частиц. Редкоионизирующие виды излучений отличаются сравнительно высокой проникающей способностью, а плотноионизирующие (за исключением нейтронов) проникают в ткани на небольшую глубину. Так, альфа-частицы обладают очень низкой проникающей способностью. Даже в воздухе их пробег равен нескольким сантиметрам, а более плотные вещества (например, ткань или бумага) непроницаемы для альфа-частиц при толщине в доли миллиметра. Поток альфа-частиц, падающий на тело человека, из-за малой проникающей способности целиком поглощается в верхних слоях кожи. Вследствие этого альфа-излучение при внешнем радиационном воздействии совершенно безопасно для человека. Однако, если альфа-активный изотоп попадет с пищей, водой или воздухом внутрь организма, то опасность будет весьма велика, так как испускаемые изотопом внутри тканей альфа-частицы вызовут очень сильную ионизацию атомов и молекул, а следовательно, сильное повреждение биологических субстратов, в которых непосредственно поглощается энергия.

Проникающая способность бета-частиц примерно в сто раз больше, чем альфа-частиц. В воздухе они проходят несколько метров, в твердых средах – несколько миллиметров. В связи с этим бета-частицы представляют определенную опасность для жизни и здоровья людей не только при попадании внутрь организма, но и при аппликации на кожные покровы и слизистые оболочки, вследствие чего могут развиваться серьезные местные лучевые поражения.

Проникающая способность рентгеновских лучей и гамма-квантов очень велика. Они глубоко проникают даже в плотные среды, а тело человека «пронизывают» насквозь. Например, гамма-кванты с высокой энергией могут проходить через слой земли или бетона толщиной в несколько метров. Весьма велика проникающая способность, сравнимая с проникающей способностью гамма-лучей, у нейтронов. Излучения с высокой проникающей способностью представляют опасность для человека при внешнем облучении.

1.4. ПОНЯТИЕ ДОЗИМЕТРИИ. ПОГЛОЩЕННАЯ И ЭКСПОЗИЦИОННАЯ ДОЗЫ ИЗЛУЧЕНИЯ

Степень радиационного поражения биологических объектов определяется дозой облучения. Поэтому основной задачей дозиметрии является определение доз облучения живых организмов.

Для определения количества **рентгеновского и гамма-излучения** определяют **экспозиционную дозу ИИ**.

1.4.1. Экспозиционная доза излучения

Она характеризует ионизационную способность этих видов ИИ в воздухе. Практически чаще всего применяется внесистемная единица – **рентген – Р**. Рентген – такое количество энергии рентгеновского или гамма-излучения, которое в 1 см³ воздуха при атмосферном давлении 760 мм рт. ст. и температуре 0 °С образует $2,08 \times 10^9$ пар ионов. Рентген имеет производные единицы – мР, мкР, кР, МР и др.

В Международной системе единиц (СИ) за единицу экспозиционной дозы принят **кулон на килограмм (Кл/кг)**, т.е. такое количество энергии рентгеновского и гамма-излучения, которое в 1 кг сухого воздуха образует ионы, несущие суммарный заряд в один кулон электричества каждого знака:

$$1 \text{ Р} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ Кл/кг}; \quad 1 \text{ Кл/Кг} = 3876 \text{ Р.}$$

1.4.2. Поглощенная доза излучения

Для определения эффекта воздействия ИИ в биологических тканях, который зависит от величины поглощенной энергии, применяется внесистемная единица **рад (rad – radiation absorbent dose)** – это такая доза, при которой в 1 г массы облучаемого вещества поглощается энергия любого вида ИИ равная 100 эрг (1 рад = 100 эрг/г). Рад имеет производные единицы – дольные и кратные: мрад, мкрад, крад, Мрад и др.

В системе единиц СИ за единицу поглощенной дозы принята величина **грей – Гр**, т.е. такая поглощенная доза, при которой в 1 кг массы вещества поглощается энергия излучения, равная **1 джоулю (Дж)**:

$$1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг.}$$

Грей имеет также дольные и кратные величины:

$$1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад}; \quad 1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Гр.}$$

Поглощенную дозу в радах определяют расчетным путем по формуле:

$$D_{\text{погл.}} = D_{\text{эсп.}} \times K,$$

где K – коэффициент поглощения, для воздуха $K = 0,88$, для костной ткани $K = 2 - 5$, для жировой ткани $K = 0,6$, для живого организма в целом $K = 0,93$.

1.5. ОТНОСИТЕЛЬНАЯ БИОЛОГИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИИ

Одинаковые дозы различных видов ионизирующего излучения оказывают на организмы разное действие, обусловленное неодинаковой плотностью ионизации – удельной ионизацией. Чем выше удельная ионизация, тем больше эффект биологического действия облучения. Поэтому одна и та же поглощенная доза различных видов ИИ приводит к разной степени поражения организма. В связи с этим в радиобиологии введено понятие *относительной биологической эффективности (ОБЭ) или коэффициента качества (КК)* или взвешивающие коэффициенты (по НРБ-99) ионизирующих излучений. Средние значения их следующие:

| | |
|--|-------|
| фотоны любых энергий | – 1; |
| электроны и мюоны любых энергий | – 1; |
| протоны с энергией более 2 МэВ | – 5; |
| нейтроны с энергией: | |
| менее 10 кэВ (медленные, тепловые и промежуточные) | – 5; |
| от 10 до 100 кэВ | – 10; |
| от 100 кэВ до 2 МэВ (быстрые) | – 20; |
| от 2 МэВ до 20 МэВ (быстрые) | – 10; |
| более 20 МэВ (быстрые) | – 5; |
| альфа-частицы, осколки деления, тяжелые ядра | – 20. |

Примечание: Мюоны – элементарные заряженные частицы с массой около 207 электронных масс (μ – мю + мезоны). Быстрые нейтроны – с энергией более 100 кэВ, промежуточные – от 100 до 1 кэВ, медленные – менее 1 кэВ, тепловые – около 0,025 эВ.

Для оценки биологической эффективности различных видов излучения введено понятие эквивалентной или биологической дозы ($D_{\text{эkv.}}$ или $D_{\text{биол.}}$)

$$D_{\text{эkv. (биол.)}} = D_{\text{погл.}} \times \text{ОБЭ (КК)}.$$

Внесистемная единица эквивалентной дозы – биологический эквивалент рентгена – бэр ($1 \text{ бэр} = 1 \times 10^{-2} \text{ Дж/кг}$). Единица бэр – это такая

доза любого вида ионизирующего излучения, при которой в биологической среде создается такой биологический эффект, как при дозе рентгеновского или гамма-излучения в 1 рад. Данная единица имеет дольные и кратные величины – мбэр, мкбэр, кбэр, Мбэр. **В системе СИ** единица эквивалентной дозы – **зиверт (Зв)**. $1 \text{ Зв} = 100 \text{ бэр}$.

Если биологический объект облучается различными видами излучения одновременно (смешанный источник ИИ), то эквивалентная доза облучения равна сумме поглощенных доз от каждого вида излучения, умноженной на средний коэффициент качества (КК или ОБЭ).

Разные органы и ткани имеют разную чувствительность к излучению. Для случаев неравномерного облучения разных органов или тканей человека введено понятие эффективной эквивалентной дозы ($D_{\text{эфф}}$).

$$D_{\text{эфф}} = \sum w \times D_{\text{экв}},$$

где $D_{\text{эфф}}$ – эффективная эквивалентная доза;

w – коэффициент радиационного риска;

$D_{\text{экв}}$ – средняя эквивалентная доза в органе или ткани.

Единицей эффективной эквивалентной дозы являются бэр и Зв (зиверт).

Таблица 1 – Коэффициенты радиационного риска w для различных органов и тканей человека

| Орган или ткань | w |
|-----------------------|------|
| Гонады | 0,25 |
| Молочная железа | 0,15 |
| Красный костный мозг | 0,12 |
| Легкие | 0,12 |
| Щитовидная железа | 0,03 |
| Поверхность кости | 0,03 |
| Все другие органы | 0,30 |
| Весь организм в целом | 1,0 |

Помимо перечисленных понятий, в радиационной безопасности широко используются термины годовой и коллективной эффективной или эквивалентной дозы.

Годовая эффективная (эквивалентная) доза – это сумма эффективной (эквивалентной) дозы внешнего облучения, полученной за календарный год, и ожидаемой дозы внутреннего облучения, обусловленной поступлением за этот же год в организм радионуклидов.

Коллективная эффективная доза – это мера коллективного риска возникновения стохастических эффектов облучения, равная сумме индивидуальных коллективных доз; она измеряется в человеко-зивертах (чел. × Зв).

1.6. Мощность дозы и единицы ее измерения

В биологическом отношении важно знать не только дозу излучения, которую получил облучаемый объект, а дозу, полученную в единицу времени. Суммарная доза, значительно превышающая летальную, но полученная в течение длительного периода времени, не приводит к гибели животного, а доза, меньше смертельной, но полученная в короткий период времени, может вызвать лучевую болезнь различной степени тяжести.

Мощность дозы (Р) – это доза излучения (D) отнесенная к единице времени t: $P = D / t$.

Мощность экспозиционной дозы в системе СИ измеряется в ампер на килограмм (А/кг), внесистемная единица – в рентген в час (Р/ч) или в других дольных и кратных величинах:

$$1 \text{ А/кг} = 3876 \text{ Р/с}, 1 \text{ Р/с} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ А/кг}.$$

Мощность поглощенной дозы облучения в системе СИ измеряется в Вт/кг, Гр/с или в других кратных и дольных величинах. Внесистемной единицей поглощенной дозы является рад/с, а так же другие кратные и дольные величины. Для измерения мощности дозы излучения используются рентгенметры типа ДП-5, УСИТ, ДРГЗ, СРП 68-01 и др.

Под радиационным фоном понимают именно мощность экспозиционной дозы ионизирующих излучений в воздухе, уровень его для средней полосы России составляет 4-40 мкР/ч (микрорентген в час).

Согласно рекомендациям Международной комиссии по радиационной защите (МКЗР) и Всемирного общества здравоохранения (ВОЗ) радиационный уровень, соответствующий естественному фону 0,1-0,2 мкЗв/ч (10-20 мкР/ч), признано считать **нормальным уровнем**, уровень 0,2-0,6 мкЗв/ч (20-60 мкР/ч) считается **допустимым**, а уровень свыше 0,6-1,2 мкЗв/ч (60-120 мкР/ч) с учетом эффекта экранирования считается **повышенным**.

Если говорить о границе жизненно необходимой радиации, проведенные в последнее время эксперименты с растениями и животными показали, что изоляция организма от естественной радиации вызывает в

нем замедление самых фундаментальных жизненных процессов, в том числе – деление клеток и межклеточного информационного объема.

Ионизирующее излучение не только вызывает ионизацию, но и возбуждение, энергия возбуждения от одной молекулы передается другой молекуле в виде вторичного биогенного излучения в области УФО. Это излучение обладает удивительными свойствами – вдвое увеличивается всхожесть семян, распускаются пребывающие в спячке почки деревьев, стимулируется развитие зародышей в яйцах и т.д.

Имеются и иные исследования. Считают, что наследственные нарушения, вызванные малыми дозами радиации, не подчиняются линейной зависимости «доза-эффект». Нобелевский выдвиженец, канадский ученый Петкау А. в своих исследованиях показал, что облучение при низкой мощности дозы может вызывать такой же разрушительный эффект в мембранах живой клетки, какой возникает при интенсивном облучении дозой в десятки и сотни раз более высокой.

Определение границы жизненно необходимой радиации является предметом дополнительных исследований по радиационной биологии.

1.7. ЗАКОН РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА

Количество любого радиоактивного изотопа со временем уменьшается вследствие радиоактивного распада (превращения ядер). Для каждого радиоактивного изотопа средняя скорость распада его атомов постоянна. **Постоянная радиоактивного распада** – λ для определенного изотопа показывает, какая доля ядер распадается в единицу времени. Размерность постоянной распада выражают в обратных единицах времени: с^{-1} , мин^{-1} , ч^{-1} и т.д., чтобы показать, что количество радиоактивных ядер убывает. Основной *закон радиоактивного распада* устанавливает, что за единицу времени распадается всегда одна и та же доля имеющихся в наличии ядер. Математически этот закон выражается уравнением:

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

где N_t – количество радиоактивных ядер, оставшихся по прошествии времени t ;

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

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

λ – постоянная радиоактивного распада;

t – промежуток времени, равный $t - t_0$.

Для характеристики скорости распада радиоактивных веществ (РВ) в практике пользуются периодом физического полураспада.

Период физического полураспада ($T_{\text{физ.}}$) – это время, в течение которого распадается половина исходного количества радиоактивных ядер.

Между постоянной распада и периодом полураспада имеется обратная зависимость, что выражается уравнениями:

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

Исходя из данных уравнений закон радиоактивного распада будет иметь следующий вид в математическом выражении:

$$N_t = N_0 \times e^{-0,693 \times t/T}.$$

Таким образом, число ядер РВ уменьшается со временем по экспоненциальному закону и графически выражается экспоненциальной кривой. Из закона радиоактивного распада выведено важное правило: каждое десятикратное снижение активности осколков и мощности дозы гамма-излучения происходит в результате увеличения их возраста в 7 раз.

1.8. ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

Любой радиометрический прибор имеет в качестве основной части детектор (счетчик), подающий в усилительно-измерительную схему сигналы о поступлении ионизирующих частиц или гамма-квантов. Существуют ионизационные, полупроводниковые и сцинтилляционные детекторы.

1.8.1. Ионизационные детекторы

Самым простым устройством этого типа является *ионизационная камера*. Она представляет собой воздушный конденсатор, состоящий из двух металлических пластин, расположенных на некотором расстоянии друг от друга, к которым приложена разность потенциалов. В сеть включен гальванометр (вольтметр). В отсутствие радиации тока в цепи не будет, поскольку воздух является изолятором. Радиоактивные частицы, попав внутрь конденсатора, ионизируют воздух, превращая его в проводник электричества. Сила тока измеряется гальванометром. Между силой тока (J) и количеством образовавшихся пар ионов (N) существует прямая зависимость: $J = N \times e$, где e – заряд иона.

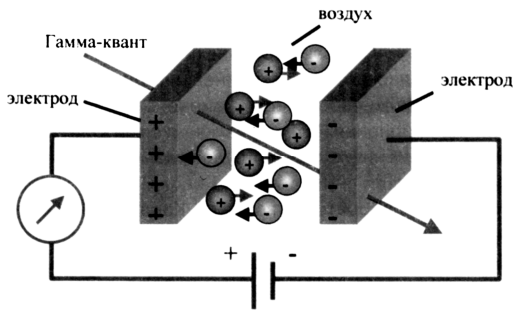


Рис. 1. Схема работы ионизационной камеры

По силе тока определяется интенсивность излучения. В зависимости от типа излучения ионизационные камеры имеют те или иные особенности.

Счетчик Гейгера-Мюллера представляет собой герметичный баллон (трубку), заполненный газовой смесью из аргона и спирта с добавкой галоидов. По оси трубки натянута нить, служащая в качестве анода. Катодом является внутреннее металлическое покрытие баллона. На электроды подается высокое напряжение постоянного тока (400-1000 В). При попадании внутрь баллона бета-частиц или электронов, выбитых из стенок счетчика гамма-лучами, происходит ионизация газа. В результате между электродами возникает лавина ионов и происходит кратковременный электрический разряд. В цепи счетчика регистрируется импульс напряжения (рис. 2). Чувствительность счетчиков зависит в первую очередь от материала катода, из которого гамма-лучи выбивают электроны.

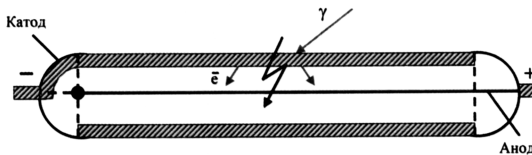


Рис. 2. Счетчик Гейгера-Мюллера

Счетчик Гейгера-Мюллера – весьма чувствительное устройство, позволяющее регистрировать каждую заряженную частицу или гамма-квант.

1.8.2. Полупроводниковые детекторы

Они сходны с ионизационными, но роль ионизационной камеры в этом случае выполняют твердые полупроводники.

Полупроводники – это кристаллические вещества, электропроводность которых при обычной температуре имеет промежуточное значение между электропроводностью металлов (10^6 - 10^4 Ом⁻¹/см⁻¹) и диэлектриков (10^{-10} - 10^{-12} Ом⁻¹/см⁻¹). Под действием радиоактивных частиц в полупроводниковых детекторах происходит переход электронов из валентной зоны в зону проводимости. В результате образуются свободные носители зарядов: электроны (п-проводимость) и дырки (р-проводимость). Под действием внешнего электрического поля, приложенного к полупроводнику, электроны и дырки притягиваются к соответствующим электродам, обуславливая накопление заряда. Последний дает импульс напряжения, который подается в усилительно-измерительную схему прибора.

В качестве полупроводника в радиометрических приборах чаще всего применяют монокристаллы германия. С его помощью регистрируют высокоэнергетические гамма- и бета-лучи. Для регистрации альфа-частиц, низкоэнергетических гамма-квантов и рентгеновских лучей используют кремниевые детекторы (монокристаллы кремния).

В противоположность металлам, у которых электропроводность уменьшается с ростом температуры, у полупроводников с увеличением этого параметра электропроводность резко возрастает. Поэтому многие из полупроводниковых материалов требуют сильного охлаждения при работе, что усложняет устройство приборов, их эксплуатацию и удорожает их стоимость. Исследователи находятся в постоянном поиске новых полупроводников, которые могут работать при обычных температурах. К таким материалам относятся теллурид кадмия, арсенид галлия и йодид ртути, которые уже используются в самых современных радиометрах и спектрометрах. Поскольку плотность полупроводниковых материалов намного выше плотности газов, то энергия поглощаемых частиц в них используется полнее, чем в ионизационных камерах. Поэтому полупроводниковые детекторы обладают очень высокой разрешающей способностью.

1.8.3. Сцинтилляционные детекторы

Сущность работы сцинтилляционного счетчика заключается в регистрации вспышек *люминесценции*, возникающих в некоторых кри-

сталлах, органических жидкостях или пластмассах при попадании в них заряженных частиц или гамма-квантов. Вспышки в кристалле фиксируются *фотокатодом* и в цепи возникает импульс электрического тока.

Однако, сами по себе вспышки могут быть очень слабыми. Для их фиксации применяются *фотоэлектронные умножители* (ФЭУ). Они представляют собой вакуумные электронные приборы с системой умножения электронов, выбитых световой вспышкой с поверхности фотокатода (рис. 3). Умножительная система состоит из нескольких последовательно расположенных *диодов* (эмиттеров), покрытых специальным слоем. Электроны, бомбардирующие диоды, выбивают из них вторичные электроны, количество которых минимум в 2 раза превышает число первичных электронов. Таким образом, каждый последующий диод увеличивает количество электронов. С последнего диода в усилительно-измерительную схему прибора поступает лавина электронов. Благодаря ФЭУ сцинтилляционные счетчики обладают гораздо большей чувствительностью по сравнению с газонаполненными счетчиками.

Для регистрации альфа-частиц в качестве сцинтилляторов (люминофоров) применяют тонкий слой сернистого цинка, а регистрация бета-частиц осуществляется с помощью кристаллов антрацена, стильбена, а также сцинтиллирующих пластмасс. При регистрации гамма-квантов в отечественных приборах успешно используются монокристаллы йодистого натрия и йодистого цезия, активизированные таллием.

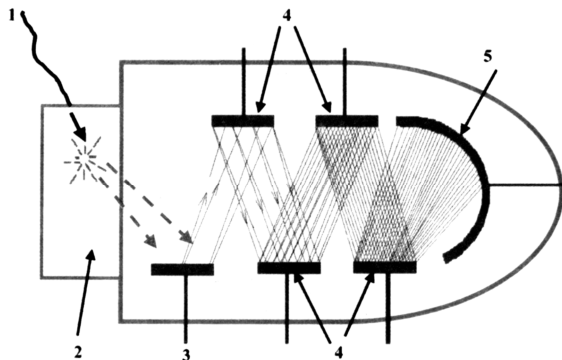


Рис. 3. Схема фотоэлектронного умножителя:

- 1 – гамма-квант; 2 – кристалл-люминофор; 3 – фотокатод;
4 – эмиттеры (диноды); 5 – коллектор

ИСТОЧНИКИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ И ЗАГРЯЗНЕНИЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ РАДИОАКТИВНЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ

2.1. Классификация источников ИИ. Природный РАДИАЦИОННЫЙ ФОН

Все живые существа на Земле постоянно подвергаются воздействию ионизирующей радиации путем внешнего и внутреннего облучения за счет *естественных* и *искусственных* источников ионизирующих излучений, которые образуют *радиационный фон*.

Естественные источники ИИ – это есть совокупность *космического излучения, излучения от естественных радионуклидов*, рассеянных в атмосфере, литосфере, гидросфере и находящихся в составе биологических организмов: все эти излучения образуют *природный радиационный фон (ПРФ)* или *естественный радиационный фон (ЕРФ)*, средняя эффективная доза которого составляет 2000 мкЗв в год на человека.

Искусственные источники ИИ – это совокупность ИИ и РВ, образующихся в результате ядерных взрывов, деятельности атомных электростанций, извлечения полезных ископаемых из недр Земли, применения ИИ и РВ в медицине, науке, в других отраслях хозяйственной деятельности человека. Совокупность этих источников составляет *искусственный радиационный фон – ИРФ*, который в настоящее время в целом по земному шар добавляет к ЕРФ лишь 1-3%.

2.2. Естественные источники ИИ

К естественным источникам ионизирующего излучения относятся космическое излучение (первичное и вторичное), природные радиоактивные вещества, рассеянные в атмосферном воздухе, гидросфере и литосфере.

2.2.1. Космическое излучение

Различают первичное и вторичное космическое излучение. *Первичные космические лучи* представляют собой поток частиц высоких энергий, приходящих на Землю из космоса и возникающих в процессе термоядерных реакций в недрах Солнца и звезд. **Первичное космическое излучение** состоит из протонов – 92%, альфа-частиц – 7%, ядер атомов лития, бериллия, углерода, азота и кислорода и др. Кроме того в состав космического излучения входят электроны, позитроны, гамма-кванты и нейтрино.

При резком увеличении солнечной активности возможно нарастание космического излучения на 4-100%. Лишь немногие первичные космические лучи достигают поверхности Земли, так как они взаимодействуют с атомами воздуха, рождая потоки частиц вторичного космического излучения. На орбите Земли скорость космических частиц примерно равна 300 км/с, т.е. около $0,001 c$ (где c – скорость света). Плотность космических частиц на орбите Земли зависит от интенсивности термоядерных реакций на Солнце. В спокойные периоды деятельности Солнца плотность первичных космических частиц на орбите Земли на высоте 50 км от ее поверхности равна 1-2 част./см²·с. В периоды усиления активности Солнца количество их может достигать 100 част./см²·с.

Первичные космические частицы, обладая огромной энергией (в среднем 10 ГэВ) и скоростью, взаимодействуют с ядрами атомов, составляющих атмосферу, и рождают вторичное излучение.

Вторичное космическое излучение состоит из электронов, нейтронов, мезонов и фотонов; максимум его интенсивности находится на высоте 20-30 км, на уровне моря интенсивность излучения составляет около 0,05% от первоначального.

Элементарные частицы, составляющие *вторичное космическое излучение*, под действием магнитного поля Земли образуют вокруг нее два *радиационных пояса* – внешний и внутренний. На широте экватора внешний пояс расположен на расстоянии 20–60 тыс. км, а внутренний – на расстоянии 600-6000 км от поверхности Земли. На некоторых участках внутренний пояс может опускаться на расстояние до 300 км от поверхности Земли.

Поскольку среди элементарных частиц радиационных поясов преобладают электроны и позитроны, то плотность частиц измеряется количеством электронно-позитронных пар на квадратный сантиметр в секунду. Плотность потока частиц во внешнем и внутреннем радиационных поясах равны соответственно 2107 и 1105 электрон/см²·с.

Заряженные частицы вторичного космического излучения движутся вдоль силовых линий магнитного поля Земли, которое является для них ловушкой. В итоге в радиационных поясах нашей планеты потоки заряженных частиц в сотни миллионов раз превышают потоки *солнечного ветра* в космическом пространстве. На поверхность Земли попадает, главным образом, вторичное космическое излучение, которое создает ионизацию компонентов атмосферы. Интенсивность ионизации возрастает с увеличением высоты. На уровне моря она минимальна, а на высоте 12-16 км достигает максимума. Ионизация, вызываемая космическими лучами, возрастает в направлении от экватора к полюсам, что является следствием отклонения первично заряженных космических частиц магнитным полем Земли.

У космических частиц есть так называемые *мягкая* и *жесткая компоненты* (составные части). Мягкая компонента состоит из электронов, позитронов и фотонов. По своей проникающей способности она близка к гамма-излучению. Жесткая компонента состоит из *мю-мезонов* и *нейтрино*. Жесткая компонента космического излучения обладает очень высокой проникающей способностью. Мю-мезоны могут проникать в толщу литосферы до 3 км, а нейтрино пронизывают Землю насквозь, улетая далее в космос.

Космические лучи и ионизирующее излучение, испускаемое природными радиоактивными веществами, содержащимися в воде, почве и горных породах, образуют *фоновое излучение*, к которому адаптированы ныне существующая биота. Выдающийся русский радиобиолог А.М. Кузин полагает, что атомная радиация природного радиоактивного фона явилась одним из главных факторов происхождения жизни на Земле и необходима для нормального существования современных живых организмов (Кузин, 2002).

Обычно интенсивность гамма-излучения на высоте 1 метр от поверхности Земли колеблется от 10 до 15 мкР/ч, иногда достигая 25 мкР/ч. В разных частях биосферы естественный фон различается в 2-3 раза. Например, в горах на высоте 3 км он в 3 раза выше, чем на уровне моря. Люди, живущие на уровне моря, получают в среднем из-за космических лучей эффективную эквивалентную дозу около 300 мкЗв в год; для людей, живущих выше 2000 м над уровнем моря, эта величина в несколько раз больше. Еще более интенсивному облучению подвергаются экипажи и пассажиры самолетов: при подъеме с высоты 4000 м до 12000 м уровень облучения за счет космических лучей возрастает примерно в 25 раз, продолжает расти при дальнейшем увеличении высоты до 20000 км и выше (высота полета сверхзвуковых реактивных самолетов). Например, при перелете из Нью-Йорка в Париж пассажир получает дозу около 50 мкЗв.

2.2.2. Природные (естественные) радиоактивные вещества

Встречающиеся в природе радиоактивные элементы принято называть *естественными*. Большинство из них – тяжелые элементы с порядковыми номерами от 81 до 96. Природные радиоактивные элементы путем альфа- и бета-распада превращаются в другие радиоактивные изотопы. Эта цепь радиоактивных превращений называется *радиоактивным рядом* или *семейством*.

Тяжелые естественные радиоизотопы образуют четыре радиоактивных семейства: *урана-радия*; *тория*; *актиния*; *нептуния*. Массовые числа членов *урано-радиевого ряда* всегда четные и подчиняются закону: $A = 4n + 2$, где n изменяется от 51 до 59. Для *ториевого ряда* массовые числа четные и определяются по формуле: $A = 4n$, где n изменяется от 52 до 58. Для *актиниевого ряда* массовые числа элементов всегда нечетные и могут быть определены по формуле: $A = 4n + 3$, где n изменяется от 51 до 58. Массовые числа элементов ряда нептуния нечетные и определяются по формуле: $A = 4n + 1$, где n изменяется от 52 до 60.

Родоначальники каждого семейства характеризуются очень большими периодами полураспада (см. табл. 2), которые сопоставимы с временем жизни Земли и всей Солнечной системы.

Таблица 2 – Родоначальники естественных радиоактивных семейств

| Ряд | Родоначальник семейства | Период полураспада – $T_{\text{физ}}$, годы |
|--------------|-------------------------|--|
| $A = 4n$ | Торий-232 | $1,4 \times 10^{10}$ |
| $A = 4n + 2$ | Уран-238 | $4,51 \times 10^9$ |
| $A = 4n + 3$ | Уран-235 | $7,13 \times 10^8$ |
| $A = 4n + 1$ | Нептуний-232 | $2,2 \times 10^6$ |

Самый большой период полураспада у тория (14 млрд лет), поэтому он со времени аккрекации Земли сохранился почти полностью. Уран-238 распался в значительной степени, распалась подавляющая часть урана-235, а изотоп нептуния-232 распался весь. По этой причине в земной коре много тория (почти в 20 раз больше урана), а урана-235 в 140 раз меньше, чем урана-238. Поскольку родоначальник четвертого семейства (нептуний) со времени аккрекации Земли весь распался, то в горных породах его почти нет. В ничтожных количествах нептуний обнаружен в урановых рудах. Но происхождение его вторичное и обязано бомбарди-

ровке ядер урана-238 нейтронами космических лучей. Сейчас нептуний получают с помощью искусственных ядерных реакций. Для эколога он не представляет интереса.

Периоды полураспада и типы распада членов естественных радиоактивных рядов приведены в таблице 2.

Естественные радиоактивные семейства обладают рядом общих особенностей, которые заключаются в следующем:

1. Родоначальники каждого семейства характеризуются большими периодами полураспада, находящимися в пределах 10^8 - 10^{10} лет.

2. Каждое семейство имеет в середине цепи превращений изотоп элемента, относящийся к группе благородных газов (эманацию).

3. За радиоактивными газами следуют твердые короткоживущие элементы.

4. Все изотопы трех радиоактивных семейств распадаются двумя путями: альфа- и бета-распадами. Причем короткоживущие ядра семейств испытывают конкурирующие альфа- и бета-распад, тем самым образуя разветвления рядов. Если при альфа- и бета-распадах ядра не переходят сразу в нормальное состояние, то эти акты сопровождаются гамма-излучением.

Ряды заканчиваются стабильными изотопами свинца с массовыми числами 206, 208 и 207, соответственно, для уранового, ториевого, актиноуранового ряда.

Семейства урана-радия и тория являются активными гамма-излучателями по сравнению с семейством актиния, мощность дозы гамма-излучения которого весьма невелика.

Таким образом, в радиоактивных семействах имеются альфа-, бета- и гамма-излучатели, причем мощность дозы каждого излучения в разных семействах неодинакова. Общее число излучателей того или иного рода для разных семейств приведено в таблице 3.

Таблица 3 – Количество излучателей естественных рядов

| Название ряда | Альфа-излучатели | | Бета-излучатели | | Гамма-излучатели | |
|---------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| | общее количество | количество важных | общее количество | количество важных | общее количество | количество важных |
| Урана-радия | 13 | 8 | 10 | 4 | 11 | 3 |
| Актиния | 10 | 7 | 7 | 2 | 6 | – |
| Тория | 8 | 7 | 6 | 4 | 6 | 2 |

В ряду урана-238 всего 19 радионуклидов и один стабильный изотоп – свинец-206. Наиболее важные альфа-излучатели этого семейства: уран-238, уран-234, торий-230, радий-226, радон-222, полоний-218, полоний-214 и полоний-210. Относительное количество других альфа-излучателей ряда невелико, поэтому они не представляют практического интереса.

К числу существенных бета-излучателей ураново-радиевого ряда относятся: протактиний-234, свинец-214, висмут-214 и висмут-210. Причем, бета-излучение протактиния-234 составляет около 50% от бета-излучения всех изотопов семейства.

Основную долю (97,9%) в мощность гамма-излучения этого семейства вносят продукты распада радия-226 (свинец-214 и висмут-214) и радона-218 (полоний-214). Торий-234 и протактиний-234 – продукты распада родоначальника семейства (урана-238), дают около 2,1% общей мощности гамма-излучения. Вклад остальных членов ряда в суммарную интенсивность гамма-квантов ничтожно мал.

В ряду актиния находится 14 радиоизотопов и один стабильный изотоп – свинец-207. Поскольку в природном уране актиноурана (урана-235) очень мало, альфа-излучение актиниевого семейства составляет не более 5%, а гамма-излучение – около 1,25% от интенсивности соответствующих лучей ураново-радиевого ряда.

Ряд тория содержит 12 радионуклидов и один стабильный изотоп – свинец-208. Главными альфа-излучателями здесь являются: торий-232, торий-228, радий-224, радон-220, полоний-216, висмут-212 и полоний-212.

К основным бета-излучателям в ториевом ряду относятся: актиний-228, свинец-212, висмут-212 и таллий-208.

Основной вклад в гамма-излучение ряда тория вносят продукты распада тория-228 (полоний-216, свинец-212, висмут-212 и таллий-208). Их доля – 60,2% всей интенсивности гамма-квантов. Остальная мощность гамма-излучения (39,8%) принадлежит продукту распада радия-228 (актинию-228). Доля остальных гамма-излучателей в общей мощности гамма-излучения ничтожна.

Ниже приведена краткая характеристика важнейших радиоизотопов, входящих в естественные семейства.

Уран (U). Химический элемент с порядковым номером 92. Имеет три природных изотопа ^{238}U , ^{235}U и ^{234}U . Период полураспада первого $4,5 \times 10^9$ лет, второго – $7,13 \times 10^8$ лет, третьего – $2,52 \times 10^5$ лет. Их относительную распространенность в рудах можно выразить так: 99,28; 0,71; 0,006% соответственно.

Этот серебристо-белый металл открыт Клапротом в 1789 году. По внешнему виду металлический уран напоминает железо. Он окисляется в воздухе до самовоспламенения и горит ярким пламенем. Плотность урана 19 г/см^3 , температура плавления $1\,133 \text{ }^\circ\text{C}$. Хорошо растворяется в минеральных кислотах.

Уран широко распространен в земной коре. Он содержится в горных породах, почве, воде озер, рек и морей.

Уран-238 является родоначальником уранового семейства. В первичных минералах он практически всегда находится в равновесии со своими короткоживущими продуктами распада, а также со своим долгоживущим изотопом – ураном-235.

Уран-235 (актиноуран) является родоначальником актиноуранового семейства, которое в природе всегда сопутствует семейству урана-238. Актиниоуран открыт сравнительно недавно (в 1935 г.), т.е. значительно позднее продуктов его распада, чем и объясняется несоответствие названий актиниевого семейства и его родоначальника.

Ядро урана-235 обладает замечательным свойством. Кроме спонтанного распада он способен делиться при захвате нейтрона с освобождением колоссальной энергии, поэтому является одним из *ядерных горючих*.

Уран, химически выделенный из руд (естественно, что это смесь всех трех природных изотопов урана) и приготовленный в виде окиси (U_3O_8), является стабильным источником альфа-излучения. Примерно через год после его выделения устанавливается радиоактивное равновесие между ураном-238 и короткоживущими бета-активными продуктами его распада. Тогда этот препарат может служить в качестве стабильного источника бета-излучения.

Уран связан с рудами осадочного, гидротермального и магматического происхождения. Он содержится более чем в 100 минералах. Среди них наиболее часты окислы урана, соли фосфорной, ванадиевой, кремниевой, мышьяковой, титановой и ниобиевой кислот. Наиболее важные промышленные руды урана представлены первичным минералом – уранинитом (урановой смолкой), представляющим собой окисел урана черного цвета. Кроме того есть множество вторичных минералов урана, которые называются *урановыми слюдками*. Наиболее распространенные из них: *торбернит* – $\text{Si}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, *отенит* – $\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, *карнотит* – $\text{K}_2(\text{UO}_2)_2(\text{VO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, *тюямунит* – $\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{VO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$. Из урановых слюдок крупные промышленные скопления образуют только карнотит и тюямунит. Они же являются рудой для получения ванадия и радия.

Уран и радий в России впервые были получены из руды месторождения Тюя-Муюн в Фергане. Носителями этих металлов здесь оказались два минерала из группы урановых слюдок – туюмунит и *ферганит*. Первый минерал открыт К.А. Ненадкевичем в 1912 г., а второй – И.А. Антиповым в 1899 году.

Торий (Th). Химический элемент с порядковым номером 90. Это светло-серый металл с плотностью $11,72 \text{ г/см}^3$ и температурой плавления $1750 \text{ }^\circ\text{C}$, открытый Берцелиусом в 1828 году. Трудно поддается действию кислот. Он имеет 6 изотопов, из которых долгоживущие только два: торий-232 ($T_{\text{физ.}} = 1,39 \times 10^{10}$ лет) и ионий-230 ($T_{\text{физ.}} = 8 \times 10^4$ лет).

Скорость распада тория очень мала. За 14 миллиардов лет количество атомов тория-232 уменьшается только в 2 раза. Поскольку возраст Земли всего лишь 4,5 млрд лет, то можно полагать, что значительное количество этого элемента сохранилось со времени аккреации нашей планеты.

Руды тория по своему генезису являются *магматическими*. При разрушении таких месторождений образуются россыпи, обогащенные минералами тория. Основным источником тория служат пески, содержащие минерал *монацит* – (Ce, La, Nd, Th) PO₄. Особенно богаты монацитом морские россыпи. Промышленное значение имеет также минерал *торит* – ThSiO₄.

Актиний (Ac). Химический элемент с порядковым номером 89. Серебристо-белый металл с температурой плавления $1050 \text{ }^\circ\text{C}$, имеющий два изотопа: актиний-227 ($T_{\text{физ.}} = 21,8$ года) и мезоторий-228 ($T_{\text{физ.}} = 6,13$ часа).

Актиний, претерпевая альфа- и бета-распад, образует одно из разветвлений ряда актиния. В основном он является бета-излучателем. Ядерных гамма-лучей этот радионуклид не имеет. В смеси с бериллием актиний служит для приготовления источников нейтронов. Актиний встречается в рудах урана и тория.

Радий (Ra). Химический элемент с порядковым номером 88. Это серебристо-белый блестящий металл с плотностью 6 г/см^3 и температурой плавления $700 \text{ }^\circ\text{C}$, открытый в начале XX века супругами Кюри, имеет 4 изотопа: радий-226 ($T_{\text{физ.}} = 1602$ года), мезоторий-228 ($T_{\text{физ.}} = 6,7$ года), актиний X-223 ($T_{\text{физ.}} = 11,4$ сут.) и торий X-224 ($T_{\text{физ.}} = 3,64$ сут.). По химическим свойствам радий близок к барию, изоморфно замещает последний в минералах: барите (сульфат бария) и витерите (карбонат бария). В природных водах радий встречается в виде хлорида.

В результате альфа-распада радия-226, сопровождаемого гамма-излучением, образуется радиоактивный газ – *радон* (эманация). В закрытом сосуде радон через 40 дней приходит в состояние радиоактивного равновесия с радием, находящимся в сосуде. После этого срока препарат можно использовать в качестве эталонного источника гамма-излучения.

Радон приходит в равновесие со своими короткоживущими продуктами распада (Ra A, Ra B, и Ra C) через 3 часа. Другой изотоп радия – мезоторий-1, обладает мягким бета-излучением, интенсивность гамма-излучения его невелика.

Изотопы радия широко распространены в горных породах и рудах, но в чрезвычайно малых концентрациях. На 3 тонны урана приходится 1 г равновесного радия. Поскольку в различных горных породах радий встречается в неодинаковых концентрациях, то это его свойство используется для диагностики петрографических разностей по гамма-лучам. Добывается радий из урановых руд. Он широко применяется в медицине для лучевой терапии.

Радон (Rn). Химический элемент с порядковым номером 86. Это тяжелый инертный радиоактивный газ с плотностью 9,73 г/л. Он бесцветен и хорошо растворяется в воде. Имеет 4 изотопа: радон-222 ($T_{\text{физ.}} = 3,823$ дня), радон-218 ($T_{\text{физ.}} = 1,9 \times 10^{-2}$ с), торон-220 ($T_{\text{физ.}} = 54,5$ с) и актинон-219 ($T_{\text{физ.}} = 3,92$ с). Все они принадлежат к группе благородных газов, обладают альфа-активностью и других излучений не имеют. Радоновая эманация является источником *активных осадков*. Радон в смеси с бериллием используется в научных исследованиях и медицине как источник нейтронов.

Астат (At). Химический элемент из группы галогенов с порядковым номером 85. В переводе с греческого «астат» означает «нестабильный», т.к. это единственный галоген, не имеющий стабильных изотопов. Все четыре изотопа астата радиоактивны: астат-210 ($T_{\text{физ.}} = 8,3$ ч), астат-218 ($T_{\text{физ.}} = 2$ с), астат-215 ($T_{\text{физ.}} = 1 \times 10^{-4}$ с) и астат-216 ($T_{\text{физ.}} = 3 \times 10^{-4}$ с).

В незначительных количествах астат входит во все три естественные радиоактивные семейства. Его изотопы альфа-активны. Небольшая часть астата претерпевает бета-распад.

Полоний (Po). Химический элемент с порядковым номером 84. Это мягкий серебристо-белый металл с плотностью 9,3 г/см³ и температурой плавления 254 °С. Полоний имеет 8 радиоактивных изотопов: полоний-209 ($T_{\text{физ.}} = 103$ года), полоний-210 ($T_{\text{физ.}} = 140$ сут.), радий А-218

($T_{\text{физ.}} = 3,05$ мин), торий А-216 ($T_{\text{физ.}} = 0,158$ с), актиний Ас-215 ($T_{\text{физ.}} = 1,83 \times 10^{-3}$ с), радий-214 ($T_{\text{физ.}} = 1,55 \times 10^{-4}$ с), торий ($T_{\text{физ.}} = 3 \times 10^{-7}$ с), актиний ($T_{\text{физ.}} = 5 \times 10^{-3}$ с).

Полоний является чистым альфа-излучателем, что позволяет широко использовать его в лабораторных исследованиях. В смеси с бериллием он представляет собой лучший источник нейтронов.

Свинец (Рв). Химический элемент с порядковым номером 82. Представляет собой синевато-серый мягкий ковкий металл с плотностью $11,34$ г/см³ и температурой плавления $327,4$ °С, химически стойкий. Свинец имеет 3 устойчивых изотопа: свинец-206 (радий G), свинец-207 (актиний D), свинец-208 (торий D), и 4 радиоактивных: свинец-210 (радий D, $T = 22$ года), свинец-212 (торий В, $T = 10,6$ часа), свинец-211 (актиний В, $T = 36,1$ мин), свинец-214 (радий В, $T = 26,8$ мин).

Устойчивые изотопы свинца с массовыми числами 206, 207 и 208 являются конечными продуктами распада трех естественных радиоактивных рядов. Эти изотопы нерадиоактивны, но всегда присутствуют в радиоактивных рудах. Отношение количества нерадиоактивного свинца к содержанию радиоактивных элементов (урана, тория) в горных породах и рудах позволяет определить абсолютный возраст геологических образований. Остальные четыре изотопа свинца радиоактивны. Все они распадаются путем бета-излучения. Продукты распада радия D кроме бета-лучей выделяют альфа-лучи, поэтому из свинца-210 получают стандартные источники бета- и альфа-излучения.

Свинец применяют в качестве экранов и фильтров для гамма-излучения. Применение его для экранирования альфа- и бета-излучения нецелесообразно, поскольку в свинце всегда содержится некоторое количество радиоактивных изотопов, особенно радия D. В природе встречаются и другие радиоактивные изотопы свинца (с массовыми числами 200, 201 и 203), но количество их ничтожно.

Содержание свинца в земной коре значительно ($1,6 \times 10^{-3}\%$), концентрируется он, главным образом, в сульфидных минералах, имеющих *гидротермальное* происхождение.

Естественные радиоизотопы, не входящие в радиоактивные семейства. Кроме естественных радиоактивных элементов, являющихся членами трех рассмотренных выше естественных рядов, в природе имеются изотопы, генетически не связанные между собой, но обладающие радиоактивностью. Количество таких радиоизотопов превышает 200, период полураспада их колеблется от долей секунды до миллиардов лет.

Интерес для эколога представляют изотопы с большим периодом полураспада: калий-40, рубидий-87, самарий-147, углерод-14, лютеций-176 и рений-187. Радиоактивный распад ядер этих элементов представляет собой изолированный акт, т.е. после распада образуется устойчивый дочерний изотоп. Как видно из таблицы 4, все перечисленные ядра подвержены бета-распаду, за исключением самария, который претерпевает альфа-распад.

Таблица 4 – Естественные радиоактивные изотопы, не входящие в семейства

| Изотопы | Символ | Атомный номер | Массовое число | Период полу-распада | Тип распада |
|-------------|--------|---------------|----------------|--------------------------|-------------|
| Калий-40 | K | 19 | 40 | $1,3 \times 10^9$ лет | бета |
| Углерод-14 | C | 6 | 14 | 5 730 лет | бета |
| Рубидий-87 | Rb | 37 | 87 | $5,8 \times 10^{10}$ лет | бета |
| Самарий-147 | Sm | 62 | 147 | $6,7 \times 10^{11}$ лет | альфа |
| Лютеций-176 | Lu | 71 | 176 | $2,4 \times 10^{10}$ лет | бета |
| Рений-187 | Re | 75 | 187 | 4×10^{12} лет | бета |

Из шести приведенных естественных радионуклидов наибольший интерес представляет *калий-40*, ввиду его большой распространенности в земной коре. Природный калий содержит три изотопа: калий-39, калий-40 и калий-41, из которых только калий-40 радиоактивен. Количественное соотношение этих трех изотопов в природе выглядит так: 93,08; 0,012; 6,91%.

Калий-40 распадается двумя путями. Около 88% его атомов испытывают бета-излучение и превращаются в атомы кальция-40. На один акт распада калия-40 приходится в среднем 0,893 бета-частиц с энергией 1311 кэВ и 0,107 гамма-квантов с энергией 1461 кэВ. Остальные 12% атомов, испытывая *K-захват*, превращаются в атомы аргона-40. На этом свойстве калия-40 основан калий-аргоновый метод определения абсолютного возраста горных пород и минералов.

Рубидий. Природный рубидий состоит из двух изотопов: рубидия-85 и рубидия-87. Радиоактивным является второй изотоп, который испускает мягкие бета-лучи с максимальной энергией 0,275 МэВ и гамма-лучи с энергией 0,394 МэВ.

Таким образом, наибольшее значение имеет ^{87}Rb , второе место по количеству занимает радиоизотоп ^{40}K , но радиоактивность ^{40}K в земной коре превышает радиоактивность суммы всех других естественных радиоактивных элементов за счет того, что распад ^{40}K сопровождается жестким бета- и гамма-излучением, а ^{87}Rb характеризуется мягким бета-излучением и имеет длительный период полураспада.

Таблица 5 – Концентрация некоторых радионуклидов и мощности поглощенных доз в почвах различных типов

| Типы почв | Концентрация, пКи/г | | | Мощность поглощенной дозы, мкрад/ч |
|---------------------|---------------------|------------------|-------------------|------------------------------------|
| | ⁴⁰ K | ²³⁸ U | ²³² Th | |
| Серозем | 18 | 0,85 | 1,3 | 7,4 |
| Серо-коричневая | 19 | 0,75 | 1,1 | 6,9 |
| Каштановая | 15 | 0,72 | 1,0 | 6,0 |
| Чернозем | 11 | 0,58 | 0,97 | 5,1 |
| Серая лесная | 10 | 0,48 | 0,72 | 4,1 |
| Дерново-подзолистая | 8,1 | 0,41 | 0,60 | 3,4 |
| Подзолистая | 4,0 | 0,24 | 0,33 | 1,8 |
| Торфянистая | 2,4 | 0,17 | 0,17 | 1,1 |
| Среднее | 10 | 0,7 | 0,7 | 4,6 |
| Пределы колебаний | 3-20 | 0,3-1,4 | 0,2-1,3 | 1,4-9 |

Самарий. Из семи известных изотопов этого элемента только самарий-147 является радиоактивным. Его доля в природном самарии составляет около 15%. Он испускает альфа-лучи с энергией 2,11 МэВ, пробег которых в воздухе составляет 11,6 мм.

Лютеций. Известно несколько его изотопов, но радиоактивен только лютеций-176. Подобно калию, он распадается двумя путями: бета-распадом и К-захватом. Максимальная энергия бета-лучей около 0,4 МэВ. Гамма-излучение обладает энергией 0,270 МэВ.

Рений. Радиоактивным является изотоп рений-187, доля которого в природном рении составляет 63%. Испускает бета-лучи с энергией 0,04 МэВ.

Особое место среди природных радиоизотопов занимает углерод. Природный углерод состоит из двух стабильных изотопов, среди которых преобладает углерод-12 (98,89%). Остальная часть почти целиком приходится на изотоп углерод-14 (1,11%).

Помимо стабильных изотопов углерода известны еще пять радиоактивных. Четыре из них (углерод-10, углерод-11, углерод-15 и углерод-16) характеризуются весьма малыми периодами полураспада (секунды и доли секунды). Пятый радиоизотоп, углерод-14, имеет период полураспада 5730 лет.

В природе концентрация углерода-14 крайне мала. Например, в современных растениях один атом этого изотопа приходится на 10^9 атомов углерода-12 и углерода-13. Однако с появлением атомного оружия и

ядерной техники углерод-14 получается искусственно при взаимодействии медленных нейтронов с азотом атмосферы, поэтому количество его постоянно растет.

Наиболее весомыми из всех естественных источников радиации является невидимый, не имеющий запаха и вкуса, тяжелый (в 7,5 раза тяжелее воздуха) газ радон, который вместе с другими дочерними продуктами распада ответственен за 75% годовой индивидуальной эффективной эквивалентной дозы, получаемой населением от земных источников радиации и за 50% дозы от всех естественных источников радиации. Радон в виде ^{222}Rn и ^{220}Rn выделяется из земной коры повсеместно, но основную дозу человек получает находясь в закрытом, непрветриваемом помещении (уровень радиации выше в 8 раз, чем в наружном воздухе) за счет следующих источников: поступление из почвы, фундамента, перекрытия; высвобождение из строительных материалов жилых помещений составляет 60 кБк/сут., из наружного воздуха проникает 10 кБк/сут., высвобождается из воды, используемой в бытовых целях – 4 кБк/сут., выделяется из природного газа при его сгорании – 3 кБк/сут.

Больших концентраций радон достигает в помещениях, если дом стоит на грунте с повышенным содержанием радионуклидов или если при его строительстве использованы материалы с повышенной радиоактивностью.

Таблица 6 – Средняя удельная радиоактивность строительных материалов

| Вид строительного материала | Удельная радиоактивность, Бк/кг |
|---|---------------------------------|
| Дерево | 1,1 |
| Природный гипс | 29 |
| Песок и гравий | 34 |
| Портланд-цемент | 45 |
| Кирпич | 126-840 |
| Гранит | 170 |
| Зольная пыль | 341 |
| Глинозем | 496-1367 |
| Фосфогипс | 574 |
| Кальций-силикатный шлак | 2140 |
| Отходы урановых обогатительных предприятий | 4625 |
| Шлак из доменной печи | 330 |
| Известь | 20-30 |
| Бетон из обычных матер. | 180-200 |
| Бетон, содержащий глинистые сланцы (Швеция) | 480 |

Примечание. В таблице представлены материалы НКДАР ООН, 1982 год.

По сведениям ученых Марийского государственного университета (Новоселов Г.Н., Леухин А.В., Ситников Г.А., 1997) наиболее высокой удельной активностью обладал каменноугольный шлак ($A_{эфф.} = 437$ Бк/кг), гранит. Более низкая удельная радиоактивность была у мрамора, керамического кирпича ($A_{эфф.} = 335$ Бк/кг), силикатного кирпича ($A_{эфф.} = 856$ Бк/кг), песка строительного ($A_{эфф.} = 114$ Бк/кг). Для бетона характерен достаточно большой диапазон вариации удельной радиоактивности.

В качестве других источников земной радиации следует назвать каменный уголь, фосфаты и фосфорные удобрения, водоемы и др.

В целом естественные источники ИИ ответственны примерно за 90% годовой эффективной эквивалентной дозы облучения, из этой дозы на долю земных источников приходится 5/6 частей (в основном за счет внутреннего облучения), на долю космических источников – 1/6 часть (в основном путем внешнего облучения).

2.2.2.1. Радиоактивность оболочек Земли

Первые наблюдения радиоактивности почв и горных пород были проведены в самом начале XX века. Последующие исследования показали, что все объекты географической оболочки обладают определенной радиоактивностью. Общее представление о порядке наиболее часто наблюдаемых величин естественной радиоактивности почв, растений, земной коры и гидросферы можно видеть в таблице 7.

Таблица 7 – Среднее содержание естественных радионуклидов в разных объектах географической оболочки Земли (по А.П. Виноградову, Л.А. Перцову)

| Объекты | Элементы, мас. % | | |
|---------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| | Уран | Торий | Радий |
| Земная кора | $2,5 \times 10^{-4}$ | $1,3 \times 10^{-3}$ | $8,3 \times 10^{-11}$ |
| Почва | 1×10^{-4} | 6×10^{-4} | 8×10^{-11} |
| Морская вода | 3×10^{-7} | 7×10^{-8} | 1×10^{-14} |
| Пресная вода | 2×10^{-8} | 2×10^{-9} | 1×10^{-15} |
| Зола растений | 5×10^{-5} | 5×10^{-5} | 2×10^{-11} |

2.2.2.2. Радиоактивность горных пород

О распределении радиоактивных элементов в толще земной коры и литосферы в целом, на глубинах недоступных непосредственному наблюдению, можно судить только на основании косвенных фактов и об-

щих представлений о строении Земли. В настоящее время наибольшим признанием пользуется концепция, согласно которой радиоактивность пород падает с глубиной, но все же остается измеримой до весьма значительных глубин. Резко выраженное накопление радиоактивных элементов в *гранитном слое* континентальной коры, установленное Стреттом еще в 1906 году, подтвердилось последующими исследованиями.

Средние значения концентраций радиоактивных элементов в горных породах приведены в таблице 8, а в таблице 9 дана удельная активность горных пород в отношении естественных радионуклидов по данным ВНИИФТРИ (1996). Из этих данных видна основная геохимическая закономерность уменьшения содержания радиоизотопов с увеличением основности магматических пород. Наибольшее содержание естественных радионуклидов наблюдается в изверженных породах кислого и щелочного состава, богатых калием. Основными носителями радиоактивных элементов в этих породах являются *акцессорные* минералы:

Таблица 8 – Распространенность радиоактивных элементов в горных породах, мас. % (по А.П. Виноградову)

| Элементы | Горные породы | | | | | |
|----------|----------------------|--------------------|--------------------|----------------------|---------------------------------|----------------------|
| | метеориты (хондриты) | дуниты | базальты | граниты | осадочные породы: глины, сланцы | глубоководные илы |
| Уран | $1,5 \times 10^{-6}$ | 3×10^{-7} | 5×10^{-5} | $3,5 \times 10^{-4}$ | $2,5 \times 10^{-4}$ | $1,3 \times 10^{-4}$ |
| Торий | 4×10^{-6} | 5×10^{-7} | 3×10^{-4} | $1,8 \times 10^{-3}$ | $1,3 \times 10^{-3}$ | 7×10^{-4} |

Таблица 9 – Удельная активность естественных радионуклидов в горных породах

| Горные породы | Удельная активность, Бк/кг | | |
|-----------------------|----------------------------|-----------|----------|
| | Уран-238 | Торий-232 | Калий-40 |
| <i>Магматические:</i> | | | |
| Кислые | 60 | 80 | 1 000 |
| Средние | 20 | 30 | 700 |
| Основные | 10 | 10 | 240 |
| Ультраосновные | 0,4 | 25 | 150 |
| <i>Осадочные:</i> | | | |
| Известняки | 30 | 7 | 90 |
| Песчаники | 19 | 10 | 370 |
| Сланцы глинистые | 44 | 45 | 700 |

циркон, монацит, ксенотим, ортит, апатит и сфен. Что касается главных породообразующих минералов, то установлено, что калийные минералы (в первую очередь полевые шпаты) обладают в среднем в 3 раза большей радиоактивностью, чем *фемические*. Поэтому на практике существует эмпирическое правило: магматические породы светлых оттенков более радиоактивны, чем темные.

Наиболее высокой радиоактивностью среди осадочных пород обладают глинистые сланцы и глины. Содержание радионуклидов в них приближается к таковому в кислых изверженных породах – гранитах. На основании анализа многочисленных диаграмм гамма-каротажа глубоких скважин и результатов лабораторного радиометрического изучения большого количества образцов осадочных горных пород было выявлено, что среди них наименьшей радиоактивностью обладают чистые химические и органические осадки (*каменная соль, гипс, известняки, доломиты, кварцевые пески, кремнистые сланцы, яшмы*). Морские осадки в целом более радиоактивны, чем континентальные.

2.2.2.3. Радиоактивность почв

Главным источником радиоактивных элементов в почвах следует считать почвообразующие породы. Поэтому почвы, развитые на кислых магматических породах, относительно обогащены радиоактивными элементами (ураном, радием, торием, калием), а почвы, образованные на основных и ультраосновных породах, бедны ими. Глинистые почвы почти везде богаче радиоизотопами, чем песчаные.

Почвы, как рыхлые образования, по вещественному составу близки к осадочным породам, поэтому они во многом подчиняются закономерностям распределения естественных радионуклидов в отложениях этого генезиса. Тонкая коллоидная фракция почв, с которой связаны *обменно-сорбционные процессы*, обогащена радиоактивными элементами по сравнению с более крупными частицами. То же самое касается и органической составляющей почв. Однако прямой зависимости между радиоактивностью почв и количеством органического вещества в них не наблюдается. В таблице 10 приведена удельная активность основных типов почв по данным ВНИИФТРИ (1996). По данным А.П. Виноградова содержание радия в верхнем горизонте почв колеблется от 2,8 до $9,5 \times 10^{-10}\%$. Причем в большинстве почв наблюдается резкое смещение радиоактивного равновесия между ураном и радием в сторону последнего, что связано с выщелачиванием урана грунтовыми водами.

Таблица 10 – Удельная активность естественных радионуклидов в почвах

| Основные типы почв | Удельная активность, Бк/кг | | |
|---------------------|----------------------------|-----------|----------|
| | Уран-238 | Торий-232 | Калий-40 |
| Сероземы | 31 | 48 | 670 |
| Серо-коричневые | 28 | 41 | 700 |
| Каштановые | 27 | 37 | 550 |
| Черноземы | 22 | 36 | 410 |
| Серые лесные | 18 | 27 | 370 |
| Дерново-подзолистые | 15 | 22 | 300 |
| Подзолистые | 9 | 12 | 150 |
| Торфянистые | 6 | 6 | 90 |

Таким образом, радиоактивность почв в основном обусловлена природными радиоизотопами ^{40}K и ^{87}Rb . Радиоизотоп калий-40 накапливается в пищевых продуктах растительного и животного происхождения в разной степени (табл. 11).

Таблица 11 – Содержание ^{40}K в пищевых продуктах

| Продукт | мкг/кг | Продукт | мкг/кг |
|-----------------|--------|----------------|--------|
| Хлеб ржаной | 2420 | Мясо говяжье | 3380 |
| Макароны | 1300 | Сало свиное | 1690 |
| Крупа гречневая | 130 | Рыба | 2620 |
| Рис | 700 | Фрукты сушеные | 3000 |
| Горох | 9070 | Картофель | 4490 |
| Мука пшеничная | 860 | Капуста | 3300 |
| Молоко парное | 1430 | Свекла | 3530 |
| Масло сливочное | 140 | Морковь | 2870 |
| Творог | 3720 | Лук | 1510 |
| Сыр | 890 | Шоколад | 5630 |
| | | Какао | 11110 |

Под влиянием испытаний ядерного оружия и техногенных факторов почвы повсеместно загрязнены искусственными радионуклидами. Например, средняя плотность загрязнения верхних слоев почв северного полушария радиоактивным цезием составляет $0,12 \text{ Ки/км}^2$.

2.2.2.4. Радиоактивность природных вод

Содержание естественных радионуклидов в морских и речных водах показано в таблице 12. По содержанию урана морские воды приближаются к ультраосновным горным породам – *дунитам* и значительно обеднены торием по сравнению с последними.

Радиоактивность речных и озерных вод зависит от источника их питания. Дождевые, снеговые и ледниковые воды содержат небольшое количество солей, поэтому водоемы горных районов высоких широт, имеющие этот источник питания, практически стерильны в отношении естественных радионуклидов.

Природные радионуклиды поступают в открытые водоемы суши в основном с подземными водами. Грунтовые и межпластовые воды, питающая озера и реки, определяют уровни природной радиоактивности воды этих водоемов. Поэтому радиоактивность воды рек и озер подвержена значительным колебаниям. Она напрямую зависит от химического и минерального состава дренируемых ими горных пород, в которых располагаются чаши озер или водосборы рек. К другому важному фактору, влияющему на степень радиоактивности воды открытых водоемов, относится климат, от которого зависит степень химического выветривания горных пород, являющихся основным поставщиком природных радионуклидов.

Наконец, концентрация радиоизотопов в озерах зависит от степени водного обмена. Бессточные озера в районах с засушливым климатом могут быть значительно обогащены радиоактивными элементами за счет сильного испарения застойной воды.

Если исключить реки, дренирующие урановые рудные районы, то можно считать, что речные воды отличаются пониженным относительно морских вод содержанием урана, радия, тория, калия и радона, хотя есть и исключения из этого правила (например, Сыр-Дарья). В таблице приведено содержание урана в некоторых реках, по данным Д.С. Николаева.

Таблица 12 – Содержание урана в воде некоторых рек

| Реки | Содержание урана, мас. % | Реки | Содержание урана, мас. % |
|-------|--------------------------|-----------|--------------------------|
| Рион | 7×10^{-8} | Дунай | $5-30 \times 10^{-8}$ |
| Обь | $5-30 \times 10^{-7}$ | Ока | 1×10^{-7} |
| Волга | $13-17 \times 10^{-8}$ | Кама | $8-15 \times 10^{-8}$ |
| Днепр | $13-17 \times 10^{-8}$ | Енисей | 2×10^{-7} |
| Иртыш | $15-21 \times 10^{-8}$ | Сыр-Дарья | 1×10^{-6} |

В период паводка радиоактивность речной воды снижается, а в межень – повышается. Зимой, когда реки покрываются льдом, наблюдается повышенное содержание в воде радиоактивных газов – радона и торона.

Подземные воды бывают значительно обогащены ураном, радием, торием и радоном по сравнению с поверхностными. Количество радиоактивных элементов в них зависит от вещественного состава вмещающих пород и химизма самих вод. В гидрогеологии принято выделять радоновые, радиевые и урановые воды, в зависимости от преобладания в их составе того или иного радиоактивного элемента. Существуют и смешанные воды: радоно-радиевые, урано-радиевые, радииво-мезотермические. Концентрация радия в подземных водах может достигать $2,5 \times 10^{-11}\%$, а урана – $3 \times 10^{-5}\%$.

Еще в тридцатые годы XX столетия В.Г. Хлопным была замечена повышенная концентрация радия в воде нефтяных месторождений. В настоящее время, в результате интенсивной эксплуатации месторождений углеводородного сырья это приводит к накоплению природных радионуклидов на технологическом оборудовании и трубопроводах нефтяных и газовых месторождений. На отдельных месторождениях мощность экспозиционной дозы от оборудования достигает 6 мР/ч, а удельная активность природных радионуклидов в шламе превышает 10^5 Бк/кг. Следствием этого является неконтролируемое облучение персонала и населения.

2.2.2.5. Радиоактивность атмосферного воздуха

Атмосфера Земли всегда содержит газообразные радиоактивные вещества в виде инертных газов – радона, торона и актинона, источником которых являются эманлирующие горные породы. Радиоактивные эманации, попадая из почвы в атмосферный воздух, затем разносятся горизонтальными и вертикальными воздушными потоками. В свою очередь радиоактивные газы, претерпевая распад, превращаются в твердые радиоизотопы, которые выпадают на поверхность Земли в виде активных осадков.

Актинон и торон не являются долгоживущими. Период полураспада первой эманации равняется всего лишь 3,92 с, а второй – 54,5 с, поэтому они встречаются в небольших количествах лишь в самых нижних слоях атмосферы вблизи земной поверхности. Период полураспада радона более значителен (3,82 сут.), вследствие чего сама эманация и продукты ее распада транспортируются ветром на большие расстояния от места выделения.

Наблюдения показывают, что нижние слои атмосферы над континентами содержат 1-2 атома радона на 1 см³ воздуха. Концентрация торона обычно в 10000 раз меньше. Атмосферный воздух над океаном содержит радона в 100 раз меньше, чем над сушей. Концентрация радона быстро убывает с высотой. Уже на высоте 1 км его количество в 2 раза, а на высоте 4 км – в 14 раз меньше, чем у земной поверхности.

Закономерность распределения продуктов распада радиоактивных эманаций совершенно иная. Многие из твердых радиоизотопов, следующих в естественных радиоактивных рядах за эманациями, почти равномерно распределены в нижних слоях атмосферы. К примеру, концентрация Ra D на уровне земной поверхности и на высоте 10 км почти одинакова.

Твердые радиоактивные частицы, содержащиеся в воздухе, захватываются конденсирующимися каплями воды и выпадают на поверхность Земли с атмосферными осадками. После обильных дождей и снегопада радиоактивность воздуха уменьшается.

Кроме радиоактивных эманации и твердых продуктов их распада в атмосфере присутствуют радиоизотопы, образующиеся под действием космических лучей. К таким радионуклидам относится в первую очередь углерод-14, количество которого в воздухе ничтожно мало.

Вклад отдельных естественных источников в образовании эффективных эквивалентных доз человека представлен в таблице 13.

Таблица 13 – Эффективные эквивалентные дозы человека от природных источников

| Источники радиации | Среднемировые данные | | Россия | |
|-----------------------------------|----------------------|------------|--------------|------------|
| | мЗв/год | % | мЗв/год | % |
| Космическое излучение | 0,355 | 14,8 | 0,320 | 10,9 |
| Гамма-излучение Земли | 0,410 | 17,1 | 0,410 | 14,0 |
| Внутреннее облучение | 0,355 | 14,8 | 0,362 | 12,3 |
| Излучение стройматериалов (радон) | 1,280 | 53,3 | 1,850 | 62,8 |
| ИТОГО | 2,400 | 100 | 2,942 | 100 |

2.3. ИСКУССТВЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКА

За последние десятилетия человек создал несколько сотен искусственных радионуклидов и научился использовать энергию атома в мирных целях: в медицине и для создания ядерного оружия, для производства электроэнергии и обнаружения пожаров, для изготовления светящихся циферблатов часов, приборов ночного видения и для поиска полезных ископаемых.

Индивидуальные дозы, полученные людьми от искусственных источников ионизирующего излучения, сильно различаются, иногда облучение за счет техногенных источников ионизирующих излучений оказывается намного сильнее, чем за счет естественной радиации.

2.3.1. Источники ионизирующих излучений, использующиеся в медицине

Основной вклад в дозу, получаемую человеком от техногенных источников радиации, в настоящее время вносят медицинские процедуры и методы лечения, связанные с применением ионизирующих излучений.

Ориентировочные дозы, которые получают люди при проведении некоторых медицинских процедур, представлены в таблице 14.

Таблица 14 – Ориентировочные значения поглощенной дозы при некоторых медицинских процедурах, сЗв

| Медицинская процедура | Доза |
|--|----------|
| Флюорография легких | 2 |
| Рентгеновский снимок зубов (ортопантография) | 5 |
| Рентгеноскопия органов грудной полости | 10 |
| Рентгеноскопия органов брюшной полости | 15 |
| Лечение злокачественных опухолей | до 5 000 |

Коллективная эффективная доза в год для всего населения Земли оценивается в этом случае величиной 1,6 млн чел.-Зв или около 1/5 дозы от естественного фона. Эта доза по-разному распределяется среди жителей разных стран. Наибольший вклад в коллективную дозу от источников медицинского предназначения вносят диагностические обследования, которым ежегодно подвергаются сотни миллионов людей.

В среднем при медицинских обследованиях на одного жителя Земли в год приходится доза облучения, эквивалентная 0,4 мЗв.

Наиболее распространенным видом излучения, применяемым в диагностической практике, являются рентгеновские лучи. Согласно данным по развитым странам, на каждую 1 000 жителей приходится от 300 до 900 обследований в год. И это не считая рентгенологических обследований зубов и массовой флюорографии. Внедрение технических усовершенствований (компьютерной томографии, использование более чувствительных пленок, электрографии, рационального экранирования и пр.) позволяет резко снизить дозы облучения без уменьшения диагностической и лечебной эффективности процедур.

Радиоизотопы применяются для исследования различных процессов, протекающих в организме, и для локализации опухолей. За последние годы их применение сильно возросло, но все же они используются реже, чем рентгенологические исследования: в промышленно развитых странах на 1 000 населения приходится около 10-40 радиоизотопных исследований. Как это не парадоксально звучит, но одним из наиболее эффективных методов лечения опухолевых заболеваний является лучевая терапия.

2.3.2. Ядерные и термоядерные взрывы

Значительно меньше по сравнению с влиянием естественного фона доза, получаемая от радиоактивных выпадений в результате испытаний ядерного оружия.

2 декабря 1942 года на спортивной площадке Чикагского университета группой физиков-атомщиков под руководством великого итальянского ученого Энрико Ферми был запущен первый *атомный котел*, в котором происходила *самоподдерживающаяся управляемая атомная реакция*.

Этому успеху предшествовали почти полувековые исследования в области теоретической и экспериментальной физики, проводимые под руководством П. Кюри, М. Склодовской-Кюри, Э. Резерфорда, Н. Бора, А. Эйнштейна, М. Планка, Ф. Жолио-Кюри, И. Жолио-Кюри, Л. Мейтнер, О. Гана, Д. Чедвика, В. Гейзенберга, И.В. Курчатова и других выдающихся ученых-атомщиков.

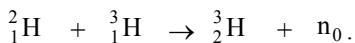
Результаты осуществленной группой Ферми *цепной реакции* были с самого начала поставлены на военные рельсы, а именно – на срочное создание в США атомного оружия с целью опередить Гитлера, физики которого работали в этом же направлении.

В 1944 году в США под руководством Э. Ферми была создана и испытана атомная бомба, а в августе 1945 г. атомной бомбардировке подверглись японские города Хиросима и Нагасаки. Тогда погибла третья часть населения этих городов. В последующие годы многие умирали от лучевой болезни, лейкозов и других недугов, связанных с радиоактивным облучением.

25 декабря 1946 г. под руководством И.В. Курчатова был осуществлен запуск первого советского управляемого уран-графитового реактора, в котором в дальнейшем производился *оружейный плутоний*, использующийся в качестве ядерного заряда вместо урана-235 при производстве атомного оружия (рис. 4). Первая советская атомная бомба была испытана 29 августа 1949 года.

При атомном взрыве образуются *продукты деления* и остается часть неразделившихся атомов урана-235 или плутония-239, которые при наземном взрыве выбрасываются в атмосферу.

Впоследствии в СССР была создана и испытана в 1953 г. водородная бомба, действие которой основано на *термоядерной реакции* взаимодействия дейтерия и трития:



дейтерий тритий гелий нейтрон

Эта реакция протекает мгновенно (3×10^{-6} секунды), но для ее начала необходима очень высокая температура, которую возможно получить лишь при атомном взрыве. Вследствие этого в водородной бомбе, содержащей смесь дейтерия и трития, в качестве детонатора служит атомный плутониевый заряд.

В атомной бомбе происходит неуправляемый процесс деления ядер. Для мирных же целей важен управляемый процесс цепной реакции. Он осуществляется *в ядерных реакторах*, подобных тому, который был сооружен в Чикаго в 1942 году Э. Ферми. В 1946 году был запущен первый советский атомный реактор. Впоследствии были построены атомные котлы различных конструкций для выработки электроэнергии, в исследовательских целях, а также для получения плутония-239 из природного урана-238 и урана-233 и из природного тория-232. Деление урана-235, плутония-239 и особенно термоядерная реакция, выделяют большое количество нейтронов. Последние бомбардируют окружающие вещества, превращая их в радиоактивные (*наведенная радиоактивность*). Кроме того в атмосферу выбрасывается большое количество продуктов деления. Наиболее важные из них – *цезий-137* и *стронций-90*.

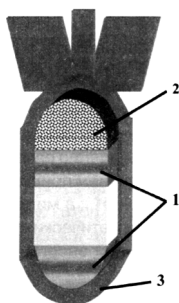


Рис. 4. Схема атомной бомбы:
 1 – заряд урана-235 или плутония-239;
 2 – обычное взрывчатое вещество (запал для соединения кусков урана с целью достижения критической массы); 3 – оболочка из металла большой плотности

Максимум ядерных испытаний пришелся на период с 1954 по 1958 годы, когда взрывы проводили США, СССР и Великобритания. Еще более мощные испытания, в которых участвовали и другие страны (но наиболее сильно США и СССР), проводили в 1961-1962 годах. Всего за период с 1945 по 1998 годы было проведено 2056 ядерных взрывов (табл. 15).

Таблица 15 – Общее количество ядерных взрывов на территории земного шара

| Страна | Год | Число взрывов |
|----------------|------------|---------------|
| США | 1945-1992 | 1030 |
| СССР-Россия | 1949-1991 | 716 |
| Франция | 1960-1997 | 210 |
| Великобритания | 1950-1960 | 44 |
| Китай | 1964-1996 | 45 |
| Индия | 1974, 1998 | 6 |
| Пакистан | 1998 | 5 |

В частности, на территории США было проведено 1030 ядерных взрывов, в том числе в Неваде – 935, Нью-Мексико – 3, Миссисипи – 2, Колорадо – 2, на Аляске – 3 взрыва. На территории России состоялось 214 ядерных взрывов (в том числе на Новой Земле – 132), в Казахстане – 496, на Украине – 2, в Узбекистане – 2 и в Туркменистане – 1 взрыв. На полигоне Лобнор в Китае (штат Синьцзян) провели 45 взрывов, в Алжире – 17, в Австралии – 12. Индия испытывала ядерное оружие 6 раз (на площадке Покхаране), а Пакистан – 5 (горный район Чагаи, провинция Белуджистан). Кроме того, ядерные взрывы проводились на атоллах Муруроа (175) и Энтиветок (43), на островах Рождества (30), Бикини (23), Джонстон (12), Фангатофа (12), Молден (3), в Тихом океане (4) и Южной Атлантике (3).

Высокодисперсные фракции продуктов ядерных взрывов поднимаются в верхние слои атмосферы и годами и даже десятилетиями циркулируют там, распространяясь вначале над своим полушарием, а затем и над всей территорией земного шара, и лишь постепенно выпадают на поверхность Земли. В течение 10 лет, когда испытания проводились наиболее интенсивно, население Земли получило за счет глобальных выпадений дополнительно 2 мЗв (одна годовая доза от естественного фона).

При **атомном взрыве** образуются продукты деления ядерного горючего ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu с образованием сложной смеси из 200 изотопов 36 химических элементов с периодом полураспада от 1 с до млн лет. По характеру излучения все они относятся к бета- и гамма+бета-излучателям, кроме ^{147}Sm и ^{144}Nd – альфа-излучатели. Дополнительным источником радиоактивного загрязнения местности служит также наведенная радиоактивность, возникающая в результате воздействия потока нейтронов, образующихся при цепной реакции деления урана или плутония на ядра атомов различных веществ окружающей среды.

Наибольший практический интерес для радиобиологии представляют следующие радионуклиды: ^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{131}I , ^{137}Cs , ^{140}Ba , ^{144}Ce .

Активность продуктов ядерного деления быстро снижается в первые часы и сутки, например, в первые сутки наблюдается снижение активности в 50 раз.

Таблица 16 – Снижение активности ПЯД с течением времени

| Время, ч | Относительная активность | Время, ч | Относительная активность |
|----------|--------------------------|----------|--------------------------|
| 1 | 1000 | 30 | 17 |
| 1,5 | 610 | 40 | 12 |
| 2 | 440 | 60 | 7,3 |
| 3 | 70 | 100 | 4,3 |
| 5 | 150 | 200 | 1,7 |
| 7 | 97 | 400 | 0,75 |
| 10 | 63 | 600 | 0,46 |
| 15 | 39 | 800 | 0,33 |
| 20 | 27 | 1000 | 0,25 |

Из закона радиоактивного распада выведено правило: каждое десятикратное снижение активности осколков и мощности дозы гамма-излучения происходит в результате увеличения их возраста в 7 раз.

При **термоядерных взрывах** в момент реакции синтеза возникает интенсивный поток нейтронов, вызывающих образование значительного количества продуктов активации – наведенную радиоактивность. Основными источниками загрязнения окружающей среды являются радиоактивные осколки ^{238}U , ^{239}Pu , тритий ^3H и радиоуглерод ^{14}C . В результате проведенных до 1959 года термоядерных взрывов в земной атмосфере образовалось около 560 кг ^{14}C .

Загрязнение окружающей среды зависит от характера взрывов, мощности зарядов, атмосферных условий, географических зон и широт.

При воздушном взрыве РВ распыляются на большой площади, но под влиянием атмосферных осадков, выпавших в момент прохождения радиоактивного облака, может повыситься загрязнение в том или ином районе.

Взрывы средней и малой мощности (до нескольких килотонн тротилового эквивалента) загрязняют в основном тропосферу – на высоте 18 км, мелкие и крупные частицы выпадают на расстоянии нескольких сот километров от эпицентра, образуя **локальные** радиоактивные загрязнения. Крупные взрывы в несколько мегатонн загрязняют, главным образом, стратосферу на высоте 80 км. Воздушными течениями частицы продукты ядерного деления (ПЯД) способны совершать очень большой путь, вплоть до нескольких оборотов вокруг земного шара, образуя в результате выпадения **глобальные загрязнения**. Следует отметить, что продукты взрывов распределяются следующим образом: при воздушном взрыве 99% задерживается в стратосфере; при наземном взрыве 20% попадает в стратосферу, а 80% выпадает в районе взрыва; при взрывах у поверхности моря 30% остается в стратосфере, а 70% выпадает локально. ПЯД могут находиться в тропосфере 2-3 месяца, в стратосфере – 3-9 лет. По данным исследователей, из имеющихся в стратосфере ПЯД ежегодно осаждаются 10% ^{90}Sr и ^{137}Cs .

По данным Научного комитета ООН по действию атомной радиации, при испытаниях ядерного оружия, проводимых до 1963 года, суммарная мощность взорванных боеприпасов и устройств составила 510,9 мегатонн по тротиловому эквиваленту, в т.ч.: при воздушных взрывах – 406,2 Мт, при наземных – 104,7 Мт. Выпадение радионуклидов составило в МКи: ^3H – 360, ^{14}C – 6,2; ^{55}Fe – 50, ^{89}Sr – 2800, ^{90}Sr – 12,2, ^{106}Ru – 330, ^{144}Ce – 182,4, ^{137}Cs – 19,5, ^{239}Pu – 0,32. Расчеты показали, что ожидаемые дозы от радионуклидов, образовавшихся в результате ядерных испытаний, проведенных до 1976 года, составляют для населения умеренного пояса Северного полушария: от внешнего облучения – 110 мрад, от инкорпорированных радионуклидов: для гонад – 37, костного мозга – 150, клеток, выстилающих костную ткань – 180 и для легких – 150 мрад.

2.3.3. Атомная энергетика

В 2001 году в мире работало 430 атомных энергетических установок, производящих около 20% электроэнергии. По количеству атомных электростанций первое место занимает Западная Европа, за которой следуют США и Канада. В России работает 10 атомных электростанций с 30 промышленными реакторами суммарной мощностью 21242 Мвт. Из них 29 реакторов на медленных нейтронах (типа ВВЭР и РБМК) и один реактор на быстрых нейтронах. Для обеспечения этих АЭС ядерным топливом необходимо ежегодно 3600 тонн природного урана. По данным МАГАТЭ (Международное Агентство по атомной энергии) в 1995 г. доля ядерной энергетики в мировом электроснабжении составила 20%. Во Франции и Бельгии АЭС вырабатывают 70-80% электроэнергии, в Швеции-50%, США – 17%, Канаде – 15%, Южной Корее – 53%, на Тайване – 48,5%, в России – 13%.

В 1954 году в Обнинске была введена в строй атомная электростанция (АЭС) мощностью 5 МВт, а в 1956 г. в Англии запущена АЭС мощностью 64 МВт.

Вторая половина XX столетия характеризуется постепенным и неуклонным нарастанием роли электроэнергии, вырабатываемой на атомных электростанциях. Причем отношение к ядерной энергетике в промышленно развитых странах неодинаково и определяется целиком наличием природных ресурсов горючих полезных ископаемых. Атомная энергетика включает в себя урановые рудники, металлургические предприятия по получению обогащенного ядерного топлива, заводы по очистке урановых концентратов и изготовлению ТВЭЛ-ов (тепловыделяющих элементов), предприятия по утилизации ядерных отходов.

На протяжении всей этой технологической цепочки образуются твердые, жидкие, газообразные отходы.

Схема технологической цепочки представлена на рисунке 5.

Принципиальная схема уран-графитового атомного реактора для получения электроэнергии состоит в следующем (рис. 6).

В герметическом цилиндрическом стальном корпусе помещен графит в виде кирпичной кладки. Промежутки кладки заполнены газом гелием для того, чтобы графит во время работы реактора не выгорал. В центральной части графитовой кладки размещены каналы, куда помещается ядерное горючее в виде ТВЭЛ-ов (тепловыводящих элементов). Последние представляют собой трубки из циркониевого сплава, в которые помещены таблетки из окиси урана (UO_2). ТВЭЛ-ы помещаются в виде сборок по 18 трубок в каждой сборке.

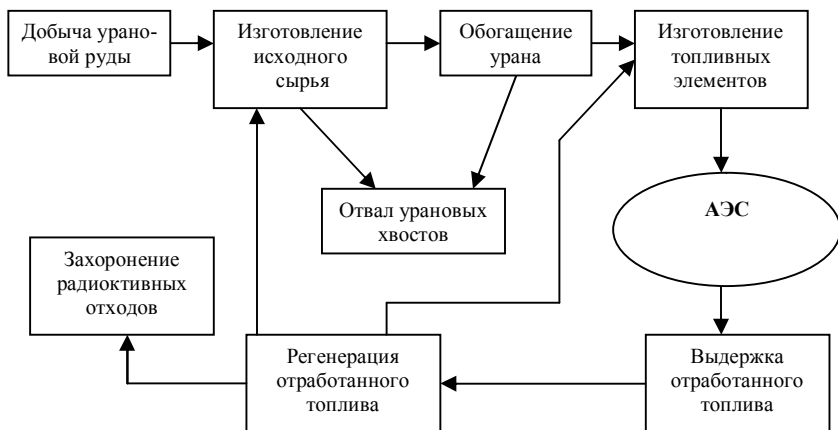


Рис. 5. Основные технологические этапы получения и использования атомной энергии

Урановые стержни омываются *теплоносителем* – проточной водой или жидким натрием, циркулирующим по каналам (радиаторам). Теплоноситель передает тепло в *парогенератор*. Пар из парогенератора под высоким давлением поступает в турбину, которая связана с генератором тока. Отработанный пар собирается в конденсаторе и снова направляется в парогенератор.

Реактор размещается на бетонном основании и окружен для защиты от ядерных излучений метровым слоем воды и бетонной стеной толщиной 3 метра. Объем *активной зоны реактора* около 700 кубических метров.

В первом советском атомном реакторе находилось 550 кг окиси урана, содержание урана-235 в которой искусственно доведено до 5% (против 0,7% в природном уране).

Управление процессом деления происходит с помощью *регулирующих стержней*, сделанных из материалов, хорошо поглощающих нейтроны (кадмий, бор). Когда такой стержень введен в активную зону реактора, цепной процесс деления замедляется, так как избыток нейтронов поглощается указанными элементами. При выдвигании стержня из реактора цепная реакция усиливается, вследствие увеличения количества действующих нейтронов.

При делении ядер урана образуются *быстрые нейтроны*. Большинство же функционирующих в настоящее время атомных котлов ра-

ботают на *медленных* нейтронах. Замедление нейтронов происходит за счет графитовой кладки реактора.

На АЭС с водяным теплоносителем основной источник радиации – это вода первого контура. Расход воды на охлаждение реактора достигает 70-90 м³/с, поэтому система охлаждения представляет собой замкнутый цикл. Тем не менее периодически из системы реактора приходится отводить радиоактивные сточные воды и газы. Они предварительно направляются в систему очистки, где выдерживаются до распада короткоживущих радионуклидов, и только после этого выбрасываются в окружающую среду.

Основную дозу в выбросах составляют продукты деления ядерного горючего: радиоизотопы йода, цезия, стронция, церия, циркония, марганца, железа, а также тритий и радиоактивные газы – радон, ксенон и криптон. Система очистки сточных вод такова, что в водоемы поступает вода с содержанием радиоизотопов, не превышающим допустимый уровень для питьевой воды. При этом радиационное состояние воздушной и водной среды контролируется сетью постов службы дозиметрии. На этих постах производят также отбор проб почвы и растительности.

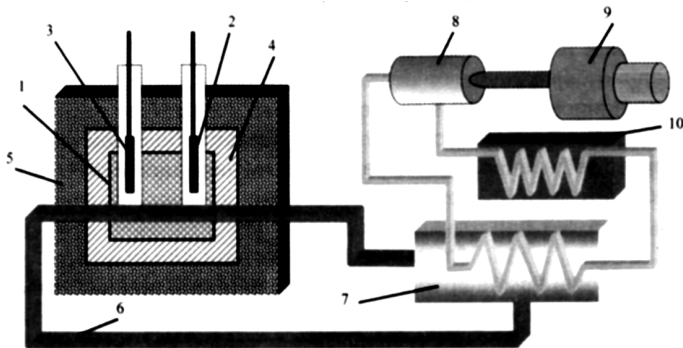


Рис. 6. Принципиальная схема атомной электростанции:

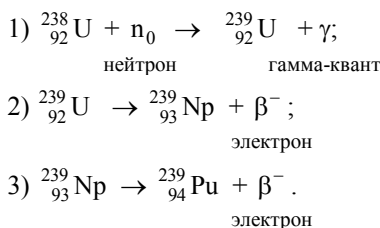
- 1 – ядерное горючее с замедлителем; 2 – аварийные стержни; 3 – регулирующие стержни;
4 – отражатель нейтронов; 5 – бетонная защита от радиации; 6 – теплоноситель;
7 – парогенератор; 8 – паровая турбина; 9 – генератор тока; 10 – конденсатор пара

Таким образом, при отсутствии аварий и хорошей радиационной защите такое производство заметного влияния на окружающую среду не оказывает.

В настоящее время на российских атомных электростанциях применяются реакторы, работающие на медленных нейтронах (типа ВВЭР – водо-водяной энергетический реактор и РБМК – реактор большой мощ-

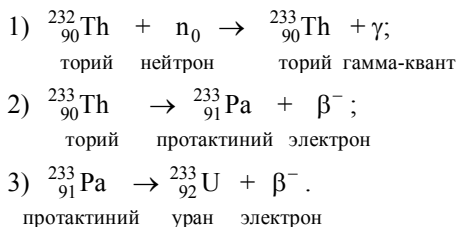
ности канальный). Они предназначены лишь для получения электроэнергии и носят название тепловых. В качестве теплоносителя в них выступает вода.

АЭС на тепловых (медленных) нейтронах имеет недостаток – в них используется обогащенная урановая руда. Это не экономично, поскольку в данном случае ядерное топливо используется не полностью, так как сгорает только уран-235, которого в руде очень мало (около 0,7% от общего объема урана). Поэтому в новых реакторах типа БН в качестве бомбардирующих частиц используются быстрые нейтроны (отсюда и название реактора), с помощью которых из урана-238 (составляющего основную часть ядерного топлива) получают плутоний по следующей схеме:



Реакция идет довольно быстро, поскольку периоды полураспада промежуточных веществ небольшие ($T_{\text{физ. урана-239}} = 23$ мин, а нептуния-239 = 2,33 сут.). Это позволяет вовлечь в топливный цикл весь естественный уран, а не только уран-235. На Белоярской АЭС в качестве третьего блока служит крупнейший в мире реактор на быстрых нейтронах – БН-600. Его тепловая мощность 1470 МВт, а электрическая – 600 МВт.

В атомных реакторах на быстрых нейтронах можно получить еще один вид ядерного горючего – уран-233 при бомбардировке нейтронами природного тория-232:



В реакторах на быстрых нейтронах *теплоносителем* является жидкий натрий, который нагревается до температуры в несколько сотен градусов. В большинстве реакторов этот теплоноситель находится под высоким давлением, что является потенциальной опасностью разгерме-

тизации тепловой системы. Последнее неминуемо приведет к повышению температуры, саморазгону реактора и, в конечном счете, – к аварии. Кроме того, жидкий натрий – взрывоопасный и пожароопасный материал.

Среди множества проблем, связанных с эксплуатацией атомных реакторов, одна из главных – проблема выемки отработанного ядерного топлива. По мере работы реактора масса ядерного горючего в нем уменьшается. Одновременно с этим растет количество осколков отделения ядер урана или плутония, которые начинают мешать нормальному процессу цепной реакции, так как ядра осколков захватывают необходимые для этого нейтроны. По мере «выгорания» ядерного топлива его необходимо заменять новым. Процедура выемки отработанного ядерного горючего из активной зоны реактора непростая. В отличие от безобидных материнских ядер урана и плутония, осколки деления сильно радиоактивны, так как претерпевают бета-распад, сопровождающийся мощным гамма-излучением.

По состоянию на 2002 год в России эксплуатируется 29 ядерных энергоблоков общей установленной мощностью 21,2 Гвт (табл. 17), в т.ч.:

- водо-водяные (ВВЭР) – 13;
- канальные (РБМК-1) – 11;
- водо-графитовые (ЭГП) – 4;
- на быстрых нейтронах (БН-60) – 1.

В современный период достраиваются 5 энергоблоков:

- водо-водяные (ВВЭР) – 4 (Ростовская, Калининская, Балаковская АЭС);
- канальные (РБМК-1) – 1 (Курская АЭС).

Несмотря на высокую настороженность общественности и правительства ряда стран (США, Швеция), атомная энергетика имеет устойчивую тенденцию к развитию: в 1984 году в мире насчитывалось 345 атомных энергоблоков, в 1986 году – 417, в 1988 году – 426, в 1994 году – около 500. В настоящее время 17% всей электроэнергии в мире вырабатывается на АЭС, а в ряде стран, таких как Бельгия и Франция, эта доля достигает 50-75%.

Работа АЭС требует добычи урановой руды, ее переработки в обогащенное ураном-235 ядерное топливо, производства тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ-ов), переработки отработанного топлива для последующего использования извлеченного делящегося материала, переработки и захоронения образующихся радиоактивных отходов. Перечисленные стадии входят в так называемый ядерный топливный цикл. К ним добавляется также транспортировка радиоактивных материалов для обеспечения всех этих стадий.

Таблица 17 – Атомные электростанции России

| Наименование атомных станций | Электрическая мощность, МВт | Количество и тип реактора |
|--|-----------------------------|--------------------------------------|
| <i>1. Действующие АЭС</i> | | |
| 1. Кольская АЭС | 1 760 | 2 × ВВЭР-440/230 2 × ВВЭР-440/213 |
| 2. Ленинградская АЭС | 4 000 | 4 × РБМК-1000** |
| 3. Калининская АЭС | 2 000 | 2 × ВВЭР-1000 |
| 4. Смоленская АЭС | 3 000 | 3 × РБМК-1000 |
| 5. Курская АЭС | 4 000 | 4 × РБМК |
| 6. Нововоронежская АЭС | 1 834 | 2 × ВВЭР-440/320* 1 × ВВЭР-1000 |
| 7. Балаковская АЭС | 3 000 | 3 × ВВЭР-1000 |
| 8. Белоярская АЭС | 600 | 1 × БН-600 |
| 9. Билибинская АЭС | 48 | 4 × ЭГП-6 |
| 10. Ростовская АЭС (2001 г.) | 2 000 | 2 × ВВЭР-100 |
| Итого: | 22 242 | × |
| <i>2. Строящиеся, законсервированные и проектируемые АЭС</i> | | |
| 11. Южно-Уральская АЭС | 2 400 | 3 × БН-800 |
| 12. Воронежская АЭС | 1 000 | 2 × АСТ-500М |
| 13. Томская АЭС | 1 000 | 2 × АСТ-500М |
| 14. Хабаровская АЭС | 1 000 | 2 × АСТ-500М |
| 15. Костромская АЭС | 2 400 | 4 × ВПБЭР-600 |
| 16. Дальневосточная АЭС | 1 200 | 2 × НП-500 |
| 17. Приморская АЭС | 1 200 | 2 × ВПБЭР-600 |
| 18. Блок на Ленинградской АЭС | 630 | 1 × НП-500 |
| 19. Блоки на Кольской АЭС | 1 900 | 3 × НП-500 |
| 20. Блок на Калининской АЭС | 1 000 | 1 × ВВЭР-320 |
| 21. Блок на Курской АЭС | 1 000 | 1 × РБМК-1000 |
| 22. Блок на Белоярской АЭС | 800 | 1 × БН-800 |
| 23. Блок на Балаковской АЭС | 1 000 | 1 × ВВЭР-1000 |
| Итого: | 17 330 | × |
| Всего: | 37 572 | × |

Примечания. АСТ – атомная станция теплоснабжения; ВВЭР – водо-водяной энергетический реактор; РБМК – реактор большой мощности канальный; БН – реактор на быстрых нейтронах; ЭГП – реактор энергетический графитовый паровой; ВПБЭР – водяной повышенной безопасности энергетический реактор;

* оба первого поколения;

** в том числе два реактора первого поколения.

При нормальной работе реакторов постоянно накапливаются радиоактивные отходы. Источником жидких отходов может быть вода или растворы, применяемые для охлаждения реактора, а также растворы, образующиеся при дезактивации оборудования и помещений. Кроме того, при работе реактора могут накапливаться и газообразные, и твердые радиоактивные вещества. Все эти отходы после концентрирования подвергаются захоронению в специальных могильниках, а вода, сливаемая в канализацию, – предварительной очистке в отстойниках и специальных очистных сооружениях.

Несмотря на то, что радиационная опасность эксплуатации объектов атомной энергетики существенно преувеличивается, благодаря разработке всесторонней системы обеспечения радиационной безопасности атомная промышленность и энергетика во всем мире относятся к отраслям деятельности человека с малой опасностью для жизни. Так, по данным НКДАР ООН, за период с 1945 по 1992 годы вклад ядерной энергетики в формирование коллективной эффективной дозы облучения населения всего земного шара составил 2,4 млн чел.-Зв, а дополнительный вклад тяжелых радиационных аварий – 0,6 млн чел.-Зв, то есть почти в 1100 раз меньше, чем вклад облучения от источников естественного фона (табл. 18).

Таблица 18 – Коллективная эффективная доза облучения населения за период с 1945 по 1992 годы

| Источник облучения | Коллективная эффективная доза, млн чел.-Зв |
|-----------------------------|--|
| Естественные источники | 650 |
| Медицинское облучение: | |
| – диагностика | 90 |
| – терапевтические процедуры | 75 |
| Испытания ядерного оружия | 30 |
| Ядерная энергетика | 2,4 |
| Радиационные аварии | 0,6 |
| Профессиональное облучение | 0,6 |

После 1992 года данные вследствие аварии на Чернобыльской АЭС несколько изменились, они представлены в таблице 19.

Таблица 19 – Эффективные эквивалентные дозы человека от искусственных источников

| Источники радиации | Среднемировые данные | | Россия | |
|----------------------------|----------------------|------|---------|-----|
| | мЗв/год | % | мЗв/год | % |
| Рентгенодиагностика | 1,000 | 93,5 | 1,200 | 94 |
| Радионуклидная диагностика | 0,050 | 4,7 | 0,030 | 2,3 |
| Испытание ядерного оружия | 0,015 | 1,4 | 0,020 | 1,6 |
| Ядерная энергетика | – | – | – | – |
| Последствия аварии в ЧАЭС | – | – | 0,030 | 2,3 |
| Профессиональное облучение | 0,004 | 0,4 | 0,003 | 0,2 |
| ИТОГО | 1,069 | 100 | 1,283 | 100 |

Вопрос о широком использовании альтернативных источников весьма спорный, поскольку одни источники не в состоянии обеспечить промышленность и транспорт достаточным количеством энергии (ветровые установки), другие – даже более опасны, нежели атомная энергетика (например, геотермальные воды всегда являются высокорadioактивными). С другой стороны, попытки заменить атомную энергетiku старыми традиционными источниками (уголь, нефть, газ) приводят к необходимости добывать дополнительно только угля 630 млн тонн. Кроме того, выработка аналогичного количества энергии старыми методами приведет к дополнительному выбросу в атмосферу 2 млрд т диоксида углерода, 30 млн т оксида азота, 4 млн т летучей золы, 70 тыс. т альдегидов и углеводов, 12,2 тыс. т оксида углерода. Все это в течение 50-100 лет привело бы к повышению температуры воздуха на Земле на 3-8°C вследствие парникового эффекта, вызванного загрязнением атмосферы.

Следует, однако, заметить, что и эксплуатация АЭС сопряжена с определенной степенью социального, экономического и экологического риска, а также риска ухудшения здоровья людей вследствие возникновения крупных радиационных аварий.

В таблице 20 приведены характеристики основных поступлений искусственных радионуклидов в атмосферу с 1946 по 1986 год.

Таблица 20 – Основные источники поступления искусственных радионуклидов в атмосферу с 1946 по 1986 год

| Источник поступления | Суммарная активность, $\times 10^{16}$ Бк | Ареал распространения, км ² |
|---|---|--|
| Испытания атомного оружия в атмосфере | 181 060 | 510×10^{16} |
| Авария на Чернобыльской АЭС, 1986 г. | 185 | 250×10^6 |
| Технологический сброс отходов в проточный водоем р. Теча, 1950 г. | 10,2 | 2×10^2 |
| Авария в районе г. Кыштым, 1957 г. | 7,4 | 23×10^3 |
| Пожар на заводе в г. Уиндскейле (Великобритания), 1957 г. | 1,1 | 3×10^2 |
| Ветровой выброс из поймы озера Карачай, 1967 г. | 0,003 | 2×10^2 |

2.3.3.1. Экологические проблемы, возникающие в условиях нештатной (аварийной) работы радиационно-опасных объектов

Шкала радиационной опасности МАГАТЭ (1989 г., внедрение в России с 1990 г.) включает пять уровней опасности работы атомных электростанций:

- 1 уровень – незначительные происшествия на АЭС;
 - происшествия средней тяжести;
 - серьезные происшествия;
 (первые 3 происшествия, инциденты);
 - 2 – аварии в пределах АЭС;
 - 3 – аварии с риском для окружающей среды;
 - 4 – тяжелые аварии;
 - 5 – глобальная авария (катастрофа);
- (последние три – аварии).

На территориях, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате аварий на объектах предприятий ядерного топливного цикла, эффективная доза облучения людей определяется преимущественно поступившими в окружающую среду долгоживущими радионуклидами. Поэтому целесообразно радиоэкологические проблемы таких территорий рассматривать отдельно от радиоэкологических проблем, актуальных в условиях штатной работы объектов ядерной энергетики.

В результате аварии на ядерной энергетической установке возможно образование больших очагов радиоактивного загрязнения не только на

территории предприятия, но и за пределами его санитарно-защитной зоны. В зависимости от мощности реактора, продолжительности радиоактивного выброса, особенностей метеорологической обстановки в момент аварии, очаг радиоактивного загрязнения может захватить территорию целого региона или даже выйти за национальные границы. Степень радиационной опасности для населения при аварии определяется количеством и радионуклидным составом выброшенных в окружающую среду радиоактивных веществ, расстоянием от источника радиоактивного выброса до населенных пунктов, характером их застройки и плотностью населения, метеорологическими условиями во время аварии, сезоном года, характером сельскохозяйственного использования территории, водоснабжения и питания населения.

Радиационная авария происходит при нарушении пределов безопасной эксплуатации АЭС и другого оборудования с выходом радионуклидов за предусмотренные границы в количествах, превышающих значения, установленные для нормальной эксплуатации. Нормы радиационной безопасности 1999 г. (НРБ-99) определяют *радиационную аварию как потерю управления источником ионизирующего излучения, вызванную неисправностью оборудования, неправильными действиями работников (персонала), стихийными бедствиями или иными причинами, которые могли привести или привели к облучению людей выше установленных норм или радиоактивному загрязнению окружающей среды.*

Хотя нет международного соглашения по критериальным значениям риска, вероятность возникновения радиационных аварий, по данным различных авторов, в настоящее время оценивается как 10^{-5} - 10^{-7} случаев на 1 реактор в год. Причем вероятность аварии с разрушением активной зоны составляет 5×10^{-6} случаев на 1 реактор в год, а с разрушением защитной оболочки и выбросом радиоактивных продуктов деления в 6 раз реже: $0,8 \times 10^{-6}$ случаев на 1 реактор в год. Учитывая, что мировой опыт использования атомной энергии составляет 4600 реакторов-лет за 40-50 лет их эксплуатации, развитие серьезных радиационных аварий, по различным расчетам, следует ожидать каждые 50-3000 лет. При этом число людей, пострадавших при радиационных авариях, может быть различным, в том числе, как показал опыт аварии на ЧАЭС, и очень большим. К настоящему времени накоплен большой опыт эксплуатации АЭС в условиях радиационной безопасности. К сожалению, имеется также немалое количество радиационных аварий и опыт ликвидации их последствий.

С 1944 по 1986 годы в мире произошло 296 аварийных радиационных ситуаций, связанных с выбросом радиоактивных веществ и облуче-

нием людей. Самые крупные из них были в Северной Англии (Уиндскейл, 1957), в США (Три-Майл-Айленд, 1979) и в Бразилии (Гайана, 1982). Последствия радиационных инцидентов испытал 1371 человек, облучились в высоких дозах 633 человека, погибли 37 человек. Из 296 зарегистрированных аварийных ситуаций только 8 приходятся на АЭС, 209 – на различные атомные установки, 69 – на работу с радионуклидами, 10 – на исследовательские сборки (кроме аварии на корабельных атомных энергетических установках).

Первой серьезной радиационной аварией считается произошедший в 1952 году в Чолк-Риверской ядерной лаборатории (Канада) инцидент на исследовательском реакторе. К счастью, радиоактивных веществ в окружающую среду выделилось мало, а летальных исходов не было.

В 1953 году в Арагонской национальной лаборатории (США) экспериментальный реактор был доведен до сверхкритического состояния. Температура резко повысилась, ТВЭЛ-ы расплавились, произошло бурное парообразование из-за соприкосновения воды замедлителя с раскаленным металлом. В результате произошел выброс продуктов деления в окружающую среду. Радиоактивные вещества были разбросаны на значительные расстояния, и возникла опасность радиационного поражения населения.

В октябре 1957 года произошел пожар в активной зоне ядерного реактора на АЭС в Уиндскейле (Англия). Это привело к неконтролируемому выходу радиоактивных веществ, преимущественно йода, в атмосферу. Существенно загрязненной оказалась территория размером 20 км × 25 км, мощность дозы на которой составила около 85 мР/ч. Впоследствии загрязнение было обнаружено в Англии, Уэльсе и некоторых районах Северной Европы. Радиоактивный йод-131 был основным радионуклидом, формировавшим дозу в щитовидной железе и большую часть эффективной дозы. Существенный вклад в дозу внесли также полоний-210 и цезий-137. В результате этой аварии 13 человек погибли, а 260 человек получили лучевые поражения различной степени тяжести.

В 1961 году в штате Айдахо (США) произошла авария на испытательной установке экспериментального реактора. Радиоактивных веществ выделилось мало, но имелось два летальных исхода.

В 1970 году произошла авария на АЭС Индиан-Поинт-1. В трубе бойлера образовалась течь, сквозь которую радиоактивные отходы попадали в окружающую среду. Скорость их утечки составляла 20 л/ч. Прокуратура штата Нью-Йорк потребовала возмещения ущерба в размере 5 млн долл. за нарушение экологического баланса р. Гудзон, в результате которого дважды в течение зимы 1969-1970 годов происходила массовая гибель рыбы.

В декабре 1970 года на АЭС в г. Сакстоне произошла радиационная авария, в результате которой в течение 72 мин в окружающую среду было выброшено $7,289 \times 10^{11}$ Бк (19,7 Ки) радиоактивных газов. Максимальная концентрация ксенона-133 и ксенона-135 составила $43,66$ Бк/м³ (1,2 нКи/м³).

В марте 1979 года произошла авария на энергетическом реакторе PWR (ВВЭР) АЭС в Три-Майл-Айленде (США, штат Пенсильвания). Она квалифицировалась как одна из наихудших на протяжении 22-летней истории ядерной энергетики США. Основными причинами аварии были неисправности питающих водяных насосов и систем контроля, ошибки оператора в управлении системой аварийного охлаждения. Произошло расплавление оболочек почти у 50% ТВЭЛ-ов и около 70% продуктов деления, накопленных в активной зоне реактора, перешло в теплоноситель первого контура. В результате мощность экспозиционной дозы внутри корпуса, в котором заключены реактор и система охлаждения первого контура, достигла 80 Р/ч, а во вспомогательных помещениях – 10 Р/ч. Однако система герметизации и очистки послужила барьером, который воспрепятствовал выходу в окружающую среду значительных количеств радиоактивных веществ, представляющих опасность для населения. Кроме того, произошло два выброса в атмосферу, в результате которых в окружающую среду было выделено около $9,25 \times 10^{10}$ МБк (2,5 МКи) радиоактивных благородных газов и $5,55 \times 10^{11}$ Бк (15,6 Ки) радиоактивного йода. В результате этой аварии средняя индивидуальная доза, полученная населением, проживающем на расстоянии 7,5; 13 и 80 км, за весь период аварии составила 0,84; 0,71 и 0,01 мЗв (84, 71 и 1 мбэр), соответственно, и ни у кого не превысила 1 мЗв (100 мбэр). Средняя доза, полученная населением, была равна 0,02 мЗв (2 мбэр) при годовом пределе дозы для этой категории – 5 мЗв (500 мбэр). Проверка на счетчике излучений 721 человека из населения, проживающего в пределах 5-километровой зоны, не подтвердила инкорпорирования радионуклидов в организм этих лиц. Таким образом, даже вблизи АЭС не была превышена доза облучения, обусловленная естественным радиационным фоном (2,23 мЗв). Аварию локализовали в течение 1,5 сут., однако почти 1,5 млн человек на несколько суток покинули свое жилье, 1 человек погиб и около 100 было госпитализировано.

На территории бывшего СССР только за последние пятьдесят лет произошло 176 радиационных инцидентов, в результате которых у 568 человек развились разнообразные формы лучевой патологии, а у 344 человек была диагностирована острая лучевая болезнь.

Наиболее крупной радиационной аварией в истории человечества стала авария на Чернобыльской АЭС. По данным различных авторов, число людей, испытавших последствия аварии на Чернобыльской АЭС, составило от 130 до 250 тыс. человек, подверглись отселению 116 тыс. человек, в дозах выше фоновых облучились 24,2 тыс. человек, заболели острой лучевой болезнью 134 человека, а еще 28 человек погибли. В работах по ликвидации последствий Чернобыльской катастрофы принимало участие около 240 тыс. человек, а радиоактивному загрязнению, превышающему уровень 5 Ки/км^2 , подверглась территория площадью около 25000 км^2 с населением более 5 млн человек. Хронология этой аварии представлена ниже.

В момент теплового взрыва реактора на Чернобыльской АЭС произошел выброс диспергированного ядерного топлива из разрушенного реактора на высоту примерно несколько больше 1 км. Наиболее мощная струя газообразных и аэрозольных радиоактивных продуктов наблюдалась в течение первых 2-3 сут. после аварии в северном направлении, где уровень радиации на удалении 5-10 км от места аварии на высоте 200 м достигал 27 апреля 1000 мР/ч и 28 апреля 500 мР/ч . Активность вынесенных из реактора продуктов деления без радиоактивных инертных газов на 26 апреля составила $7,4 \times 10^2 - 8 \times 10^2 \text{ ПБк}$ (20-22 МКи), а на 6 мая – $4,4 \times 10^2 \text{ ПБк}$ (12 МКи). Для локализации очага аварии, предотвращения концентрирования расплавленного топлива (и создания тем самым потенциальных условий для протекания цепной реакции) с вертолетов начали забрасывать шахту реактора нейтронопоглощающими, теплоотводящими и фильтрующими материалами – соединениями бора, доломитом, свинцом, песком, глиной. В результате принятых мер, способствующих снижению интенсивности горения графита, мощность выброса начала уменьшаться и к 2 мая упала до $1,5 \times 10^2 \text{ ПБк/сут.}$ (4,0 МКи).

После 2 мая вынос радиоактивных продуктов из аварийного реактора начал нарастать и 3 и 5 мая достиг $1,9 \times 10^3$ и $3,0 \times 10^3 \text{ ПБк}$ (5,0 и 8,0 МКи) в сут. соответственно. Этот подъем выброса объясняется интенсивным тепловыделением из-за разогрева ядерного топлива до температуры примерно $1700 \text{ }^\circ\text{C}$ в связи с отсутствием отвода тепла от топлива и графитовой кладки. Благодаря экстренным мерам по охлаждению топлива, графитовой кладки и образованию более тугоплавких соединений, 6 мая выброс радиоактивных продуктов резко снизился и составил $3,7 \text{ ПБк}$ (0,1 МКи). К 9 мая он уменьшился еще на один порядок, а к концу месяца практически завершился, снизившись до $0,74 \text{ ГБк}$ (20 Ки) в сутки.

Состав радионуклидов в аварийном выбросе примерно соответствовал их составу, накопленному в активной зоне реактора за кампанию, и отличался от него повышенным содержанием летучих продуктов деления – йода, цезия, инертных газов и в некоторой степени рутения.

Радиационная обстановка в г. Припять в течение всего дня 26 апреля была достаточно спокойной. Это было обусловлено тем, что в момент аварии и во время последовавшего за этим пожара ветер сносил радиоактивные продукты мимо города. Тем не менее были приняты меры по снижению возможного облучения. В частности, было рекомендовано сократить время пребывания людей вне помещений, не открывать окна. Занятия на открытом воздухе в школах и детских учреждениях были запрещены. Врачи организовали подворный обход и обеспечили население препаратами для профилактики инкорпорации радиоактивных изотопов йода. К сожалению, в выполнении этих защитных мероприятий не было должной организованности и настойчивости.

В последующем, когда высота подъема выбрасывания продуктов из аварийного реактора существенно снизилась в результате флюктуации ветра в приземном слое воздуха, радиоактивный факел в некоторые интервалы времени захватывал территорию города, радиационная обстановка 27 апреля стала резко ухудшаться. В результате было принято решение о немедленной эвакуации населения г. Припять.

Суммарный выброс продуктов деления за пределы промплощадки (без радиоактивных инертных газов) составил около $1,9 \times 10^{18}$ Бк (50 МКи), что соответствует примерно 3,5% общего количества радионуклидов, накопленных в реакторе на момент аварии. Это привело к значительному радиоактивному загрязнению территорий, прилегающих к АЭС, и потребовало принятия чрезвычайных решений по эвакуации населения из ряда населенных пунктов, ограничения хозяйственного использования земель.

На первом этапе обеспечения радиационной безопасности населения особое внимание было обращено на г. Припять, расположенный в 3 км от АЭС, где проживало около 50 тыс. человек, и на близлежащие населенные пункты. Масштаб и объем радиационного контроля для получения основополагающей информации в целях проведения защитных мероприятий с течением времени возросли.

Первоочередными и важнейшими задачами радиационного контроля являлись:

– оценка возможного уровня внешнего и внутреннего облучения персонала ЧАЭС, жителей г. Припять и эвакуированного затем из 30-

километровой зоны населения в целях выявления лиц, нуждающихся в медицинской помощи;

- прогностическая оценка возможных уровней облучения населения, проживающего в районах повышенного радиоактивного загрязнения, – вне 30-километровой зоны для принятия решения о необходимости дополнительной, полной или частичной эвакуации и разработки соответствующих временных рекомендаций по режиму питания и жизнедеятельности населения в данном регионе;

- исключение распространения контактным путем радиоактивных веществ из загрязненных районов, а также употребления пищевых продуктов с содержанием радионуклидов выше регламентированных пределов.

Для решения этих задач осуществлялся систематический контроль:

- уровня гамма-излучения на всей территории европейской части СССР методами воздушной и наземной радиационной разведки;

- концентрации и радионуклидного состава радиоактивных веществ в воздухе в различных точках 30-километровой зоны, преимущественно в местах проведения работ по ликвидации последствий аварии и дислокации персонала, а также вне ее зоны в населенных пунктах, где наблюдались повышенные уровни радиации;

- плотности радиоактивного загрязнения почвы и растительности и его радионуклидный состав;

- содержания радионуклидов в пищевых продуктах, воде водоемов, в первую очередь питьевого водоснабжения;

- уровней радиоактивного загрязнения спецодежды или личной одежды и обуви, наружных и внутренних поверхностей транспортных средств на границах контролируемых зон (устанавливаемых исходя из характера работ и сложившейся радиационной обстановки), в аэропортах, на железнодорожных и автовокзалах.

В частности, были введены три контролируемые зоны: особая (в основном территория промплощадки), 10- и 30-километровая. В этих зонах был организован строгий дозиметрический контроль, а также возвращены пункты дезактивации транспорта и санитарной обработки личного состава. На границах была организована пересадка людей из одних транспортных средств в другие для уменьшения контактного переноса радиоактивных веществ.

10 мая была составлена карта мощности доз, на основании которой установили зоны радиоактивного загрязнения:

- зона постоянного отселения (зона отчуждения) – территория, ограниченная изодозной линией 20 мР/ч на 15-й день после аварии

(«Д + 15»). В пределах этой территории дозы облучения за первый год превышали 0,1 Гр.

– зона временного отселения (зона эвакуации) – территория, расположенная между изодозными линиями 20 и 5 мР/ч на «Д + 15». Не исключалось возвращение населения в эту зону по мере нормализации радиационной обстановки. Прогноз годовых поглощенных доз за счет внешнего гамма-облучения составил 0,06-0,24 Гр.

– зона жесткого радиационного контроля – ее территория определялась между изодозными линиями 5 и 2 мР/ч на «Д + 15». Население этой зоны не эвакуировалось. Исключение составляли дети и беременные женщины, которые в организованном порядке были вывезены на летний оздоровительный отдых до 2-3 месяцев. В этой зоне вводился систематический дозиметрический контроль объектов внешней среды, пищевых продуктов, воды и фуража. Для сельского населения годовая доза не превышала 60 мЗв. В мае 1986 года для населения была установлена временная предельная суммарная годовая доза внешнего и внутреннего облучения на первый год после аварии – 100 мЗв. В дальнейшем НКРЗ на последующие годы ежегодно ужесточала пределы: на 1987 год – 30 мЗв, на 1988-1989 годы – по 25 мЗв. В целом за 44 мес. после аварии сумма регламентов составила 173 мЗв.

В конце 1987 – начале 1988 годов была изучена радиационная обстановка на обширной территории СССР и выявлена значительная неравномерность радионуклидных выпадений, в связи с чем возник вопрос о дальнейшей регламентации облучения населения. НКРЗ было выработано предложение об установлении дозы за 70 лет, равной 350 мЗв с учетом уже накопленной до 1 января 1990 года дозы облучения. Недостижение этого порога обуславливало снятие всех ограничений для нормальной жизнедеятельности населения, а в случаях превышения этой величины было рекомендовано отселение людей, начиная с 1990 года. Причем эта доза рассчитывалась для самых критических групп населения (лица, родившиеся в 1986 году, полеводы, лесники). Эти и другие ограничения обеспечивали реально прогнозируемую индивидуальную дозу облучения людей порядка 100-170 мЗв за жизнь.

В апреле 1990 года в попытке отойти от концепций, связанных с пределами доз, Верховный Совет СССР ввел концепцию поверхностного загрязнения в качестве критерия для переселения и для улучшения условий жизни людей. В местах, где уровень поверхностного загрязнения превышал 40 Ки/км² (1480 кБк/м²) предусматривалась зона обязательного отселения, при 15-40 Ки/км² (555-1480 кБк/м²) – зона переселения по желанию, кроме детей и беременных женщин, для ко-

торых переселение обязательно. В районах с загрязнением от 1 до 15 Ки/км² (37-555 кБк/м²) переселение не предусматривалось, выплачивалась только денежная компенсация.

В апреле 1991 года правительством была утверждена «Концепция проживания населения в районах, пострадавших от аварии на Чернобыльской АЭС». В соответствии с ней на всех территориях, подвергшихся радиоактивному загрязнению, устанавливался минимальный уровень вмешательства, равный 1 мЗв средней годовой индивидуальной эффективной эквивалентной дозы облучения, и вводился верхний уровень – 5 мЗв за год. Непревышение нижнего уровня обеспечивало условия проживания без каких-либо ограничений. В указанном интервале годовых мощностей доз осуществлялись защитные мероприятия (улучшенное медицинское обслуживание, обеспечение полноценным питанием, достоверная информация, компенсации, льготы и др.), а жители имели право на добровольное переселение из этих зон.

Официально установлено, что на территории более 131 тыс. км² уровень загрязнения поверхности по цезию-137 превышал 1 Ки/км², а на территории в 25 тыс. км² превышал 5 Ки/км². Из этой площади примерно 14600 км² расположены в Беларуси, 8100 км² – в России, 2100 км² – на Украине.

Все вышесказанное позволяет сделать вывод о том, что неблагоприятные экологические последствия антропогенного загрязнения окружающей среды источниками ионизирующих излучений связаны главным образом с возникновением радиационных аварий, сопровождающихся значительными выбросами долгоживущих радионуклидов. Повышение надежности функционирования объектов ядерной энергетики и предприятий ядерного топливного цикла представляется основным резервом радиационной безопасности в глобальном масштабе. Следует учитывать и то, что даже несмотря на, казалось бы, большое количество аварий, атомная энергетика во всем мире относится к отраслям деятельности человека с малой опасностью для жизни.

Существующие на 2003 год последствия и прогнозируемые нарушения на будущее представлены на рисунке 7.

Детерминированные эффекты (лат. *determinare* – обуславливать) обуславливаются гибелью большого числа клеток критических органов – костного мозга, кишечника, семенников, кожи. Все детерминированные эффекты пороговые. Они обязательно возникают при достижении пороговой дозы (не менее 0,25 Гр) и с ее ростом увеличиваются, так как увеличивается число погибших клеток.

Таблица 21 – Площадь территории субъектов Российской Федерации, загрязненных вследствие Чернобыльской катастрофы

| Область, республика | Площадь области, республики, км ² | Площадь загрязнения по цезию-137, км ² | | | |
|---------------------|--|---|-------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| | | 1-5 Ки/км ² | 5-15 Ки/км ² | 15-40 Ки/км ² | более 40 Ки/км ² |
| Белгородская | 27 100 | 1 620 | – | – | – |
| Брянская | 34 900 | 6 750 | 2 628 | 2 130 | 310 |
| Воронежская | 52 400 | 1 320 | – | – | – |
| Калужская | 29 900 | 3 500 | 1 419 | – | – |
| Курская | 29 800 | 1 220 | – | – | – |
| Ленинградская | 85 900 | 850 | – | – | – |
| Липецкая | 24 100 | 1 690 | – | – | – |
| Нижегородская | 74 800 | 250 | – | – | – |
| Орловская | 24 700 | 8 840 | 132 | – | – |
| Пензенская | 43 200 | 4 130 | – | – | – |
| Рязанская | 39 600 | 5 320 | – | – | – |
| Саратовская | 100 200 | 150 | – | – | – |
| Смоленская | 49 800 | 100 | – | – | – |
| Тамбовская | 34 300 | 510 | – | – | – |
| Тульская | 70 000 | 10 320 | 1 271 | – | – |
| Ульяновская | 37 300 | 1 100 | – | – | – |
| Мордовия | 36 200 | 1 900 | – | – | – |
| Татарстан | 68 000 | 110 | – | – | – |
| Чувашия | 18 000 | 80 | – | – | – |
| Всего | 49 760 | 54 500 | 2 130 | 310 | – |

Для возникновения отдаленных последствий может оказаться достаточным изменение одной клетки. Теоретически они не имеют порога, отсюда и их название стохастические, т.е. вероятностные, случайные эффекты. Если такие изменения происходят в соматических клетках облученных организмов, то со временем может возникнуть лейкоз или рак. Если изменениям подвергаются половые клетки, можно ожидать развития наследственных заболеваний или врожденных уродств у потомства.

Облучение плода чревато возникновением тератогенных эффектов, проявляющихся в виде врожденных уродств или других аномалий развития.



Рис. 7. Общая схема возможных медицинских последствий на примере Чернобыльской аварии

В таблице 22 представлена характеристика наиболее значимых радионуклидов, образующихся и выпадающих в результате радиационных аварий.

Таблица 22 – Характеристика наиболее значимых радионуклидов глобальных выпадений

| Нуклид | Период полураспада | Основной вид облучения | Критический орган | $T_{\text{биол.}} \text{ сутки}$ | Резорбция из ЖКТ | $E_{\text{эфф.}}$ МэВ/рас. |
|-------------------|--------------------|------------------------|-------------------|----------------------------------|------------------|----------------------------|
| ^3H | 12,34 года | внутренний | все тело | 12 | 100 | 0,01 |
| ^{14}C | 5 730 лет | – « – | жировая ткань | 10 | 100 | 0,054 |
| ^{89}Sr | 51 сут. | – « – | кость | $1,8 \times 10^4$ | 9 | 0,56 |
| ^{90}Sr | 28,8 года | – « – | – « – | $1,8 \times 10^5$ | 9 | 1,13 |
| ^{131}I | 8,06 сут. | внешний и внутренний | щитов. железа | 10,4 | 100 | |
| ^{137}Cs | 30 лет | – « – | все тело | 70 | 100 | 0,59 |
| ^{239}Pu | $2,44 \times 10^4$ | внутренний | кость | $7,3 \times 10^4$ | $2,410^{-3}$ | 270 |

2.3.3.2. Добыча и переработка радиоактивного минерального сырья

Извлечение и переработка радиоактивных руд производится предприятиями Министерства атомной энергии Российской Федерации. Из всего уранопроизводящего комплекса добыча и переработка урановых руд дает самый большой объем радиоактивных отходов, которые по физическому состоянию подразделяются на твердые и жидкие. Специфическая особенность уранового и ториевого производства – наличие во всех видах отходов радионуклидов с большим периодом полураспада. Обычно промышленное содержание урана в рудах находится в интервале 0,02-0,03%. Руды с меньшей концентрацией этого радиоактивного элемента считаются *забалансовыми*. «Пустые» породы содержат тысячные доли процента урана. Последние две категории минерального вещества, как и сами *балансовые руды*, относятся к материалам, представляющим опасность для окружающей среды, поскольку они на расстоянии 10 см от их поверхности создают мощность эквивалентной дозы более 0,1 мЗв/ч (см. – основные санитарные правила).

На современных рудниках на 1 тонну добытой руды шахтным способом приходится 0,3 тонны пустой породы, а в карьерах эта цифра возрастает до 1,5-2 тонн и более. Поэтому твердые отходы урановых рудников – отвалы пустой породы и забалансовых руд являются основным источником загрязнения атмосферного воздуха вблизи предприятий за счет пыли и эманации.

Отвалы пустых пород, содержание радионуклидов в которых намного превышают кларковые, занимают на рудниках и карьерах многие тысячи квадратных метров и являются источниками локального загрязнения местности. В результате ветровой эрозии происходит сдувание пыли с поверхности отвалов, а также твердых продуктов распада постоянно выделяющегося радона и перенос этого материала на значительные расстояния. Как следствие этого процесса, мощность экспозиционной дозы гамма-излучения почвы в радиусе до 100 метров от отвалов в 3-5 раз превышает фоновое, а удельная альфа-активность растительности достигает 110-250 Бк/кг (Корнилов, Рябчиков, 1992). Отвалы забалансовых руд и пустой породы подвергаются постоянному воздействию атмосферных осадков, которые выщелачивают радионуклиды и загрязняют ими грунтовые воды и гидрографическую сеть, что в конечном счете приводит к сверхнормативному загрязнению радиоактивными веществами донных отложений.

Для уменьшения количества твердых отходов, хранимых на поверхности, их следует возвращать в подземные выработки для забуртовки выработанного пространства.

Жидкие отходы, к которым относятся шахтные воды, насыщенные радионуклидами, представляют собой дополнительный источник загрязнения окружающей среды и в первую очередь поверхностных водоемов.

В настоящее время в России осталось немного предприятий, добывающих радиоактивные руды шахтным и карьерным способами. Начиная с конца 60-х годов для добычи урана широко применяется метод подземного кислотного выщелачивания, что является кардинальным решением проблемы отвалообразования. В результате земная поверхность в районе уранодобывающих предприятий загрязняется в гораздо меньшей степени. Однако, в этом случае подвергаются значительному загрязнению радионуклидами и кислотами подземные воды. Задача специалистов – разработать эффективные методы изоляции участков добычи урана этим новым прогрессивным методом от водоносных горизонтов.

Другим звеном уранового производства являются обогатительные предприятия и заводы по гидрометаллургической переработке радиоактивных руд, где главный вид отходов – хвосты переработки рудной массы, насыщенные радиоактивными жидкостями.

Гидрометаллургический процесс характеризуется потреблением большого количества воды, требующейся для приготовления раствора серной кислоты. С помощью этого реагента производится выщелачивание урана из руды. На одну тонну выщелачиваемой руды приходится до 3-4 м³ раствора. Далее из полученного раствора уран извлекается с помощью ионообменных смол. Конечным продуктом горно-металлургических комбинатов является закись-окись урана U₃O₈ с содержанием урана около 85%. Полученный конечный продукт поступает на заводы изотопного обогащения.

Твердые отходы гидрометаллургического процесса состоят из шлама, остающегося после извлечения урана из тонкоизмельченной рудной массы. Как в жидкой пульпе, так и в шламе содержатся тысячные доли % урана и тория. Весь этот материал удаляется в намывные *хвостохранилища*, которые являются неотъемлемой частью гидрометаллургического производства урана и тория и главным источником местного загрязнения окружающей среды радионуклидами. Вокруг хвостохранилища со временем образуется постоянно функционирующий как наземный, так и подземный ореолы распространения радионуклидов.

Как правило, на урановых рудниках и прилегающих к ним территориях устанавливаются высокие концентрации радионуклидов часто превышающие допустимые уровни в несколько раз. Кроме того радиоактивные руды часто транспортируются по железной дороге с грубейшими нарушениями техники безопасности.

Таким образом, опасность представляют собой пункты добычи, складирования, переработки радиоактивного сырья, отвалы «пустой» породы на рудниках и пути транспортировки руды. Немалый вклад в загрязнение природной среды радионуклидами вносят и химические комбинаты по производству оружейного плутония и вторичной переработке отработанного на АЭС ядерного топлива. Высокоактивные сточные воды на этих предприятиях собираются в герметичные контейнеры, а малоактивные воды сбрасываются в открытые водоемы.

В качестве дополнительного источника естественных радионуклидов, поступающих в биосферу в результате деятельности человека, можно назвать добычу и переработку сырья, используемого для производства фосфорных удобрений, поскольку добываемые фосфориты и апатитовая руда характеризуются повышенным содержанием урана.

2.3.4. Добыча и переработка углеводородного сырья

Природные углеводороды содержат небольшое количество естественных радионуклидов. Значительными концентрациями урана, радия, тория и радона отличаются осадочные толщи, вмещающие нефть и газ. В связи с повышенной радиоактивностью нефтегазовых отложений, добыча и транспортировка углеводородного сырья сопровождается выносом на дневную поверхность значительного количества природных радионуклидов. Опасная концентрация природных радионуклидов происходит в производственных отходах на стадии добычи и первичной переработки углеводородного минерального сырья, особенно в том случае, когда нефтепромыслы функционируют длительное время. В течение нескольких лет эксплуатации оборудования на его поверхности концентрируются вещества, содержащие естественные радионуклиды семейств урана и тория. Причем, для производственных отходов нефтегазового комплекса является характерным смещение радиоактивного равновесия в сторону радия, при котором отношение удельной активности изотопов радия к удельной активности родоначальников семейств (урана и тория) достигает величины 100 и более.

Причиной концентрации естественных радионуклидов в установках для добычи и переработки углеводородного сырья являются два процесса:

1. Осаждение солей радия (карбонатов и сульфатов) из водной фазы, поступающей в установки добычи и переработки нефти. Такие накипи, содержащие радий-226, радий-228, торий-232 и торий-228, могут образовываться на всех поверхностях, соприкасающихся с пластовой водой. Это соединения труб, фазовые сепараторы (буллиты и резервуары), насосы, клапаны и др.

2. Осаждение твердых продуктов распада радона-222 (главным образом долгоживущего свинца-210) и вследствие этого образование радиоактивных пленок на стенках установок переработки и транспортировки газа.

Но наибольшее количество радионуклидов скапливается в нефтешламе, который образуется на разных технологических ступенях добычи и первичной переработки нефти.

Смесь нефти, газа и пластовой воды, откачиваемой из скважин, поступает на сборные пункты нефти, где происходит первичное многоступенчатое разделение перечисленных компонентов за счет отстаивания в буллитах и резервуарах. Попутный газ по трубопроводу направляется на газоперерабатывающий завод. Отделяемая пластовая вода через специальные скважины закачивается обратно в пласт для поддержки пластового давления. В каждом буллите и резервуаре из пластовой воды и нефти оседают тонкодисперсные частицы, составляющие нефтешлам. В нем и накапливаются природные радионуклиды, главным источником которых является выпадение в осадок из пластовой воды растворенных в ней сульфатов и карбонатов радия. За счет этого процесса коэффициент концентрации естественных радионуклидов в нефтешламе может достигать 10 000.

При современных масштабах развития ТЭК (топливно-энергетического комплекса) этот источник радионуклидов становится опасным загрязнителем окружающей среды, который без должного внимания со стороны общества может значительно влиять на состояние радиационной безопасности населения и персонала нефтегазодобывающих предприятий. Эти отбросы производства, которые по активности нередко могут быть отнесены к категории радиоактивных отходов, могут поступать в окружающую среду даже за пределами нефте- и газопромыслов.

В зависимости от соотношения органической и минеральной фаз плотность нефтешлама может колебаться от 1,5 до 3 т/м³. В процессе накопления в буллитах, резервуарах и хранилищах нефтешлам расслаивается с выделением органической составляющей в верхней его части.

2.3.5. Полигоны для испытания ядерного оружия

Официально известны *четыре ядерных полигона*, принадлежащие сверхдержавам: Невада (США, Великобритания), Новая Земля (Россия), Моруроа (Франция), Лобнор (Китай). Кроме того, в СССР интенсивно использовался Семипалатинский полигон, который в настоящее время не функционирует. Именно в этих пунктах произведена основная масса испытательных взрывов ядерных и термоядерных зарядов. Их насчитывается 2077 (по другим источникам – 1900), из которых 1090 принадлежит США, 715 – СССР, 190 – Франции, 42 – Великобритании, 40 – Китаю.

Полигон на Новой Земле был открыт для испытаний атомного оружия в 1954 году. Первое испытание бомбы под водой было проведено в губе Черной 25 сентября 1955 года. В 1961 г. осуществлен взрыв водородной бомбы мощностью 58 мегатонн тротила. Пик испытаний пришелся на 1962-63 годы. Всего произведено около 200 взрывов.

Семипалатинский полигон расположен в 120 км от г. Семипалатинска, в 60 км от р. Иртыш. Здесь проведено первое испытание атомной бомбы 29 августа 1949 года, а в 1954 г. испытан термоядерный заряд. За время действия полигона (до 1989 г.) в реки Иртыш и Ишим попало несколько миллионов кюри активности. При наземных и воздушных взрывах продукты распада через атмосферу перемещались на огромные расстояния и выпадали на поверхность Земли в виде радиоактивных осадков. Значительная часть ядерных материалов поднялась в стратосферу на высоту до 50 км и оттуда постепенно в течение ряда лет осаждалась на континенты и океаны всей планеты.

В результате испытаний ядерного оружия в окружающую среду выброшено около 30 млн Ки цезия-137 и 20 млн Ки стронция-90. В 60-е годы в биосферу попало около 5 тонн плутония-239. Все это привело к мощной вспышке глобального радиационного фона. В настоящее время большая часть радионуклидов, выброшенных в атмосферу в результате ядерных испытаний, осела на поверхность Земли и смыта в океаны.

Трагедия ядерных полигонов заключается не только в том, что обширные территории превращены атомными взрывами в «мертвые зоны», которые в обозримом будущем не могут быть обустроены человеком. Площади полигонов часто используются как пункты захоронения радиоактивных отходов. Особенно это касается архипелага Новая Земля, который вместе с прилегающими акваториями Северного Ледовитого океана превращен в гигантский могильник отработанных реакторов и других частей атомных кораблей. У Новой Земли затоплены многие тысячи контейнеров с жидкими и твердыми радиоактивными отходами и компонентами отработанных ядерных устройств.

2.3.6. Ядерные взрывы в мирных целях

Ядерные взрывы производились не только на всем известных полигонах. Существовало более сотни других испытательных пунктов, информация о которых в последние годы все больше проникает в литературу. Наиболее достоверные сведения содержатся в книге коллектива авторов, многие из которых были участниками рассматриваемых событий («Мирные ядерные взрывы»). В СССР существовала Программа № 7 «Ядерные взрывы для народного хозяйства». Начало ее реализации относится к 1965 году. В рамках этой программы в СССР с 1965 по 1988 годы было проведено 124 промышленных ядерных взрыва (рис. 21) с подрывом 135 зарядов. Из них 130 зарядов взорваны в скважинах, 4 – в штольнях и один заряд – в шахте. Из общего количества мирных ядерных взрывов 80 были проведены на территории Российской Федерации, 39 – на территории Казахстана, по 2 взрыва – на Украине и в Узбекистане и один – в Туркменистане. Многие из этих испытательных пунктов использовались многократно, являясь, по сути дела, испытательными полигонами. К примеру, на площадке «Азгир» было произведено 17 подземных ядерных взрывов, на площадке «Вега» – 14, на площадке «Лира» – 6.

2.3.7. Ядерные реакторы исследовательского типа

Наряду с производственными реакторами, вырабатывающими электроэнергию и производящими оружейный плутоний, имеются исследовательские ядерные установки. В России они расположены вблизи крупных научных центров, занимающихся вопросами ядерной физики: в Москве, Санкт-Петербурге, Томске, Обнинске, Арзамасе-16, Челябинске-40 и других городах. Многие из этих научных учреждений имеют собственные хранилища радиоактивных отходов.

2.3.8. Загрязнение морей атомными кораблями

Одной из трудно решаемых проблем атомного флота являются жидкие радиоактивные отходы – отработанная вода, используемая для охлаждения реакторов. Ее просто сливают в моря Северного Ледовитого океана, а также в Охотское и Японское моря (Булатов, 1993). Опасными в радиационном отношении являются все базы подводных лодок, места переоборудования и ликвидации боевых ракет атомных подводных лодок.

Срок эксплуатации подводных лодок составляет 20-30 лет, после чего они должны быть утилизированы, а ядерные реакторы и детали с наведенной радиоактивностью захоронены по действующим правилам и инструкциям, что нередко не соблюдается по причине недостатка денежных средств или по халатности. В результате во всех морях Северного Ледовитого океана имеются затопленные реакторы подводных лодок даже с невыгруженным ядерным топливом.

Корабли атомного флота по разным причинам терпят аварии и погружаются на дно океана вместе с реакторами и ядерными зарядами. Так, 7 апреля 1989 года в 400 км севернее побережья Норвегии в результате аварии затонула подводная лодка «Комсомолец», в результате чего на дне Норвежского моря, помимо ядерных боеголовок, лежит реактор с обогащенным ураном-235 весом 116 кг. Подъем лодки невозможен, поэтому сейчас организованы постоянные наблюдения за радиационной обстановкой у побережья Норвегии.

Подводя итоги вышесказанному, следует отметить, что за счет искусственных (техногенных) источников ионизирующей радиации формируется около 10% годовой эффективной эквивалентной дозы, в т.ч. рентгеновские и другие диагностические приборы и средства занимали на протяжении 1945-1980 годов до 7%, доза от ядерных взрывов достигала 7% в начале 60-х годов, снижалась до 0,8% в 1980 году; а дозы облучения, связанные с ядерной энергетикой, увеличились от 0,001 до 0,035% в 1980 году. Данные более поздних исследований представлены в таблице 23.

Таблица 23 – Структура доз облучения населения источниками ионизирующего излучения (по данным ООН и радиационно-гигиеническому паспорту РФ за 1999 год)

| Источник излучения | Средние годовые дозы, мЗв/год | |
|---|-------------------------------|-----------|
| | мировые | по России |
| <i>Природные источники</i> | | |
| Внешнее гамма-излучение природных радионуклидов | 0,48 | 0,48 |
| Космическое излучение | 0,390 | 0,390 |
| Долгоживущие радионуклиды в атмосферном воздухе | 0,006 | 0,006 |
| Изотопы радона в воздухе помещений | 1,26 | 1,89 |
| Калий-40 и другие природные радионуклиды в пище и питьевой воде | 0,290 | 0,290 |
| Всего природные источники | 2,406 | 3,056 |
| <i>Искусственные источники</i> | | |
| Медицинское облучение | 0,4 | 1,0 |
| Глобальные выпадения | 0,005 | 0,005 |
| Загрязнение территорий | 0,002 | 0,002 |
| Всего искусственные источники | 0,407 | 1,007 |
| Итого за счет всех источников | 2,813 | 4,064 |

2.3.9. Источники ионизирующего излучения в быту

В быту наибольшее влияние оказывают излучения видеотерминалов – телевизоров, компьютеров и др.

Сегодня трудно найти более изменившее нашу жизнь изобретение, неизмеримо ускорившее сам процесс творчества и цивилизацию в целом, чем компьютер. С ним давно освоились ученые и инженеры, он прочно вошел в научные учреждения и конструкторское бюро, стал любимой игрушкой детей и подростков. Растет число компьютерных классов в школах и вузах. Одним словом, количество видеотерминалов стремительно нарастает.

Поэтому всеобщая компьютеризация общества остро поставила вопросы безопасности работы оператора. Объективно зафиксированы многочисленные жалобы пользователей компьютеров на ухудшение здоровья. Проблема безопасности работы с монитором настолько серьезна, что находит отражение в деятельности многих международных организаций.

Видеотерминалы излучают электромагнитные поля в очень широком диапазоне. Основными же их источниками служат горизонтальные и вертикальные отклоняющие катушки, которые сканируют электронный луч и работают в диапазоне 15-35 кГц. На расстоянии 50 см от экрана обычная напряженность электрических полей – от 0,5 до 10 В/м, а интенсивность магнитного поля – от 0,1 до 1,0 мГс.

В 1988 году американские исследователи сообщили об увеличении на 80% частоты выкидышей у женщин, проводивших за видеотерминалом не менее 20 часов в неделю. Эти тревожные факты они поспешили объяснить не прямым воздействием компьютеров, а эмоциональным стрессом.

В 1992 году скандинавские ученые опубликовали результаты исследований, выводы из которых были весьма неутешительны: при пользовании видеотерминалами, создающими сильные магнитные поля в диапазоне низких частот, у женщин, активно работающих на компьютерах, вероятность выкидышей в 3,5 раза выше, чем у не пользующихся видеотерминалами (Анисимов В.Н., 1995). Мало того, из опытов на животных выяснилось, что магнитные поля (даже слабые) могут отрицательно воздействовать на развитие плода.

Рентгеновское излучение, возникающее при торможении электронного луча на внутренней поверхности кинескопа, является еще одним источником вредных воздействий на оператора. И хотя уровень такого излучения обычно ниже фонового значения в любом офисе, тем не

менее, Национальный институт радиационной защиты в Стокгольме (Швеция) установил достаточно жесткий стандарт уровня рентгеновского излучения мониторов, который гласит, что «уровень рентгеновского излучения мониторами должен быть настолько низким, чтобы его невозможно было зафиксировать измерениями».

Синий люминофор экрана монитора вместе с ускоренными в электронно-лучевой трубке электронами являются источником **ультрафиолетового излучения**. Его воздействие особенно сказывается при длительной работе с компьютером или при заболеваниях сетчатки глаза. Защититься от воздействия ультрафиолета можно, используя стеклянный защитный фильтр.

Излучение телевизора. В настоящее время ничто не может сравниться с голубым экраном телевизора по скорости, полноте, достоверности и красочности передаваемой информации. Но вместе с тем телевизор также таит в себе определенную опасность для человека.

Телевизор представляет собой электронно-вакуумный прибор, создающий видимое изображение (цветное или черно-белое) за счет облучения электронами люминесцентного экрана кинескопа. В кинескопе с особого катода, находящегося под высоким напряжением, вылетают с большой скоростью электроны, бомбардирующие люминесцентный экран, создавая за счет движения луча (15-120 кГц) видимое изображение. Возникающее во время бомбардировки экрана вторичное облучение губительно действует на любой живой организм, находящийся вблизи экрана. Спектр вторичного излучения очень широк – микроволновая, рентгеновская и ультрафиолетовая радиация, электронное излучение и другие виды электромагнитных полей.

Средняя мощность радиации у цветного телевизора составляет 40-50 мкР/ч. Для сравнения, полет самолета на высоте 10-12 тыс. км – 500 мкР/ч.

При пользовании компьютером:

– освещение должно быть слева от компьютера, старайтесь избегать бликов от дополнительных источников света. Общая освещенность должна быть порядка 300-500 люкс;

– излучение идет не только со стороны экрана, но и с боковых и задних поверхностей. Поэтому лучше, чтобы компьютер тылом был расположен к стене. Если это по каким-то причинам невозможно, то расстояние между тылом одной ЭВМ и экраном другой должно быть не менее 2 метров; между боковыми поверхностями – не менее 1,2 м. Электромагнитные поля быстро убывают с увеличением расстояния от источника излучения: в 10 см от экрана компьютера в 5-10 раз выше, чем на рас-

стоянии, где обычно сидит человек. Площадь на одно рабочее место должна составлять не менее 6 м^2 .

ОСНОВНЫЕ ПРАВИЛА:

1. В среднем через каждые 2 часа нужно делать 10-15 минутные перерывы. Беременные и кормящие женщины к работе с компьютером не допускаются.

2. Для преподавателей вузов и школ установлена длительность работы в дисплейных классах и кабинетах информатики не более 4 часов в день.

3. Инженеры, обслуживающие учебный процесс, могут находиться в них не более 6 часов.

4. Студенты 1 курса могут работать на компьютере 1 час, старшекурсники – 2 часа с перерывом на 15-20 минут.

5. Для учащихся:

– 10-11 классов должно быть не более 2 уроков на компьютерах в неделю, а для остальных классов – один урок;

– 1-х классов – 10 минут;

– 2-5 классов – не более 15 минут;

– 6-7 классов – не более 20 минут;

– 8-9 классов – не более 25 минут.

2.4. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

ИСКУССТВЕННЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ

В эту группу входят радионуклиды, которых нет в природе. Лишь некоторые из них в ничтожных количествах встречаются в горных породах. Основная же их масса появилась в середине XX столетия в результате деятельности человека. Это продукты деления радиоизотопов, используемых при атомных взрывах и управляемых ядерных реакциях.

Искусственные радионуклиды легко включаются в *пищевые цепи* и накапливаются в живых организмах. Энергия частиц, испускаемых этими изотопами, колеблется от 0,1 до 5 МэВ. Искусственные радионуклиды приведены в таблице 24. В этом списке отсутствуют крайне короткоживущие радиоизотопы, которые не представляют интереса для экологии.

Таблица 24 – Искусственные радиоактивные изотопы, имеющие важное значение в экологии

| Изотоп | Символ | Период полураспада | Преобладающий тип излучения |
|--------------------|-------------------|------------------------|-----------------------------|
| Стронций-90 | ⁹⁰ Sr | 28 лет | бета |
| Стронций-89 | ⁸⁹ Sr | 53 сут. | бета |
| Цезий-137 | ¹³⁷ Cs | 33 года | бета, гамма |
| Цезий-134 | ¹³⁴ Cs | 2,3 года | бета, гамма |
| Рутений-103 | ¹⁰³ Ru | 40 сут. | бета, гамма |
| Рутений-106 | ¹⁰⁶ Ru | 1 год | бета |
| Цирконий-95 | ⁹⁵ Zr | 65 сут. | бета, гамма |
| Барий-140 | ¹⁴⁰ Ba | 12,8 сут. | бета, гамма |
| Неодим-147 | ¹⁴⁷ Nd | 11,3 сут. | бета, гамма |
| Иттрий-91 | ⁹¹ Y | 61 сут. | бета, гамма |
| Углерод-14 | ¹⁴ C | 5 730 лет | бета |
| Фосфор-32 | ³² P | 14,5 сут. | бета |
| Железо-59 | ⁵⁹ Fe | 45 сут. | бета, гамма |
| Йод-131 | ¹³¹ I | 8 сут. | бета, гамма |
| Кобальт-60 | ⁶⁰ Co | 5,27 лет | бета, гамма |
| Плутоний-239 | ²³⁹ Pu | $2,4 \times 10^4$ лет | альфа, гамма |
| Водород-3 (тритий) | ³ H | 12 лет | бета |
| Криптон-85 | ⁸⁵ Kr | 10,4 года | бета |
| Ниобий-95 | ⁹⁵ Nb | 35 сут. | бета, гамма |
| Уран-233 | ²³³ U | $1,63 \times 10^5$ лет | альфа, гамма |
| Радон-222 | ²²² Rn | 3,82 дня | альфа |

К наиболее опасным искусственным радионуклидам, являющимся продуктами распада урана, относятся цезий-137 и стронций-90, а также искусственно получаемый изотоп – плутоний-239. Источниками поступления их во внешнюю среду являются аварийные выбросы и утечки из атомных реакторов, хранилищ и могильников РАО, заводов ядерного цикла и, конечно, ядерные взрывы. В таблице 25 приведен выход стронция-90 и цезия-137 при делении ядер урана-235 и плутония-239, по данным ВНИИФТРИ (1996).

Таблица 25 – Выход искусственных радионуклидов при делении ядер, %

| Искусственные радионуклиды | Уран-235 | Плутоний-239 |
|----------------------------|----------|--------------|
| Стронций-90 | 5,93 | 2,01 |
| Цезий-137 | 6,81 | 6,47 |

В настоящее время фоновые значения глобального радиоактивного загрязнения составляют: по стронцию-90 – 0,045, по цезию-137 – 0,08, по плутонию-239 – 0,005 Ки/км².

2.5. Радиоактивные отходы и экология

После запрещения испытаний ядерного оружия в трех сферах проблема уничтожения радиоактивных отходов, образующихся в процессе использования атомной энергии в мирных целях, занимает одно из первых мест среди всех проблем радиационной экологии.

По физическому состоянию радиоактивные отходы (РАО) подразделяются на твердые, жидкие и газообразные.

Согласно ОСПОРБ-99 (Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности) к твердым радиоактивным отходам относятся отработавшие свой ресурс радионуклидные источники, не предназначенные для дальнейшего использования материалы, изделия, оборудование, биологические объекты, грунт, а также отвержденные жидкие радиоактивные отходы, в которых удельная активность радионуклидов больше значений, приведенных в приложении П-4 НРБ-99 (нормы радиационной безопасности). При неизвестном радионуклидном составе к РАО следует относить материалы с удельной активностью больше:

100 кБк/кг – для источников бета-излучения;

10 кБк/кг – для источников альфа-излучения;

1 кБк/кг – для трансурановых радионуклидов (химические радиоактивные элементы, расположенные в периодической системе элементов после урана, т.е. с атомным номером больше 92. Все они получены искусственно, а в природе встречаются лишь Np и Pu в чрезвычайно малых количествах).

К жидким радиоактивным отходам относятся не подлежащие дальнейшему использованию органические и неорганические жидкости, пульпы и шламы, в которых удельная активность радионуклидов более чем в 10 раз превышает значения уровней вмешательства при поступлении с водой, приведенные в приложении П-2 НРБ-99.

К газообразным радиоактивным отходам относятся не подлежащие использованию радиоактивные газы и аэрозоли, образующиеся при производственных процессах с объемной активностью, превышающей допустимые среднегодовые объемные активности (ДООА), приведенные в приложении П-2 НРБ-99.

Жидкие и твердые радиоактивные отходы подразделяются по удельной активности на 3 категории: низкоактивные, среднеактивные и высокоактивные (табл. 26).

Таблица 26 – Классификация жидких и твердых РАО (ОСПОРБ-99)

| Категория отходов | Удельная активность, кБк/кг | | |
|-------------------|-----------------------------|---------------------|---------------------|
| | бета-излучающие | альфа-излучающие | трансурановые |
| Низкоактивные | менее 10^3 | менее 10^2 | менее 10^1 |
| Среднеактивные | от 10^3 до 10^7 | от 10^2 до 10^6 | от 10^1 до 10^5 |
| Высокоактивные | более 10^7 | более 10^6 | более 10^5 |

Радиоактивные отходы образуются:

- в процессе добычи и переработки радиоактивного минерального сырья;
- при работе атомных электростанций;
- в процессе эксплуатации и утилизации кораблей с ядерными установками;
- при переработке отработавшего ядерного топлива;
- при производстве ядерного оружия;
- при проведении научных работ с использованием исследовательских ядерных реакторов и делящегося материала;
- при использовании радионуклидов в промышленности, медицине, науке;
- при подземных ядерных взрывах.

Система обращения с твердыми и жидкими РАО в местах их образования определяется проектом для каждой организации, планирующей работы с открытыми источниками излучения, и включает их сбор, сортировку, упаковку, временное хранение, кондиционирование (концентрирование, отверждение, прессование, сжигание), транспортирование, длительное хранение и захоронение.

Для сбора радиоактивных отходов в организации должны быть специальные сборники. Места расположения сборников должны обеспечиваться защитными приспособлениями для снижения излучения за их пределами до допустимого уровня.

Для временного хранения РАО, создающих у поверхности дозу гамма-излучения более 2 МГр/ч, должны использоваться специальные защитные колодцы или ниши.

Жидкие радиоактивные отходы собираются в специальные емкости, после чего направляются на захоронение. Запрещается сброс жидких РАО в хозяйственно-бытовую и ливневую канализацию, водоемы, колодцы, скважины, на поля орошения, поля фильтрации и на поверхность Земли.

При ядерных реакциях, происходящих в активной зоне реактора, выделяются радиоактивные газы: ксенон-133 ($T_{\text{физ.}} = 5$ сут.), криптон-85 ($T_{\text{физ.}} = 10$ лет), радон-222 ($T_{\text{физ.}} = 3,8$ сут.) и другие. Эти газы поступают в фильтр-адсорбер, где теряют свою активность и только после этого выбрасываются в атмосферу. В окружающую среду поступает также некоторое количество углерода-14 и трития.

Другой источник радионуклидов, попадающих в окружающую среду от функционирующих АЭС, – дебалансная и техническая вода. ТВЭЛ-ы, находящиеся в активной зоне реактора, часто деформируются и продукты деления попадают в теплоноситель. Дополнительным источником радиации в теплоносителе являются радионуклиды, образующиеся в результате облучения материалов реактора нейтронами. Поэтому периодически вода первого контура обновляется и очищается от радионуклидов.

Чтобы не произошло загрязнение окружающей среды, вода всех технологических контуров АЭС включается в систему оборотного водоснабжения (рис. 8).

Тем не менее часть жидких стоков сбрасывают в водоем-охладитель, имеющийся при каждой АЭС. Этот водоем является слабопроточным бассейном (чаще всего это искусственное водохранилище), поэтому сброс в него жидкостей, содержащих даже малое количество радионуклидов, может привести к опасной их концентрации. Сброс жидких радиоактивных отходов в водоемы-охладители категорически запрещен «Санитарными правилами». В них можно направлять только жидкости, в которых концентрация радиоизотопов не превышает допустимые нормы. Кроме того, количество сливаемых в водоем жидкостей ограничивается нормой допустимого сброса. Эта норма устанавливается таким образом, что бы воздействие радионуклидов на водопользователей не превысило дозу 5×10^{-5} Зв/год. Объемная активность основных радионуклидов в сбрасываемой воде АЭС Европейской части России, по оценке Ю.А. Егорова (2000), составляет (Бк):

$$^{137}\text{Cs}-1,5 \times 10^{-3}, \quad ^{60}\text{Co}-1,5 \times 10^{-4}, \quad ^{59}\text{Fe}-1,5 \times 10^{-4}, \quad ^{54}\text{Mn}-4 \times 10^{-4}.$$

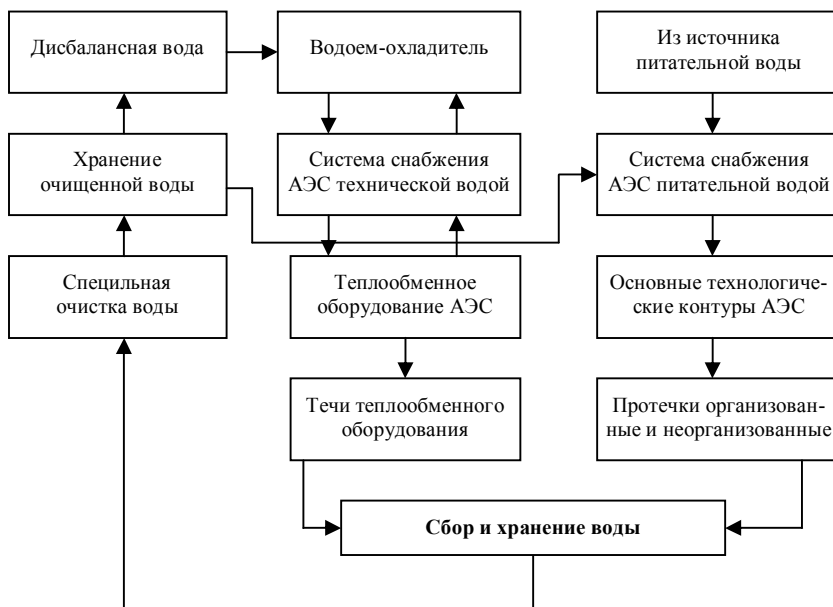


Рис. 8. Структурная схема оборотного водоснабжения АЭС

В процессе *самоочищения* воды эти радионуклиды опускаются на дно и постепенно захораниваются в *донных отложениях*, где их концентрация может достигать 60 Бк/кг. Относительное распределение радионуклидов в экосистемах водоемов-охладителей АЭС, по данным Ю.А. Егорова приведено в таблице 27. По мнению этого автора, такие водоемы могут быть использованы в любых народно-хозяйственных и рекреационных целях.

Таблица 27 – Относительное распределение радионуклидов в водоемах-охладителях, %

| Компоненты экосистем | ^{137}Cs | ^{134}Cs | ^{60}Co | ^{54}Mn |
|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Вода | 2-5 | 2-5 | 0,2-0,4 | 0,2-0,4 |
| Взвеси | 0,25 | 0,25 | 1 | 1 |
| Гидробионты: | | | | |
| моллюски | 0,05-2 | 0,05-2 | 0,01 | 0,01 |
| нитчатые водоросли | 5×10^{-3} | 5×10^{-3} | 1×10^{-3} | 1×10^{-3} |
| высшие растения | 10^{-2} | 2×10^{-3} | 2×10^{-3} | 5×10^{-4} |
| рыбы | 1×10^{-4} | 2×10^{-4} | 2×10^{-4} | 5×10^{-4} |
| Донные отложения | 95-98 | 95-98 | 98,5 | 98-98,5 |

Наносят ли вред окружающей среде атомные электростанции? Опыт эксплуатации отечественных АЭС показал, что при правильном техническом обслуживании и налаженном мониторинге окружающей среды они практически безопасны. Радиоактивное воздействие на биосферу этих предприятий не превышает 2% от местного радиационного фона. Ландшафтно-геохимические исследования в десятикилометровой зоне Белоярской АЭС показывают, что плотность загрязнения плутонием почв лесных и луговых биоценозов не превышает 160 Бк/м² и находится в пределах глобального фона (Павлецкая, 1967). Расчеты показывают, что в радиационном отношении гораздо более опасны тепловые электростанции, поскольку сжигаемые на них уголь, торф и газ содержат природные радионуклиды семейств урана и тория. Средние индивидуальные дозы облучения в районе расположения тепловых электростанций мощностью 1 ГВт/год составляют от 6 до 60 мкЗв/год, а от выбросов АЭС – от 0,004 до 0,13 мкЗв/год. Таким образом АЭС при нормальной их эксплуатации являются экологически более чистыми, чем тепловые электростанции.

Опасность АЭС заключается лишь в аварийных выбросах радионуклидов и последующем распространении их во внешней среде атмосферным, водным, биологическим и механическим путями. В этом случае биосфере наносится ущерб, выводящий из строя огромные территории, которые долгие годы не могут использоваться в хозяйственной деятельности.

Так, в 1986 г. на Чернобыльской АЭС в результате теплового взрыва в окружающую среду было выброшено до 10% ядерного материала, находящегося в активной зоне реактора.

За все время эксплуатации АЭС в мире официально зафиксировано около 150 аварийных случаев выбросов радионуклидов в биосферу. Это внушительная цифра, показывающая, что резерв повышения безопасности атомных реакторов пока весьма велик. Поэтому очень важен мониторинг окружающей среды в районах АЭС, который играет решающую роль в выработке способов локализации радиоактивных загрязнений и их ликвидации. Особая роль здесь принадлежит научным исследованиям в области изучения геохимических барьеров, на которых радиоактивные элементы теряют свою подвижность и начинают концентрироваться.

Радиоактивные отходы, содержащие радионуклиды с периодом полураспада менее 15 суток, собираются отдельно и выдерживаются в местах временного хранения для снижения активности до безопасных уровней, после чего удаляются как обычные промышленные отходы.

Передача РАО из организации на переработку или захоронение должна производиться в специальных контейнерах.

Переработку, долговременное хранение и захоронение РАО производят специализированные организации. В отдельных случаях возможно осуществление в одной организации всех этапов обращения с РАО, если это предусмотрено проектом или на это выдано специальное разрешение органов государственного надзора.

Эффективная доза облучения населения, обусловленная радиоактивными отходами, включая этапы хранения и захоронения, не должна превышать 10 мкЗв/год.

Наибольший объем РАО поставляют атомные электростанции. Жидкие РАО АЭС – это кубовые остатки выпарных аппаратов, пульпы механических и ионообменных фильтров очистки контурной воды. На АЭС они хранятся в бетонных емкостях, облицованных нержавеющей сталью. Затем они подвергаются отверждению и захораниваются по специальной технологии. К твердым отходам АЭС относятся вышедшее из строя оборудование и его детали, а также израсходованные материалы. Как правило, они имеют низкую активность и утилизируются на АЭС. Отходы со средней и высокой активностью отправляют на захоронение в специальные подземные хранилища.

Хранилища радиоактивных отходов размещаются глубоко под землей (не менее 300 м), причем, за ними устанавливается постоянное наблюдение, так как радионуклиды выделяют большое количество тепла. Подземные хранилища РАО должны быть долговременными, рассчитанными на сотни и тысячи лет. Они размещаются в сейсмически спокойных районах, в однородных скальных массивах лишенных трещин. Наиболее подходящими для этого являются гранитные геологические комплексы горных массивов, прилегающих к побережью океана. В них удобнее всего сооружать подземные туннели для РАО (Кедровский, Чесноков, 2000). Надежные хранилища РАО могут размещаться в многолетнемерзлых породах. Одно из них планируется создать на Новой Земле.

Для облегчения захоронения и надежности последнего жидкие высокоактивные РАО превращают в твердые инертные вещества. В настоящее время основными методами переработки жидких РАО являются цементирование и остеклование с последующим заключением в стальные контейнеры, которые хранятся под землей на глубине нескольких сотен метров.

Исследователи Московского объединения «Радон» предложили методику обращения жидких РАО в стойкую алюмосиликатную керамику

при температуре 900 °С с использованием карбамида (мочевины), солей фтора и природных алюмосиликатов (Лашенова, Лифанов, Соловьев, 1999).

Однако при всей своей прогрессивности перечисленные приемы имеют существенный недостаток – объемы радиоактивных отходов при этом не сокращаются. Поэтому ученые находятся в постоянном поиске других методов захоронения жидких РАО. Один из таких методов – селективная сорбция радионуклидов. В качестве *сорбентов* исследователи предлагают использовать природные цеолиты, с помощью которых может быть достигнута очистка жидкостей от радионуклидов цезия, кобальта и марганца до безопасных концентраций. При этом объем радиоактивного продукта сокращается в десятки раз (Савкин, Дмитриев, Лифанов и др., 1999). Ю.В. Островский, Г.М. Зубарев, А.А. Шпак и другие новосибирские ученые (1999) предложили гальванохимическую обработку жидких радиоактивных отходов.

Перспективный метод захоронения высокоактивных отходов – удаление их в космос. Метод предложен академиком А.П. Капицей в 1959 году. Сейчас ведутся интенсивные исследования в этой области.

Радиоактивные отходы в большом количестве производят атомные электростанции, исследовательские реакторы и военная сфера (ядерные реакторы кораблей и подводных лодок).

Согласно оценке МАГАТЭ к концу 2000 года из ядерных реакторов выгружено 200 тыс. тонн облученного топлива.

Предполагается, что основная часть его будет удаляться без переработки (Канада, Финляндия, Испания, Швеция, США), другая часть будет перерабатываться (Аргентина, Бельгия, Китай, Франция, Италия, Россия, Швейцария, Англия, Германия).

Бельгия, Франция, Япония, Швейцария, Англия хоронят блоки с радиоактивными отходами, заключенными в боросиликатное стекло.

Захоронение на дне морей и океанов. Захоронения радиоактивных отходов в морях и океанах практиковалось многими странами. Первыми это сделали США в 1946 году, затем Великобритания – в 1949 году, Япония – в 1955 году, Нидерланды – в 1965 году. Первый морской могильник жидких радиоактивных отходов появился в СССР не позднее 1964 года.

В морских захоронениях Северной Атлантики, где, по данным МАГАТЭ, с 1946 по 1982 годы 12 стран мира затопили радиоактивные отходы суммарной активностью более МКи (одного мегаКюри). Регионы земного шара по величине суммарной активности ныне распределяются следующим образом:

- а) Северная Атлантика – примерно 430 кКи;
- б) моря Дальнего Востока – около 529 кКи;
- в) Арктика – не превышает 700 кКи.

Со времени первого затопления высокоактивных отходов в Карском море прошло 25-30 лет. За эти годы активность реакторов и отработавшего топлива естественным путем снизилась во много раз. На сегодня в северных морях суммарная активность РАО составляет 115 кКи.

При этом надо полагать, что морскими захоронениями радиоактивных отходов занимались грамотные люди – профессионалы в своей области. РАО затоплялись во впадинах бухт, где течениями и подводными водами не затрагиваются эти глубинные слои. Потому РАО там «сидят» и никуда не распространяются, а только поглощаются специальными осадками.

Надо также учесть, что радиоактивные отходы с наибольшей активностью законсервированы твердеющими смесями. Но даже если радионуклиды попадут в морскую воду – они сорбируются данными осадками в непосредственной близости от объекта затопления. Это было подтверждено прямыми измерениями радиационной обстановки.

Наиболее часто обсуждаемой возможностью для захоронений РАО является использование захоронений в глубоком бассейне, где средняя глубина составляет не менее 5 км. Глубоководное скалистое дно океана покрыто слоем отложений, и неглубокое погребение под десятками метров отложений может быть получено простым сбрасыванием контейнера за борт. Глубокое погребение под сотнями метров отложений потребует бурения и закладки отходов. Отложения насыщены морской водой, которая через десятки или сотни лет может разесть (в результате коррозии) канистры с топливными элементами из использованного топлива. Однако предполагается, что сами отложения адсорбируют выщелоченные продукты деления, препятствуя их проникновению в океан. Расчеты последствия крайнего случая разрушения оболочки контейнера сразу после попадания в слой отложений показали, что диспергирование топливного элемента, содержащего продукты деления, под слоем отложений случится не ранее чем через 100-200 лет. К тому времени уровень радиоактивности упадет на несколько порядков.

Окончательное захоронение в соляных отложениях. Соляные отложения являются привлекательными местами для долговременных захоронений радиоактивных отходов. Тот факт, что соль находится в твердой форме в геологическом слое, свидетельствует об отсутствии циркуляции грунтовых вод с момента его образования несколько сот миллионов лет тому назад. Таким образом, топливо, помещенное в та-

ком отложении, не будет подвергаться выщелачиванию грунтовыми водами. Соляные отложения такого типа встречаются очень часто.

Геологическое захоронение. Геологическое захоронение подразумевает размещение контейнеров, содержащих отработанные топливные элементы, в стабильном пласте, обычно на глубине 1 км. Можно допустить, что такие породы содержат воду, так как глубина их залегания значительно ниже зеркала грунтовых вод. Однако ожидается, что вода не будет играть большой роли при теплопередаче от контейнеров, поэтому хранилище должно быть спроектировано с учетом возможности поддержания температуры поверхности канистр не более чем 100°C или около того. Тем не менее присутствие грунтовых вод означает, что материал, выщелоченный из хранящихся блоков, может проникнуть через пласт с водой. Это является важным вопросом при проектировании таких систем. Циркуляция воды сквозь породу как результат разности плотностей, вызванный температурным градиентом, в течение длительного времени важна для определения миграции продуктов деления. Этот процесс очень медленный, и поэтому не ожидается, что от него будут серьезные неприятности. Однако для систем долговременного захоронения он должен быть обязательно принят во внимание.

Выбор между различными методами захоронений будет определяться доступностью удобных мест, потребуются еще много биологических и океанографических данных. Тем не менее, исследования во многих странах показывают, что использованное топливо можно обрабатывать и производить захоронение без чрезмерного риска для человека и окружающей среды.

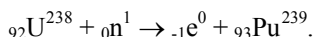
В последнее время всерьез обсуждается возможность забрасывать контейнеры с долгоживущими изотопами с помощью ракет на невидимую обратную сторону Луны. Вот только как обеспечить стопроцентную гарантию, что все запуски будут успешными, ни одна из ракет-носителей не взорвется в земной атмосфере и не засыплет ее смертоносным пеплом? Что бы ни говорили ракетчики, риск очень велик. Да и вообще мы не знаем, для чего понадобится обратная сторона Луны нашим потомкам. Было бы крайне легкомысленно превратить ее в убийственную радиационную свалку.

Захоронение плутония. Осенью 1996 года в г. Москве проходил Международный научный семинар по плутонию. Это чрезвычайно токсичное вещество получается в результате работы атомного реактора и раньше использовалось для производства ядерных боеприпасов. Но за годы использования ядерной энергии плутония на Земле скопились уже

тысячи тонн, ни одной стране для производства оружия столько не нужно. Вот и встал вопрос, что с ним делать дальше?

Оставить просто так где-нибудь в хранилище – весьма дорогое удовольствие.

Как известно, плутоний в природе не встречается, его получают искусственно из урана-238 при облучении последнего нейтронами в атомном реакторе:



У плутония обнаружено 14 изотопов с массовыми числами от 232 до 246; наиболее распространен изотоп ${}^{239}\text{Pu}$.

Плутоний, выделяемый из отработанного топлива АЭС, содержит смесь высокоактивных изотопов. Под действием тепловых нейтронов делятся только Pu-239 и Pu-241, а быстрые нейтроны вызывают деление всех изотопов.

Период полураспада ${}^{239}\text{Pu}$ равен 24 000 годам, ${}^{241}\text{Pu}$ – 75 лет, при этом образуется изотоп ${}^{241}\text{Am}$ с сильным гамма-излучением. Ядовитость такова, что тысячная доля грамма вызывает летальный исход.

Академик Ю. Труннев предложил хранить плутоний в подземных хранилищах, сооружаемых с помощью ядерных взрывов. Радиоактивные отходы вместе с горными породами остекловываются и не распространяются в окружающую среду.

Перспективным считается положение, что отработанное ядерное топливо (ОЯТ) – ценнейшее средство для атомной промышленности, подлежащее переработке и использованию по замкнутому циклу: уран – реактор – плутоний – переработка – реактор (Англия, Россия, Франция).

В 2000 году на российских АЭС скопилось около 74 000 м³ жидких РАО суммарной активностью $0,22 \times 10^5$ Ки, около 93 500 м³ твердых РАО активностью $0,77 \times 10^3$ Ки и около 9 000 т отработавшего ядерного топлива активностью свыше 4×10^9 Ки. На многих АЭС хранилища РАО заполнены на 75% и оставшегося объема хватит лишь на 5-7 лет.

Ни одна АЭС не оснащена оборудованием для кондиционирования образующихся РАО. По мнению специалистов Минатома России реально в ближайшие 30-50 лет РАО будут храниться на территории АЭС, поэтому возникает необходимость создания там специальных долговременных хранилищ, приспособленных для последующего извлечения из них РАО для транспортирования их к месту окончательного захоронения.

Жидкие РАО Военно-морского флота хранятся в береговых и плавучих емкостях в регионах, где базируются корабли с атомными двигателями. Годовое поступление таких РАО около 1 300 м³. Они перерабаты-

ваются двумя техническими транспортными судами (один на Северном, другой на Тихоокеанском флотах).

Кроме того, в связи с интенсификацией применения ионизирующего излучения в хозяйственной деятельности человека, с каждым годом возрастает объем отработанных радиоактивных источников, поступающих с предприятий и учреждений, использующих в своей работе радиоизотопы. Большая часть таких предприятий находится в Москве (около 1 000), областных и республиканских центрах.

Эта категория РАО утилизируется через централизованную систему территориальных спецкомбинатов «Радон» Российской Федерации, которые осуществляют прием, транспортировку, переработку и захоронение отработанных источников ионизирующего излучения. В ведении Департамента жилищно-коммунального хозяйства Минстроя РФ находятся 16 спецкомбинатов «Радон»: Ленинградский, Нижегородский, Самарский, Саратовский, Волгоградский, Ростовский, Казанский, Башкирский, Челябинский, Екатеринбургский, Новосибирский, Иркутский, Хабаровский, Приморский, Мурманский, Красноярский. Семнадцатый спецкомбинат, Московский (расположен возле г. Сергиев Посад), подчиняется Правительству г. Москвы.

Каждое предприятие «Радон» имеет специально оборудованные *пункты захоронения радиоактивных отходов* (ПЗРО).

Для захоронения отработавших источников ионизирующего излучения используются инженерные приповерхностные хранилища колодезного типа. В каждом предприятии «Радон» налажена нормальная эксплуатация хранилищ, учет захороненных отходов, постоянный радиационный контроль и мониторинг за радиологическим состоянием окружающей среды. На основе результатов контроля радиологической обстановки в районе размещения ПЗРО периодически составляется радиологический паспорт предприятия, который утверждается контрольно-надзорными органами.

Спецкомбинаты «Радон» спроектированы в 70-х годах XX века в соответствии с требованиями устаревших ныне норм радиационной безопасности.

2.6. ЗАЩИТА ОТ РАДИАЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

При проведении контроля степени облучения сельскохозяйственных животных необходимо определять дозы внешнего облучения. Это можно делать с помощью дозиметрических приборов, но дозу можно

определять и путем вычисления. В основе расчетных методов определения доз облучения лежат закономерности взаимодействия ионизирующих излучений с веществом. Вычисление доз облучения при внешнем гамма-облучении

Доза облучения прямо пропорциональна мощности дозы облучения и времени его воздействия:

$$D = P \times t,$$

где D – доза облучения;
 P – мощность дозы облучения;
 t – время облучения.

Доза облучения от внешних точечных источников прямо пропорциональна мощности дозы облучения и обратно пропорциональна квадрату расстояния до него:

$$D = P \times t / R^2,$$

где R – расстояние до источника излучения, см;
 D – доза облучения, Р;
 P – мощность дозы излучения, Р/ч;
 T – время облучения, часы.

Существует взаимосвязь между активностью (A) радиоактивных веществ и мощностью дозы излучения, создаваемой их гамма-излучением. Поэтому в формуле мощность дозы излучения (P) можно заменить выражением ($P = K_\gamma \times A$) и формула примет вид:

$$D = (K_\gamma \times A \times t) / R^2,$$

где D – доза облучения, Р;
 K_γ – гамма-постоянная данного радиоизотопа ($P \times \text{см}^2 / \text{ч} \times \text{мКи}$);
 A – активность данного радиоизотопа, мКи;
 t – время облучения, часы;
 R – расстояние до источника излучения, см.

Доза облучения может быть уменьшена с помощью поглощения излучения материалами защитных экранов. Значение этого коэффициента зависит от вида излучения, его энергии, материала экрана и толщины. Для гамма-излучения его можно рассчитать по следующей формуле:

$$K_{\text{осл.}} = 2 \times h / d_{\text{пол.}},$$

где $K_{\text{осл.}}$ – коэффициент ослабления излучения, (см. таблицу 28);
 h – толщина защитного слоя материала, см;
 $d_{\text{пол.}}$ – слой половинного ослабления материала, см, т.е. такая толщина слоя материала, которая ослабляет интенсивность излучения в 2 раза.

Таблица 28 – Средние значения коэффициента ослабления дозы радиации ($K_{осл.}$)
укрытиями и транспортом

| Наименование укрытий и транспортных средств | Косл. |
|--|-------|
| Открытое расположение на местности | 1 |
| Открытые щели | 3 |
| Производственные одноэтажные здания (цех) (коровник, свинарник, кирпичный без перекрытия) | 7 |
| Коровник, свинарник кирпичный с ж/б перекрытием | 12,5 |
| <i>Жилые каменные дома</i> | |
| Одноэтажные | 10 |
| Подвал одноэтажного каменного дома | 40 |
| Двухэтажные | 15 |
| Подвал двухэтажного каменного дома | 100 |
| <i>Жилые деревянные дома</i> | |
| Одноэтажные | 2 |
| Подвал одноэтажного деревянного дома | 7 |
| Погреб | 20 |

Защиту от облучения можно проводить следующими методами:

1. Защита временем. Следует находиться в зоне облучения минимальное время.
2. Защита расстоянием. Следует находиться от источника излучения на максимальном расстоянии.
3. Защита экранами. Следует использовать защитные средства из различных материалов (орг. стекло, дерево, кирпич, бетон, свинец, резина).

2.6.1. Принципы нормирования в области радиационной безопасности

Проблема защиты населения от действия ионизирующих излучений имеет глобальный характер, а потому соответствующие научно-исследовательские и организационные мероприятия разрабатываются международными организациями, рекомендации которых используются отдельными странами при составлении собственных национальных регламентов.

Первый международный акт такого рода был предпринят в 1928 г., когда на II Международном радиологическом конгрессе в Стокгольме был создан Комитет по защите от рентгеновских лучей и радия. В 1950 году Комитет был реорганизован в Международную Комиссию по радиологической защите (МКРЗ). В 1956 году МКРЗ вступила в организационные отношения со Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) в качестве «неправительственной соучаствующей организации». Согласно уставу, МКРЗ анализирует и обобщает все достижения в области защиты от ионизирующих излучений и периодически разрабатывает соответствующие рекомендации, исходя из основных научных принципов. В декларациях МКРЗ подчеркивается, что она предоставляет национальным комиссиям по защите от излучений отдельных стран право и ответственность за применение рекомендуемых в ее публикациях инструкций или правил соответственно внутригосударственным условиям. Такая комиссия по радиационной защите (РНКРЗ) существует и в России.

МКРЗ в настоящее время состоит из главной комиссии и четырех комитетов, состав которых обновляется один раз в четыре года. В число членов МКРЗ входят и представители России. Членом Главной комиссии МКРЗ в период с 1993 по 2001 гг. был академик РАМН Л.А. Ильин, а с 2001 г. этот пост занимает академик РАСХН Р.М. Алексахин.

МКРЗ тесно сотрудничает с Международной комиссией по радиационным единицам и измерениям (МКРЕ).

В 1955 году при ООН организован Научный комитет по действию атомной радиации (НКДАР), осуществляющий сбор и анализ международной информации о различных аспектах действия ионизирующих излучений на живые организмы. НКДАР периодически получает задания от Генеральной Ассамблеи ООН и осуществляет их выполнение, привлекая для этих целей МКРЗ, МКРЕ и другие организации в тесном сотрудничестве с ВОЗ. Изучением последствий облучения занимается и американский Комитет по биологическому действию ионизирующих излучений (BEIR).

Все перечисленные международные организации в своих публикациях и других документах предлагают лишь рекомендации по основным принципам регламентирования действия радиации, а также обосновывают проблемы, нуждающиеся в дальнейшей научной разработке. Эти рекомендации не являются обязательными для принятия в законодательные акты и документы отдельных стран.

Существует еще одна международная организация – Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ), курирующая во-

просы, связанные с радиационной безопасностью на всех этапах работ по мирному использованию атомной энергии. МАГАТЭ является официальной организацией ООН, и все страны – члены МАГАТЭ – обязаны выполнять утвержденные ею официальные нормы и правила обращения с источниками ионизирующих излучений, если возникающие при этом вопросы касаются межгосударственных отношений.

Наиболее представительной и авторитетной международной организацией, обобщающей и анализирующей научные данные по действию ионизирующих излучений на организм человека и человечество в целом, является НКДАР ООН. В плане подготовки конкретных рекомендаций для разработки национальных стандартов и регламентов при работе с ионизирующими излучениями такой организацией является МКРЗ, а в плане официальных международных соглашений по вопросам использования атомной энергии – МАГАТЭ.

Вопросами гигиенического нормирования (регламентации) ионизирующих излучений в России занимается научная комиссия по радиационной защите, действующая в качестве консультативного органа при РАМН.

К 2004 году существуют следующие основные регламентирующие документы:

1. Федеральный закон «О радиационной безопасности населения» – ФЗ №3 от 09.01.1996 г.
2. Федеральный закон «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» – ФЗ №52 от 30.03.1999 г.
3. «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности» – ОСПОРБ-99 г.
4. «Нормы радиационной безопасности» – НРБ-99 г.

НРБ-99 являются основополагающим документом, регламентирующим требования Федерального закона «О радиационной безопасности населения» – ФЗ №3 от 09.01.1996 г.

Нормы устанавливают, что обеспечение радиационной безопасности основывается на 3 принципах:

Принцип нормирования – непревышение допустимых пределов индивидуальных доз облучения граждан от всех источников излучения.

Принцип обоснования – запрещение всех видов деятельности по использованию источников излучения, при которых полученная для человека и общества польза не превышает риск возможного вреда, причиненного дополнительным облучением.

Принцип оптимизации – поддержание на возможно низком и достижимом уровне, с учетом экономических и социальных факторов, индивидуальных доз облучения и числа облучаемых лиц.

Нормы (НРБ-99) распространяются на облучение человека:

- в условиях радиационной аварии;
- от природных источников облучения;
- при облучении в медицинских целях.

Для нормальных условий работы источников излучения установлены три категории облучаемых лиц: персонал, подразделяемый на группы А и Б, и население, которое включает и лиц из персонала, но вне сферы их производственной деятельности.

Устанавливаются три класса нормативов.

Основные пределы доз для персонала и населения. Для персонала группы Б основные пределы доз равны 1/4 значений для персонала группы А. Пределы годовой эффективной дозы, приведенные в таблице 29 не должны превышать и в случаях одновременного воздействия на человека источников внешнего и внутреннего облучения.

По нормам радиационной безопасности (НРБ-99) установлены основные пределы доз (табл. 29)

Таблица 29 – Основные пределы доз для персонала и населения

| Нормируемые величины | Пределы доз | |
|------------------------------|--|--|
| | персонал (группа А) | население (группа В) |
| Эффективная доза | 20 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв в год | 1 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 5 мЗв в год |
| Эквивалентная доза за год в: | | |
| хрусталике глаза | 150 | 15 |
| коже | 500 | 50 |
| кистях и стопах | 500 | 50 |

Эффективная доза для персонала не должна превышать за период трудовой деятельности (50 лет) 1000 мЗв, а для населения за период жизни (70 лет) – 70 мЗв. Начало периодов вводится с 1 января 2000 года.

Для женщин в возрасте до 45 лет, работающих с источниками излучения, вводятся дополнительные ограничения: эквивалентная доза на поверхности нижней части области живота не должна превышать 1 мЗв/мес, а поступление радионуклидов в организм за год не должно быть более 1/20 предела годового поступления для персонала. В этих

условиях эквивалентная доза облучения плода за 2 мес. невыявленной беременности не превысит 1 мЗв. Для сравнения приведем дозы, получаемые жителями Москвы за одну рентгенодиагностическую процедуру в 1999 г.: при рентгенографии – 1,33 мЗв; рентгеноскопии – 5,02 мЗв; флюорографии – 0,6; компьютерной томографии – 3 мЗв. Наибольшую дозу человек получал при обзорной рентгенографии почек и урографии – 46 мЗв. В среднем на одного жителя эффективная годовая доза составила 2 мЗв.

Основные дозовые пределы приведены в единицах эквивалентной дозы (Зв), используемой при радиационном нормировании и оценке опасности хронического воздействия ионизирующего излучения произвольного состава.

Эквивалентную дозу (H) в органе или ткани определяют из уравнения:

$$H = D \times W_R,$$

где D – средняя поглощенная доза в органе или ткани,

W_R – взвешивающий коэффициент для излучения R . При воздействии нескольких видов излучения с различными взвешивающими коэффициентами эквивалентная доза определяется как сумма эквивалентных доз. Взвешивающие коэффициенты для отдельных видов излучений, учитывающие их относительную эффективность в индуцировании биологических эффектов, представлены ниже. Эффективная доза для персонала не должна превышать за период трудовой деятельности (50 лет) 1000 мЗв, а для населения за период жизни (70 лет) – 70 мЗв (начало периодов вводится с 1 января 2000 г.).

Помимо перечисленных понятий, в радиационной безопасности широко используются термины годовой и коллективной эффективной или эквивалентной дозы.

Годовая эффективная (эквивалентная) доза – это сумма эффективной (эквивалентной) дозы внешнего облучения, полученной за календарный год, и ожидаемой дозы внутреннего облучения, обусловленной поступлением за этот же год в организм радионуклидов.

Коллективная эффективная доза – это мера коллективного риска возникновения стохастических эффектов облучения, равная сумме индивидуальных коллективных доз; она измеряется в человеко-зивертах (чел. \times Зв).

Единицей эффективной дозы также является зиверт (Зв).

Взвешивающие коэффициенты (W_T), используемые для учета различной чувствительности органов и тканей в возникновении стохастических эффектов радиации, приведены ниже.

Допустимые уровни монофакторного воздействия (для одного радионуклида, пути поступления или одного вида внешнего облучения), они являются производными от основных пределов доз: пределов годового поступления радионуклидов (ППП), допустимой среднегодовой объемной активности (ДОА) и среднегодовой удельной активности (ДУА) и др.

Контрольные уровни (дозы, уровни, активности, плотности потоков и др.). Их значения должны учитывать достигнутый в организации уровень радиационной безопасности и обеспечивать условия, при которых радиационное воздействие будет ниже допустимого.

Особые меры предосторожности требуются при работе с радиоактивными препаратами в лабораториях, где обслуживающий персонал подвергается ежедневному длительному воздействию ионизирующего излучения. При работе с альфа-излучающими препаратами особого экранирования не требуется, поскольку пробег альфа-частиц в воздухе не превышает нескольких сантиметров. В этом случае достаточной мерой защиты можно считать удаление от источника радиации. Для защиты от бета-излучения необходимы не очень толстые экраны из материалов, не содержащих тяжелые элементы (во избежание возникновения тормозного излучения). Наиболее подходящий материал для защиты от бета-лучей – оргстекло. Для изоляции персонала от гамма-квантов требуются толстые экраны (желательно свинцовые).

Следует строго контролировать время пребывания людей вблизи источников радиоактивного излучения.

Предельно допустимые концентрации радионуклидов (ПДК) в почвах, воде, воздухе, продуктах питания и в организме человека, а также предельно допустимые дозы облучения для разных категорий населения приведены в специальном справочнике «Нормы радиационной безопасности» (НРБ-99) и в «Основных санитарных правилах обеспечения радиационной безопасности» (ОСПОРБ-99).

Основную дозу облучения население получает от естественных источников радиации. Поскольку современный человек проводит большую часть времени в помещениях, то радиационный фон внутри зданий играет первостепенную роль в облучении людей. Поле гамма-излучения внутри помещений в основном создается строительными материалами, используемыми для сооружения зданий. Среднемировое значение объемной активности изотопов радона в воздухе жилых помещений составляет 50 Бк/м^3 . Среднемировая величина годовой эффективной дозы облучения населения за счет изотопов радона и его короткоживущих дочерних продуктов распада равна $1,26 \text{ мЗв/год}$. Для населения России эта доза значительно выше – $1,89 \text{ мЗв/год}$. В первую очередь это зави-

сит от конструкции жилых и общественных зданий, подчиняющихся климатическим условиям. В свою очередь климатические условия имеют широтную зависимость. Таким образом, объемная активность изотопов радона в закрытых помещениях возрастает с увеличением широты местности. Территория России находится в высоких широтах, поэтому для нее характерны довольно большие значения объемной активности радона в воздухе закрытых помещений.

Пригодность природных материалов, а также отходов промышленности для изготовления строительных материалов оценивается с помощью *удельной эффективной активности* естественных радионуклидов, которая определяется по формуле:

$$A_{\text{эфф.}} = A_{\text{Ra}} + 1,31A_{\text{Th}} + 0,085A_{\text{K}},$$

где A_{Ra} и A_{Th} – удельные активности радия-226 и тория-232, находящиеся в равновесии с остальными членами уранового и ториевого естественных рядов;

A_{K} – удельная активность калия-40 (Бк/кг).

Нормы радиационной безопасности рекомендуют применять для строительства зданий материалы с активностью менее 370 Бк/кг, для дорожного строительства в пределах населенных пунктов – менее 740 Бк/кг, для дорожного строительства вне населенных пунктов – менее 1500 Бк/кг. При $1500 \text{ Бк/кг} < A_{\text{эфф.}} < 4000 \text{ Бк/кг}$ вопрос об использовании материалов решается по согласованию с федеральным органом Госсанэпиднадзора. При $A_{\text{эфф.}} > 4000 \text{ Бк/кг}$ материалы не должны использоваться в дорожном строительстве. Нормативы пригодности минерального сырья для строительства желательно применять еще на стадии поисков и разведки месторождений. Согласно Нормам радиационной безопасности максимальная интенсивность гамма-излучения в помещениях не должна превышать мощность дозы на открытой местности более чем на 0,2 мкЗв/ч (20 мкР/ч).

В таблице 30 приведены данные по радиоактивности горных пород, которыми можно пользоваться при подборе природного материала для строительства. Максимальной удельной эффективной активностью обладают щелочные и кислые магматические породы (сиениты и граниты), которые не желательно использовать для сооружения зданий. Минимальное количество радионуклидов будет содержать щебень, приготовленный из ультраосновных и основных горных пород, а также известняков и мраморов (карбонатные породы). Для строительства зданий предпочтительнее еще применение строительных материалов из ультраосновных и основных магматических пород и, с другой стороны – они обладают высокой плотностью, а значит эффективнее защищают помещение от внешних источников радиации.

Таблица 30 – Ориентировочная радиоактивность горных пород, применяемых в строительстве

| Горные породы | Удельная активность, Бк/кг | | | |
|------------------|----------------------------|--------|------|-------------------|
| | Ra-226 | Th-232 | K-40 | A _{эфф.} |
| Сиениты | 150 | 160 | 850 | 431 |
| Граниты | 130 | 140 | 800 | 381 |
| Плагииграниты | 80 | 85 | 210 | 209 |
| Базальты, габбро | 30 | 40 | 180 | 94 |
| Пироксениты | 20 | 8 | 170 | 45 |
| Известняки | 25 | 10 | 50 | 42 |
| Мраморы | 26 | 12 | 55 | 46 |
| Песок кварцевый | 15 | 11 | 170 | 42 |
| Песок аркозовый | 40 | 43 | 440 | 133 |

Основную активность обуславливают радиоактивные газы: радон и торон. Поставщиками радиоактивных газов являются стены, сооруженные из природных строительных материалов, а на первых этажах существенная роль в накоплении радона принадлежит горным породам, подстилающим здание, которые непрерывно эмануруют.

Выделение радона из стен внутрь помещения можно уменьшить соответствующей отделкой (окраска стен, покрытие их обоями, пластиком и другими искусственными материалами), а также тщательной изоляцией пола первого этажа от подстилающих здание горных пород. Важное значение для уменьшения дозы облучения от радона имеет вентиляция и проветривание жилых и производственных помещений.

Таблица 31 – Требования НРБ-99 по ограничению облучения людей от радона и торона

| Величины | Значения нормируемого показателя | Эффективные дозы за год |
|---|----------------------------------|-------------------------|
| <i>Нормы для персонала группы А, работающего с радоном, чел. /год</i> | | |
| Допустимая среднегодовая объемная активность (ДОА) в воздухе ¹ : Rn: ДОА = 0,10 A RaA + 0,52 A RaB + 0,38 A RaC | 1 200 Бк/м ³ | 20 мЗв |
| Tn: ДОА = 0,91 A TnB + 0,09 A TnC | 270 Бк/м ³ | 20 мЗв |
| Пределы годового поступления (ПГП): Rn: ПГП = 0,10П _{RaA} + 0,52П _{RaB} + 0,38П _{RaC} | 3,0 МБк | 20 мЗв |
| Tn: ПГП = 0,91П _{TnB} + 0,09П _{TnC} | 0,68 МБк | 20 мЗв |

Продолжение табл. 31

| Величины | Значения нормируемого показателя | Эффективные дозы за год |
|---|----------------------------------|-------------------------|
| <i>Нормы для любых работников в производственных условиях, чел./год</i> | | |
| Предел дозы на рабочих местах от всех естественных источников излучений | 5 мЗв/год | 5 мЗв |
| В том числе при монофакторном воздействии изотопов радона: | | |
| среднегодовая ЭРОА для Rn ² | 310 Бк/м ³ | 5 мЗв |
| среднегодовая ЭРОА для Tn ² | 68 Бк/м ³ | 5 мЗв |
| <i>Нормы для населения, чел./год</i> | | |
| При проектировании новых зданий ЭРОА ³ изотопов радона не должна превышать | 100 Бк/м ³ | 5,3 мЗв |
| В эксплуатируемых зданиях ЭРОА ³ изотопов радона не должна превышать | 200 Бк/м ³ | 11 мЗв ⁴ |

Примечания. 1. При облучениях от различных источников сумма отношений регламентируемой для каждого источника величины к ее годовому пределу не должна превышать единицу.

2. Сумма отношений регламентируемой величины к ее допустимому пределу для всех природных источников не должна превышать единицу.

3. Годовые эффективные дозы для населения рассчитаны с учетом лозовых коэффициентов (в НРБ-99 не указаны).

4. В отмеченных случаях под ЭРОА подразумевается сумма (ЭРОА Rn + 4,6 ЭРОА Tn).

Нормами радиационной безопасности (НРБ-99) допустимое значение эффективной дозы, обусловленной суммарным воздействием природных радионуклидов, для населения не устанавливается, но вводится система ограничений на облучение населения от отдельных природных источников ионизирующего излучения. Так при отводе участков под строительство жилых домов и зданий общественного и производственного назначения необходима проверка территории на мощность дозы гамма-излучения, которая не должна превышать 0,3 мкГр/ч. Плотность потока радона с поверхности почвы не должна превышать 80 мБк/м²·с при строительстве жилых домов и зданий общественного назначения и 250 мБк/м²·с при строительстве производственных зданий. При проектировании новых зданий жилищного и общественного назначения должно быть предусмотрено, чтобы среднегодовая эквивалентная равновесная объемная активность дочерних изотопов радона и торона в воздухе помещений ЭРОА_{Rn} + 4,6 ЭРОА_{Tn} не превышала 100 Бк/м³, а мощность эффективной дозы гамма-излучения не превышала таковую на открытой местности более чем на 0,2 мкЗв/ч.

В эксплуатируемых зданиях среднегодовая эквивалентная равновесная объемная активность дочерних продуктов радона и торона в воздухе жилых помещений не должна превышать 200 Бк/м^3 . При более высоких значениях объемной активности должны проводиться защитные мероприятия, направленные на снижение поступления радона в воздух помещений и усиление их вентиляции. Защитные мероприятия должны проводиться также в случае превышения мощности эффективной дозы гамма-излучения в помещениях по сравнению с открытой местностью на $0,2 \text{ мкЗв/ч}$.

Для своевременного принятия мер против сверхнормативного накопления радиоактивной эманации в воздухе внутри зданий необходимо постоянно или периодически замерять объемную активность радона специальными приборами. Активность радона в пробах воздуха измеряется альфа-радиометрами (радиометрами радона). Для определения объемной активности радона через барботер с активированным углем прокачивается проба воздуха. Находящийся в воздухе радон полностью сорбируется углем. Затем с помощью азота сорбированный радон переводится в вакуумную камеру прибора, где и замеряется его объемная активность в Бк/м^3 . Чувствительность такого метода очень высокая (до $0,01 \text{ Бк/м}^3$). Объемную активность радона можно замерять более производительными, но менее чувствительными методами на гамма-спектрометрах, которые основаны на определении концентрации твердых продуктов распада радона.

Современные приборы позволяют производить непрерывное слежение за активностью эманации с автоматической регистрацией суммарной активности газообразных радионуклидов за равные промежутки времени (например, за 1 час, 1 сутки и т.д.). Результаты слежения выводятся на печатающее устройство или монитор. Кроме того, отечественная промышленность выпускает сигнализатор-экспозиметр радона «СЭР-01» для оповещения об опасном превышении концентрации радона внутри зданий.

Уровень радиоактивности внутри помещений в первую очередь зависит от качества строительных материалов, содержащих естественные радионуклиды. Радиоактивность природных материалов обычно характеризуется *удельной активностью* нормируемых радионуклидов, к которым относятся: радий-226, торий-232 (или торий-228) и калий-40. Удельная активность естественных радионуклидов определяется с помощью гамма-спектрометров, которые работают по принципу сравнения скорости счета от калибровочного источника и исследуемой пробы в стандартных каналах, соответствующих определенным энергетиче-

ским диапазоном гамма-спектра. Обычно гамма-спектрометры настроены на следующие энергетические окна:

- для регистрации калия-40 – 1461 кэВ;
- для регистрации тория-232 – 2600 кэВ;
- для регистрации радия-226 – 1760 и 1120 кэВ.

Источниками облучения населения могут быть материалы и изделия с повышенным содержанием как искусственных, так и естественных радионуклидов. Критерием для принятия решения о возможности применения в хозяйственной деятельности сырья, материалов и изделий, содержащих радионуклиды, является ожидаемая индивидуальная годовая эффективная доза облучения, которая при планируемом виде их использования не должна превышать 10 мкЗв. На использование любых материалов, изделий и сырья с удельной активностью менее 0,3 кБк/кг не вводится никаких ограничений. Сырье, материалы и изделия с удельной бета-активностью от 0,3 до 100 кБк/кг или с удельной альфа-активностью от 0,3 до 10 кБк/кг, или с активностью трансурановых радионуклидов от 0 до 1 кБк/кг подлежат обязательному радиационному контролю и могут ограничено использоваться только с разрешения органов государственного санитарно-эпидемиологического надзора.

В случае аварийных ситуаций на объектах атомной энергетики и техногенных загрязнений население может быть подвергнуто радиационному воздействию в дозах, во много раз превосходящих допустимые уровни. При прохождении *радиоактивного облака* люди подвергаются внешнему облучению и внутреннему действию вдыхаемых радиоактивных газов и пыли. Внутреннее облучение может усиливаться в результате потребления загрязненных радионуклидами воды и пищевых продуктов. Основная роль во внешнем и внутреннем облучении человека в этом случае принадлежит твердым радиоизотопам цезия, стронция, йода, плутония, америция, циркония, бария, рутения, ниобия, а также радиоактивным газам – криптону-85 и ксенону-133.

Таблица 32 – Эффективный период полувыведения искусственных радионуклидов, сутки

| Радионуклид | Орган накопления | $T_{\text{физ}}$ | $T_{\text{биол}}$ | $T_{\text{эфф}}$ |
|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| ^3H (тритий) | все тело | $4,5 \times 10^3$ | 12 | 12 |
| ^{24}Na | все тело | 0,63 | 11 | 0,6 |
| ^{32}P | кости | 14,3 | 1155 | 14,1 |
| ^{131}I | щитовидная железа | 8 | 138 | 7,6 |
| ^{137}Cs | селезенка | $1,1 \times 10^4$ | 140 | 140 |
| ^{210}Po | мышцы | 138,4 | 60 | 42 |

На время прохождения радиоактивного облака необходимо укрыться в помещениях с закрытыми окнами и дверьми или в подвалах.

В дальнейшем рекомендуется прием средств, повышающих устойчивость организма по отношению к радиации (*радиопротекторов*). Особенно важно как можно быстрее ввести в организм стабильный изотоп йода в дозе 125 мг для взрослых и 40 мг для детей и затем повторять эту процедуру ежедневно в течение всего срока пребывания на загрязненной радионуклидами территории (но не более 10 суток для взрослых и 2 суток для детей до 3 лет и беременных женщин). Своевременный прием стабильного изотопа йода может обеспечить 100% защиту щитовидной железы от радионуклида J-131.

Для защиты органов дыхания от радиоактивной пыли следует применять респираторы. Большое значение для защиты тела от радиации имеет личная гигиена, главная цель которой – своевременное удаление с поверхности кожи и одежды радиоактивной пыли. Для этой процедуры рекомендуются дезактивирующие средства в виде паст или обыкновенное хозяйственное мыло.

После прохождения радиоактивного облака происходит загрязнение радионуклидами земной поверхности, а, следовательно, пастбищ, садов, огородов и полей. Постепенно радиоактивные вещества проникают вглубь почвы, откуда впитываются корнями растений, а затем по пищевой цепочке проникают в организм человека. Продвижение радионуклидов по пищевым цепям сопровождается увеличением их концентрации в каждом звене цепи. К примеру, в пищевой цепи арктической зоны, лишайник – олень – человек, концентрация цезия-137 увеличивается в 10 раз. Значительно снижают тяжесть лучевого воздействия так называемые *радиопротекторы* (радиационные защитники). В первую очередь к таким веществам относятся витамины и растения, содержащие в своей структуре большое количество пектинов: гранат, черноплодная рябина, смородина, клюква, свекольный и морковный соки, настойки женьшеня, золотого корня, элеутерококка китайского. На основе природных лекарственных веществ разработаны всевозможные препараты, рекомендуемые в качестве средств защиты при хроническом действии ионизирующих излучений. Ю.Б. Кудряшов и Е.Н. Гончаренко (1999) называют их *адаптогенами*. К числу зооадаптогенов относятся: препарат Турдыева, выделенный из тканей черепахи, ядов змей, пауков, скорпионов. Из фитопрепаратов для профилактики и лечения лучевой болезни рекомендуются микстуры «Ку-шен» и «Кушенсу», выделенные из корней бобовых растений, полисахаридные экстракты из съедобных грибов (в том числе препарат «Джинер»), микстура «ЭЧХЛ» из чисто-

тела, экстракт Као, выделенный из корневища горца многоцветного, и многие другие средства, приготовленные из природного материала.

При проживании в условиях повышенной радиации необходимо сбалансированное питание, обильное питье. Нужно как можно больше употреблять соков, витаминов, грецких орехов, редьку, хрен, чеснок, лук, гречневую и овсяную крупы, творог, масло, сметану. Костные бульоны, холодец, кофе, яйца и косточковые фрукты должны быть исключены из рациона. Очень полезна сауна.

Чтобы правильно выбрать состав дневного рациона при проживании на местности, загрязненной радионуклидами, важно ориентироваться в способности накопления этих элементов различными растениями и организмами разных животных. Особому контролю на содержание радионуклидов подлежит питьевая вода. Нормы радиационной безопасности строго лимитируют содержание искусственных радионуклидов в питьевой воде, создающих эффективную дозу меньше 0,1 мЗв за год, не требуется проведения мероприятий по снижению ее радиоактивности. Этому значению дозы при потреблении воды в количестве 2 кг в сутки соответствуют средние значения удельной активности за год. При совместном присутствии в воде нескольких радионуклидов должно выполняться условие:

$$\sum (A_i : УВ_i) \leq 1,$$

где A_i – удельная активность i -того радионуклида в воде;

$УВ_i$ – соответствующий уровень вмешательства (приведен в табл. П-2 НРБ-99).

Предварительная оценка допустимости использования воды для питьевых целей может быть дана по удельной суммарной альфа- и бета-активности, которая не должна превышать 0,1 и 1,0 Бк/кг соответственно. При обнаружении в воде трития, углерода-14 и тория-232 определение удельной активности этих радионуклидов в воде обязательно. Уровень вмешательства для радона-222 в питьевой воде составляет 60 Бк/кг. Для минеральных и лечебных вод устанавливаются специальные нормы.

В чрезвычайных ситуациях реальное количество радионуклидов в поверхностных водах может превышать эти нормы в десятки и сотни раз. В этих условиях население должно быть оснащено фильтрами коллективного и индивидуального пользования. Для заполнения фильтров применяются тонкодисперсные сорбенты на основе природных цеолитов или искусственных материалов – полипропилена и полиэтиленететрафталата. Эти же сорбенты используют для очистки воды от радионуклидов на водозаборах и водоочистных станциях.

Одной из актуальных проблем современной радиоэкологии является защита населения от распространения радионуклидов через подземные воды. Водоносные горизонты должны быть надежно защищены от источников радиации. Для этого через пробуренные скважины предлагается закачивать полимерный отверждающий реагент «Буретан», который при соприкосновении с водой способен быстро образовывать пластичную каучукообразную массу, которая затем переходит в твердое состояние, создавая водонепроницаемые барьеры (Шарипов, 1999).

2.6.2. Принципы радиозащитного питания

Важнейшим фактором предотвращения накопления радионуклидов в организме людей является питание. Установлено, что обогащение рациона рыбой, кальцием, фтором, витаминами А, Е, С, которые являются антиоксидантами, неусвояемыми углеводами (пектинами) способствует снижению риска онкологических заболеваний, играет важную роль в профилактике радиоактивного воздействия наряду с радиопротекторами. Основные положения современной концепции радиозащитного питания представлены на рисунке 9.



Рис. 9. Современная концепция радиозащитного питания

Они базируется на следующих положениях:

- а) максимально возможное уменьшение поступления радионуклидов с пищей;
- б) торможение процессов сорбции (всасывания) и накопления радионуклидов в организме;
- в) соблюдение основных принципов рационального питания.

Раздел 3

БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

В развитии поражения после воздействия ионизирующих излучений выделяют несколько стадий: физическую, физико-химическую, химическую и биологическую (табл. 33).

Таблица 33 – Основные стадии в действии ионизирующих излучений на биологические системы

| Стадия | Процессы | Продолжительность |
|-------------------|---|---------------------------|
| Физическая | Поглощение энергии излучения; образование ионизированных и возбужденных атомов и молекул | 10^{-16} - 10^{-15} с |
| Физико-химическая | Перераспределение поглощенной энергии внутри молекул и между ними, образование свободных радикалов | 10^{-14} - 10^{-11} с |
| Химическая | Реакции между свободными радикалами и интактными молекулами. Образование широкого спектра молекул с измененными структурами и функциональными свойствами | 10^{-6} - 10^{-3} с |
| Биологическая | Последовательное развитие поражения на всех уровнях биологической организации: от субклеточного до организменного; развитие процессов биологического усиления и репарационных процессов | Секунды – годы |

3.1. ФИЗИЧЕСКАЯ СТАДИЯ

Содержание физической стадии составляют процессы поглощения энергии и образования ионизированных и возбужденных молекул. В облученной клетке возбужденными и ионизированными могут в равной степени оказаться белки и углеводы, нуклеиновые кислоты и липиды, молекулы воды и различных низкомолекулярных органических и неорганических соединений. В живых клетках органическими и неорга-

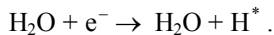
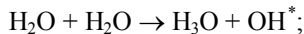
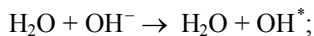
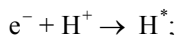
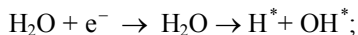
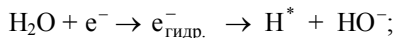
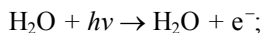
ническими (кроме воды) молекулами поглощается около 25% энергии, а водой – 75%.

Процессы, протекающие на физической стадии, осуществляются в течение короткого времени – 10^{-16} - 10^{-15} с. Они завершаются образованием возбужденных и ионизированных молекул.

3.2. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ СТАДИЯ

В течение физико-химической стадии поглощенная молекулами энергия реализуется разрывами химических связей и образованием свободных радикалов, которые характеризуются наличием неспаренного электрона, что является причиной их чрезвычайно высокой химической активности.

Как уже говорилось, в живых системах около 75% энергии излучения поглощается водой. В результате этого образуются продукты радиолиза воды:



При ионизации воды образуются положительно заряженный ион H_2O^+ и электрон (e^-), который после замедления при прохождении через вещество либо рекомбинирует с образованием воды ($e^- + \text{H}_2\text{O}^+ \rightarrow \text{H}_2\text{O}$), либо образует отрицательно заряженный ион H_2O^- ($\text{H}_2\text{O} + e^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}^-$). Ионы H_2O^+ и H_2O^- неустойчивы и разлагаются, образуя стабильные ионы H^+ и OH^* , которые могут рекомбинировать с образованием молекул воды, и свободные радикалы H^* и OH^* ($\text{H}_2\text{O}^+ \rightarrow \text{H}^+ + \text{OH}^*$ или $\text{H}_2\text{O}^- \rightarrow \text{OH}^- + \text{H}^*$).

Среди основных продуктов радиолиза воды должен быть назван и гидратированный электрон ($e^-_{\text{гидр.}}$). Теряющий в конце пробега свою ки-

нетическую энергию, электрон как бы захватывается расположенными рядом молекулами воды, которые соответствующим образом ориентируются вокруг него. Эта структура и получила наименование «гидратированный электрон».

Гидроксильный радикал OH^* , образующийся в процессе радиолиза воды, выступает как очень сильный окислитель. Радикал водорода и гидратированный электрон обладают высокой реакционной способностью как восстановители.

Продукты радиолиза воды живут в воде не более 10^{-5} с. За это время они или рекомбинируют друг с другом, или вступают в химические реакции с другими молекулами, находящимися в системе.

Перераспределение возбужденными молекулами избыточной энергии, их диссоциация и образование в результате ионов и радикалов, обладающих весьма высокой химической активностью, и составляет сущность физико-химической стадии в действии излучений.

Продолжительность ее составляет около 10^{-14} - 10^{-11} с.

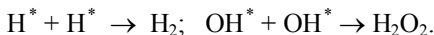
3.3. ХИМИЧЕСКАЯ СТАДИЯ. ПРЯМОЕ И НЕПРЯМОЕ ДЕЙСТВИЕ РАДИАЦИИ

Во время химической стадии образовавшиеся ранее высокоактивные свободные радикалы вступают в реакции между собой и с интактными молекулами, в результате чего возникают разнообразные повреждения молекул. Если повреждение биомолекул происходит в результате непосредственного поглощения ими энергии излучения, принято говорить о **прямом действии** радиации. Если же биомолекулы повреждаются в результате их химического взаимодействия с продуктами радиолиза воды, говорят о **непрямом действии** радиации.

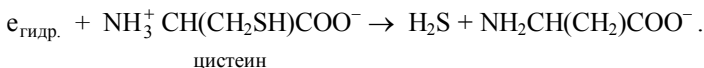
К химически высокорективным продуктам, образовавшимся на физико-химической стадии, относятся прежде всего радикалы OH^* и H^* и гидратированный электрон ($e_{\text{гидр.}}^-$). При взаимодействии первичных продуктов радиолиза воды с кислородом образуются новые продукты, такие как ионы H_3O^+ и пероксид водорода H_2O_2 , а также супероксидный анион-радикал O_2^- и гидропероксид HO_2^* , обладающие даже более высокой реакционной способностью, чем первичные радикалы.

Гидроксильный радикал HO^* является самым сильным окислителем, образующимся при радиолизе воды, радикал водорода H^* и $e_{\text{гидр.}}^-$ – сильные восстановители, пероксид водорода – слабый окислитель.

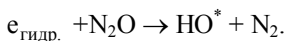
Образовавшиеся при радиоллизе воды радикалы OH^* и H^* могут вступать во взаимодействие друг с другом с образованием молекулярного водорода H_2 и пероксида водорода H_2O_2 :



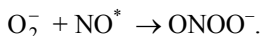
Гидратированный электрон вступает в реакции восстановления. Пример такой реакции представлен ниже:



В случае наличия в воде закиси азота гидратированные электроны превращаются в гидроксильный радикал:



Эндогенный оксид азота NO, основной регулятор локальной регуляции тонуса артериальных сосудов, является также радикалом и активно взаимодействует с супероксид-анион-радикалом O_2^- с образованием пероксинитрит-аниона:

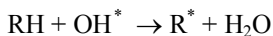


Пероксинитрит, являясь токсическим веществом, способным повреждать белки и ДНК, при своем распаде вновь образует высокореактивные продукты – гидроксильный радикал HO^* , диоксид азота NO_2 и нитроний ион NO^{2+} .

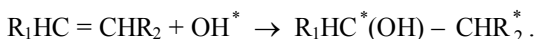
Продукты радиолиза воды способны вызвать практически все типы структурных повреждений, которые наблюдаются при прямом действии радиации. Непрямое действие радиации определяется содержанием в макромолекулах структурированной воды, когда поглощенная энергия при радиоллизе воды может достигнуть важных надмолекулярных структур клетки и вызвать в них изменения. Наибольшая радиочувствительность среди органических веществ свойственна фосфолипидам, составляющим структурную основу клеточных мембран.

Так, гидратированный электрон способен присоединяться к органическим молекулам с образованием анион-радикала R^* , который характеризуется относительно высокой стабильностью. При воздействии продуктов радиолиза воды на аминокислоты, белки, углеводы, нуклеотиды, ДНК, фосфолипиды могут образовываться радикалы растворенных веществ.

В частности, при взаимодействии биомолекул с гидроксильным радикалом HO^* происходит отщепление водорода от органического вещества:

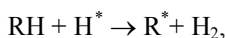


или, при наличии двойных ненасыщенных связей в веществе, их разрыв:

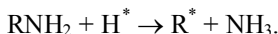


В результате реакций с участием OH^* образуются нестабильные продукты, включая радикалы с большой реакционной способностью.

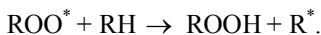
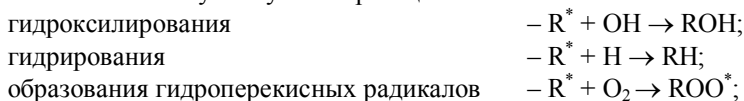
При взаимодействии с органическими веществами радикала водорода H^* происходит отщепление водорода:



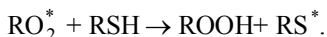
а при наличии свободной аминогруппы все завершается дезаминированием:



Образующиеся в результате как прямого, так и непрямого действия радиации органические радикалы обладают высокой реакционной способностью. Они могут вступать в реакции:



Соединяясь с кислородом, органические радикалы образуют пероксидные радикалы типа RO_2^* , которые, в свою очередь, могут переходить в гидроперекиси, отщепляя водород от других соединений:



Органические радикалы, вступая в разнообразные реакции, чаще всего инактивируются. Однако образовавшийся в результате облучения свободный радикал может прореагировать с нормальным радикалом, участвующим в важной ферментативной реакции, и инактивировать его. В этом случае повреждающее действие радикалов может быть связано с ингибированием соответствующей реакции.

Продолжительность химической стадии составляет 10^{-6} - 10^{-3} с.

3.4. МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ, ВОЗНИКАЮЩИЕ В КЛЕТКАХ

В результате процессов, происходящих на первичных стадиях действия излучений, изменения могут возникнуть в любых молекулярных структурах, входящих в состав живой клетки.

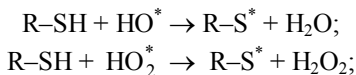
К наиболее биологически значимым повреждениям должны быть отнесены в первую очередь нарушения структуры ДНК. Прежде всего, это повреждения оснований, выщепление отдельных оснований из цепи, разрушение фосфоэфирных связей, лежащее в основе одиночных и двойных разрывов цепочек ДНК, распад дезоксирибозы, повреждения ДНК-мембранного комплекса, разрушение водородных связей, нарушение связей ДНК-белок, повышающее атакуемость ДНК вторичными радикалами и ферментами, сшивки ДНК-ДНК и ДНК-белок.

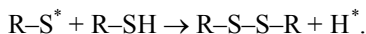
Аналогичные радиационно-химические изменения наблюдаются и в облученной РНК. Разница состоит лишь в том, что в РНК, в связи с ее одонитчатой структурой, не может быть двунитевых разрывов.

Не менее значимыми для жизнедеятельности клетки являются и вызванные прямым или непрямым действием радиации повреждения белка. В белковых молекулах участками, в которых чаще всего реализуется поглощенная энергия, являются тиоловые и дисульфидные группировки, а также аминокислоты, содержащие спаренные циклы (триптофан, фенилаланин, тирозин). В результате, хотя все аминокислоты поглощают энергию облучения с равной вероятностью, в конце физико-химической стадии некоторые из них оказываются избирательно пораженными.

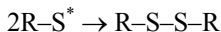
При смертельных уровнях облучения (6-10 Гр) инактивация белков и ферментов незначительна и не обнаруживается сразу после облучения. Образующиеся в присутствии кислорода и воды свободные радикалы могут приводить к разрыву пептидной связи, образованию амида, кетокислоты и гидроперекисного радикала. Все это приводит к нарушению структуры белка: разрыву дисульфидных мостиков, водородных связей, пептидной цепи, образованию сшивок между пептидными цепями, отщеплению аммиака, сероводорода, окислению сульфгидрильных групп и ароматических аминокислот, к конформационным изменениям вторичной и третичной структуры белка.

В частности, возникают реакции окисления белковых SH-групп, которые нередко протекают по цепному механизму с образованием дисульфидов:

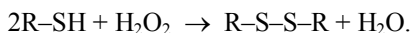




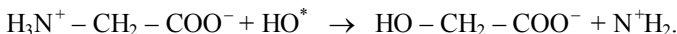
Кроме того, дисульфиды могут образовываться путем рекомбинации появляющихся при облучении радикалов $R-S^*$:



или в результате взаимодействия тиолов с H_2O_2 :

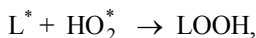
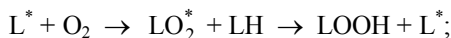


Радиационно-химические повреждения структуры белка могут возникать и в результате реакций дезаминирования:



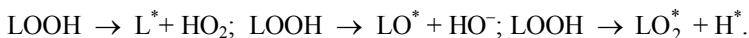
Радиационно-химические изменения белков, прежде всего изменения их вторичной и третичной структуры, могут привести к изменению биологических свойств, в том числе ферментативной активности.

В липидной фракции первичные изменения при воздействии ионизирующей излучений состоят в образовании свободных радикалов, которые, взаимодействуя с кислородом, являются источником возникновения перекисных соединений. Последние в свою очередь могут вступать в реакцию с жирами, в результате чего образуются гидроперекиси:



где L^* – радикал липида.

Гидроперекиси очень нестойки и при наличии ионов металлов с переменной валентностью легко распадаются с образованием ряда высокоактивных радикалов:



Образовавшиеся радикалы могут дать толчок к развитию цепных реакций окисления, в том числе перекисного окисления липидов.

Перекисные соединения разрушаются в дальнейшем с образованием оксикислот, альдегидов и других продуктов окисления жиров. При облучении большими дозами радиации происходит декарбоксилирование жирных кислот и даже их распад.

Важные последствия лучевых повреждений структуры липидов проявляются в нарушении строения клеточных мембран. Вовлечение липидов мембран в процессы перекисного окисления может вызывать деструкцию липопротеидных комплексов, что служит причиной изменения проницаемости мембран, смещения ионных градиентов в клетке,

нарушения процессов адсорбции и активного транспорта ряда веществ. Нарушаются также процессы окислительного фосфорилирования, нормальное течение которых обеспечивается упорядоченной локализацией ферментов на мембранах. Повреждение мембран лизосом приводит к выходу и активации гидролитических ферментов.

Продукты перекисного окисления ненасыщенных жирных кислот вследствие обнаруженных у них радиомиметических свойств (способность вызывать разрывы цепей ДНК, возникновение хромосомных aberrаций, подавление репарации повреждений ДНК) получили наименование *первичных* или *липидных радиотоксинов*, и им отводится существенная роль в дальнейшем развитии лучевого поражения клетки. К первичным радиотоксинам относят также обнаруживаемые в облучаемых клетках *хиноны* и *семихиноны* – продукты окисления фенолов (по Ю.Б. Кудряшову, 2001).

Изменения структуры **углеводов** наблюдаются преимущественно при воздействии высоких доз ионизирующих излучений. Они сводятся к деполимеризации и окислению полисахаридов, что приводит к распаду углеводородной цепи и образованию кислоты формальдегида. Среди продуктов распада углеводов могут обнаруживаться глиоксаль и гиалуроновые кислоты. Довольно существенное значение для развития изменений в соединительнотканых структурах имеет распад мукополисахаридов, в частности, гиалуроновой кислоты.

По степени проявления морфологических изменений клетки и ткани млекопитающих, т.е. по степени возрастания радиочувствительности можно расположить в следующем порядке: нервная ткань, хрящевая и костная ткань, мышечная ткань, соединительная ткань, щитовидная железа, пищеварительные железы, легкие, кожа, слизистые оболочки, половые железы, лимфоидная ткань и костный мозг.

Таблица 34 – Радиочувствительность клеток по D_0 , Гр

| Виды тканей | D_0 |
|--------------------------------------|---------|
| Лимфоидные клетки | 0,5 |
| Клетки костного мозга (кроветворные) | 0,9-1,0 |
| Клетки эпителии кишечника | 1,3 |
| Клетки спермиогонного эпителиа | 1,7 |
| Эпителии почечных канальцев | 1,5-1,6 |
| Эпителии альвеол молочной железы | 1,3 |
| Фолликулы щитовидной железы | 2,0 |

Примечание. D_0 – доза, при которой доля живых клеток уменьшается в сравнении с исходной в e раз (e – основание натуральных логарифмов = 2,72).

Исходы поражения зародышевых и соматических клеток при воздействии ионизирующей радиации различны. Когда поражаются зародышевые клетки, возникающие мутации (генные и хромосомные) с той или иной скоростью, зависящей от степени доминантности и от степени снижения жизнеспособности, элиминируются (выводятся) из популяции. Но многие мутации, в особенности рецессивные, благодаря генетическому дрейфу и эффекту родоначальника, могут размножаться в популяции и приводить к увеличению числа случаев врожденных уродств, аномалий обмена веществ и т.д.

Мутационные изменения в соматических клетках могут выражаться в гибели клеток или в приобретении клеткой новых наследственных свойств, которые проявляются процессами малигнизации, преждевременного старения клеток и тканей, развитием новообразований.

Резюмируя вышесказанное, можно сказать, что критической мишенью радиационного поражения клеток является ДНК, облучение на клеточном уровне приводит к замедлению прохождения цикла деления клетки, образованию хроматидных и хромосомных аберраций, возникновению микроядер, гибели клеток по апоптотическому и некротическому пути в интерфазе деления и после вступления в митоз.

Мутагенное воздействие ИИ впервые установили отечественные ученые Г.А. Надсон и Г.С. Филиппов в 1925 г. в опытах на дрожжах. В 1927 году это открытие было подтверждено Г. Меллером на классическом генетическом объекте – дрозофиле. ИИ способны вызывать все виды наследственных изменений – **генные, хромосомные, геномные**. Эти изменения носят дозозависимый характер и современными представлениями считается, что любая дополнительная выше природного радиационного фона (ПРФ) доза ИИ, независимо от величины и мощности приводит к опасности кумулятивного генетического эффекта и способна вызвать генетические изменения, поскольку биологическая репарация мутации невозможна (Коглл Дж., 1986).

Таким образом, прямое и косвенное действие ионизирующего излучения на биологические молекулы приводит к тому, что в живом организме отмечается много разных биологических эффектов, наблюдаемых после облучения, которые представлены в таблице 35.

Таблица 35 – Типы радиологических повреждений

| Тип биологической организации | Важнейшие радиационные эффекты |
|-------------------------------|--|
| Молекулярный | Повреждение макромолекул – ферментов, РНК, ДНК, воздействие на обменные процессы |
| Субклеточный | Повреждение клеточных мембран, ядер, хромосом митохондрий и лизосом, высвобождение их ферментов |
| Клеточный | Нарушения деления клеток, их гибель и трансформация, в т.ч. злокачественная |
| Ткани, органы | Нарушения в красном костном мозге, желудочно-кишечном тракте, центральной нервной системе могут привести к радиационным повреждениям и гибели, отдаленным последствиям |
| Организм | Различные виды радиационных последствий, вплоть до летального исхода |
| Популяции | Изменение генетических характеристик вследствие генных, хромосомных мутаций у индивидуумов |

3.5. ДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА КРИТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ОРГАНИЗМА

Критическими системами организма при воздействии ионизирующей радиации являются ткани и органы с интенсивным делением клеток – кроветворная система, органы иммунной системы, гонады, слизистая оболочка желудочно-кишечного тракта и др.

3.5.1. Основные механизмы гемо- и иммунопоэза

Костный мозг – типичный образец системы клеточного обновления, обеспечивающей поддержание постоянства числа клеток с ограниченным периодом жизни, в данном случае – клеток крови. В костном мозге, как и в других органах гемопоэза, различают собственно кроветворные клетки и стромальные элементы, создающие необходимое микроокружение для размножения и развития кроветворных клеток.

В соответствии с признаваемой большинством исследователей унитарной моделью кроветворения родоначальными для всех ростков гемопоэза являются полипотентные стволовые кроветворные клетки. Отличительной их чертой является то, что стволовые клетки способны

делиться неограниченное число раз, воспроизводя себе подобных. Часть же потомков стволовых клеток коммитируется, то есть приобретает способность к дифференцировке в направлении ограниченного числа ростков или даже какого-то одного определенного ростка кроветворения. Проллиферативная активность и способность к самоподдержанию коммитированных стволовых клеток ограничены. Под терминами «стволовой пул» и «стволовой отдел» кроветворной системы понимают совокупность полипотентных и коммитированных стволовых кроветворных клеток (СКК).

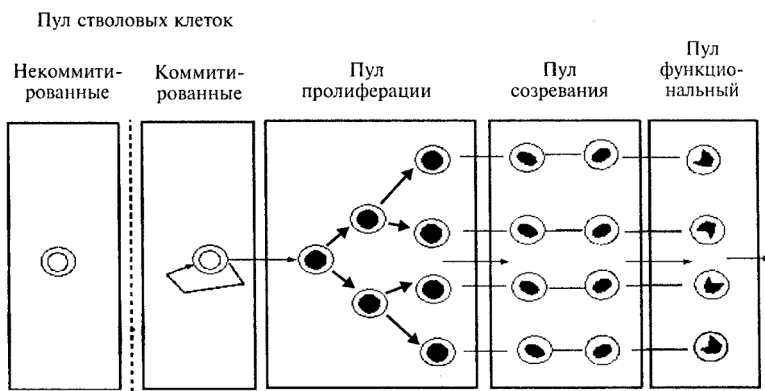


Рис. 10. Схема функционирования систем клеточного обновления (по Т. Флиднеру, 1974)

Считается, что у человека около 0,3-0,7% клеток костного мозга относятся к стволовому пулу. Причем в норме около 90% стволовых клеток находятся в стадии покоя (G₀-стадия) клеточного цикла.

Пройдя ряд делений – стадий созревания, клетки полностью утрачивают свойства стволовых и дают начало уже морфологически распознаваемым клеткам-предшественникам. Последние способны совершить еще несколько делений (обычно 4-5), одновременно созревая, и составляют так называемый *пролиферативно-созревающий (делящийся-созревающий) пул* или отдел. В миелоидном ряду в состав этого пула входят миелобласты, промиелоциты, миелоциты; в эритроидном – эритробласты, пронормоциты, базофильные и полихроматофильные нормоциты и т.д.

Утратив способность к пролиферации, кроветворные клетки продолжают дифференцировку уже без деления и формируют *созревающий*

пул. В миелоидном ряду – это метамиелоциты, отчасти палочкоядерные гранулоциты; в эритроидном – оксифильные нормоциты, ретикулоциты. И лишь завершив созревание, клетки выходят в циркуляцию, образуя *функциональный пул*: сегментоядерные гранулоциты, моноциты, эритроциты, пластинки (отшнуровавшиеся участки цитоплазмы мегакариоцитов). Предшественники лимфоцитов также образуются из полипотентной стволовой кроветворной клетки в костном мозге. В-лимфоциты созревают здесь же, а предшественники Т-лимфоцитов мигрируют в вилочковую железу, где после прохождения иммунологического отбора (гибели клеток, реагирующих на аутоантигены) оставшиеся клетки созревают в корковом веществе. Зрелые Т- и В-лимфоциты поступают в периферическую кровь и многократно мигрируют через вторичные лимфоидные органы (лимфатические узлы, селезенку, миндалины, пейеровы бляшки). Под влиянием антигенных стимулов происходит дифференцировка чувствительных к этим антигенам лимфоцитов, их последующая пролиферация на территориях вторичных лимфоидных органов и созревание (В-лимфоциты частично превращаются в плазматические клетки).

Полагают, что у человека время прохождения гранулоцитов через пролиферативно-созревающий пул составляет 4–6 сут. и примерно столько же времени требуется для прохождения через пул созревания. Эритроциты развиваются в костном мозге в течение 7–8 сут., тромбоциты – 5–7 сут., а моноциты созревают за 55–60 часов. В периферической крови зрелые гранулоциты сохраняются в среднем 8–10 ч, после чего мигрируют в ткани, где существуют еще 1–2 суток. Период жизни в крови эритроцитов составляет 100–120 сут., тромбоцитов – 8–10 сут., а моноциты находятся в функциональном пуле около 30–60 ч (по некоторым данным 12–20 ч), после чего мигрируют в ткани, где трансформируются в макрофаги. Продолжительность жизни лимфоцитов может составлять от нескольких суток до многих десятков лет.

Ежедневно кроветворной тканью человека производится около 12×10^{10} гранулоцитов, 15×10^{10} тромбоцитов, 2×10^{10} лимфоцитов, 24×10^{10} эритроцитов.

Клетки крови осуществляют в организме многие жизненно важные функции.

ГРАНУЛОЦИТЫ (в основном нейтрофилы, но также и эозинофилы, ба-зофилы) содержат многочисленные мембранные структуры и богаты лизосомами. Гранулы нейтрофилов и эозинофилов содержат в большом количестве бактерицидные вещества. В гранулах базофилов содержатся гепарин и вазоактивные амины. Благодаря способности к

хемотаксису и особым рецепторным свойствам гранулоциты быстро и в большом количестве накапливаются в воспалительных очагах, выполняя там свои основные функции: биоцидную (внеклеточный киллинг и фагоцитоз микроорганизмов), цитотоксическую (участие в механизмах противоопухолевого иммунитета) и регуляторную (регуляция процессов воспаления, регенерации тканей и т.п.).

МОНОЦИТЫ, проникая из крови в соединительную ткань, особенно в таких органах, как печень, селезенка, костный мозг, легкие, трансформируются в макрофаги. Тканевые макрофаги вместе с циркулирующими в крови моноцитами формируют так называемую систему мононуклеарных фагоцитов или, по-старому, ретикулоэндотелиальную систему. Клетки этой системы активно фагоцитируют микробы, вирусные частицы, продукты распада клеток, старые эритроциты и другие антигенные материалы, подготавливают антигены для распознавания их лимфоцитами, синтезируют и секретируют ряд медиаторов иммунного ответа (интерферон, лизоцим, простагландины и т.п.) и другие биологически активные вещества. Клетки системы мононуклеарных фагоцитов *активно* вырабатывают интерлейкин-1 (цитокин), как непосредственно *вливающий на пролиферацию и дифференцировку кроветворных клеток, так и стимулирующий размножение фибробластов* и выработку последними колониестимулирующих факторов и ряд других цитокинов.

ТРОМБОЦИТЫ (кровяные пластинки) представляют собой фрагменты цитоплазмы мегакариоцитов. Они играют важнейшую роль в процессе свертывания крови, непосредственно участвуя в образовании кровяного тромбoplastина, ретракции кровяного сгустка и выполняя другие функции. Кроме того, они обладают ангиотрофической или эндотелий поддерживающей функцией, способствуют сохранению нормальной структуры сосудистой стенки, ее резистентности и непроницаемости для эритроцитов. Краевое стояние тромбоцитов обеспечивает прикрытие межэндотелиальных щелей в стенках капилляров, а фрагменты тромбоцитов включаются в цитоплазму эндотелиальных клеток, обеспечивая снабжение последних необходимыми субстратами. Тромбоциты также образуют «пробки» у мест повреждения сосудистого эндотелия и транспортируют туда необходимые для свертывания факторы. Кроме того, тромбоциты принимают участие в воспалительной реакции, освобождая бактерицидные продукты.

ЛИМФОЦИТЫ являются важнейшими компонентами системы специфической защиты организма – иммунитета. Основной функцией *B-лимфоцитов*, как и их потомков – плазматических клеток, является

участие в реакциях гуморального иммунитета: продукция и секреция иммуноглобулинов – специфических антител против различных антигенов.

T-лимфоциты участвуют в осуществлении клеточного иммунитета путем непосредственного контакта с клетками-мишенями (реакции трансплантационного иммунитета, гиперчувствительности замедленного типа и др.). Кроме того, специализированные группы *T-лимфоцитов* (*супрессоры* и *хелперы*) участвуют в осуществлении кооперативного взаимодействия клеток разного типа в реакциях как клеточного, так и гуморального иммунитета, стимулируя или, наоборот, подавляя эти реакции.

К группе Т-лимфоцитов относятся и клетки, влияющие на направление дифференцировки и процессы миграции стволовых клеток, на процесс послелучевого восстановления костномозгового кроветворения. Кроме того, Т-лимфоциты способны вырабатывать интерлейкин-3, важный регулятор пролиферативной активности стволовых кроветворных клеток.

ЕК-клетки (естественные клетки-киллеры) препятствуют возникновению злокачественных опухолей, вирусных и других инфекционных заболеваний. Они обладают способностью спонтанно, то есть без предварительной сенсбилизации антигеном, и без ограничений, связанных с молекулами главного комплекса гистосовместимости, убивать опухолевые, вирусинфицированные и другие виды аномальных клеток. Осуществляя иммунологический надзор, ЕК-клетки организуют «первую линию защиты» против роста опухолей, метастазов, развития лейкемии, вирусных и других инфекционных заболеваний в организме до того периода, пока в борьбу не вступят антигенспецифические факторы иммунитета.

Эритроциты являются переносчиками кислорода и углекислоты, обеспечивая тем самым тканевое дыхание. Они также выполняют важную роль в поддержании кислотно-щелочного баланса организма.

3.5.2. Влияние облучения на процесс костномозгового кроветворения

Как уже отмечалось выше, наиболее ранней реакцией миелокариоцитов на облучение является временное прекращение деления клеток.

Часть клеток стволового отдела (тем большая, чем выше доза) утрачивает пролиферативную активность практически сразу после облуче-

ния. Поскольку морфологически стволовые клетки распознать не удастся, нельзя утверждать, что речь идет об истинной гибели стволовых клеток. Возможно, они лишь перестали делиться или вышли в дифференцировку. Однако с точки зрения возможности выполнения стволовыми клетками своей основной функции, утратившие пролиферативную активность клетки можно рассматривать как погибшие. По этому показателю стволовые клетки могут быть отнесены к числу наиболее радиочувствительных.

Как видно из таблицы 36, наибольшая радиочувствительность отмечается у стволовых и коммитированных клеток (D_0 от 1,5 до 1,9 Гр). Миелобласты более устойчивы к действию радиации ($D_0 = 3,0-3,5$ Гр), а промиелоциты и миелоциты весьма радиорезистентны (D_0 равно 8,5 и 10,0 Гр соответственно). Для эритробластов D_0 составляет около 1 Гр, для базофильных нормобластов – 0,5 Гр, полихроматофильных нормобластов – 4,7 Гр, оксифильных нормобластов – 8,3 Гр, для ретикулоцитов – 12,9 Гр. Зрелые клеточные элементы крови (лейкоциты, тромбоциты и эритроциты) достаточно устойчивы к действию ионизирующего излучения ($D_0 > 15$ Гр), и изменение их количественного содержания в крови после облучения связано только с естественным процессом их убыли после завершения жизненного цикла и отсутствием поступления в периферическую кровь новых зрелых клеток.

Таблица 36 – Радиочувствительность клеток кроветворной ткани человека (по данным Г.П. Груздева и соавт., 1992, 1994, 1996)

| Субпопуляции костного мозга | D_0 , Гр | | |
|-----------------------------|----------------------|-------------|-------------------|
| | ростки кроветворения | | |
| | миелоидный | эритроидный | мегакариоцитарный |
| Стволовые клетки | 1,6-1,7 | 1,6-1,7 | 1,6-1,7 |
| Коммитированные | 1,9 | 1,5-1,7 | 1,6-1,7 |
| Бластные формы | 3,0-3,5 | 0,5-4,7 | – |
| Созревающий пул | 10,0 | 12,9 | 12,0 |
| Зрелые клетки | > 15,0 | > 15,0 | > 15,0 |

Продолжительность блока митозов в клетках пролиферативно-созревающего отдела тем дольше, чем выше доза облучения. Часть этих клеток погибает в интерфазе или после восстановления деления в одном из ближайших митозов.

Клетки созревающего отдела при облучении практически не погибают. Созревание клеток и выход их в периферическую кровь продол-

жаются в том же темпе, что и без облучения. Мало меняется и продолжительность жизни зрелых клеток функционального отдела. В результате в костном мозге быстро убывает число клеток, вначале наименее дифференцированных, а затем все более зрелых, так как естественная их убыль не компенсируется в достаточной степени поступлением новых клеток из истощенных предшествующих отделов.

После первичного опустошения, прогрессирующего приблизительно в течение недели, следующей за облучением, наблюдается кратковременное увеличение их числа. Это так называемый «абортный подъем», который объясняют тем, что сохранившие жизнеспособность клетки пролиферирующего отдела (возможно, и частично поврежденные, но способные к некоторому количеству делений стволовые клетки) после возобновления митотической активности обеспечивают некоторое повышение клеточности костного мозга. Однако этот источник при отсутствии пополнения из стволового отдела быстро истощается, и абортный подъем сменяется прогрессирующим снижением числа клеток (вторичное опустошение).

Истинное восстановление костномозгового кроветворения в облученном организме происходит на основе пролиферации сохранивших жизнеспособность СКК. Характерно, что в начале процесса восстановления стволовые клетки пролиферируют, воспроизводя себе подобных, и практически не выходят в следующие пулы (так называемый «блок на дифференцировку»). И лишь когда их число достигнет уровня, приближающегося к нормальному, начинается поступление клеток в пролиферативно-созревающий отдел. Поэтому, чтобы началось восстановление числа клеток в периферической крови, требуется довольно длительное время, необходимое для самовоспроизведения популяции стволовых клеток, прохождения через пролиферативно-созревающий и созревающий отделы. И только по завершении этих этапов потомки сохранившихся стволовых клеток начинают поступать в периферическую кровь (если, конечно, до этого организм не погибнет).

Чем больше СКК сохранило жизнеспособность, тем раньше начнет восстанавливаться число функциональных клеток в крови. Количество сохранившихся стволовых клеток зависит от дозы облучения и их радиочувствительности.

В опытах на мышах показано, что процесс кроветворения может восстановиться, а часть животных выжить, даже если после облучения сохранит жизнеспособность лишь одна стволовая клетка из тысячи. Помимо количества сохранившихся клеток стволового отдела, возможность и скорость восстановления кроветворения зависят от уровня про-

лиферагивной активности (скорости деления) этих клеток, темпов деления и созревания в отделах морфологически распознаваемых предшественников. Показано, что после облучения темп пролиферации стволовых клеток усиливается, вследствие чего время удвоения их числа сокращается с 5-6 сут. до 1 суток.

Глубина и продолжительность аплазии кроветворной ткани оказывается тем больше, чем выше доза облучения. Однако из этого правила имеются исключения. После облучения в высоких дозах (у человека – 5,5 Гр) темп восстановления миелоидного ростка кроветворения оказывается существенно выше, и количество клеток в костном мозге и крови восстанавливается до контрольного уровня раньше, чем после воздействия в дозах 2-3 Гр, несмотря на то что степень опустошения в первом случае была гораздо сильнее. Причина этого явления не вполне ясна.

В случае неравномерного облучения или полного экранирования отдельных участков тела поражение органов кроветворной системы модифицируется за счет миграции клеток из менее облученных отделов. Этот механизм обеспечивает более быструю репопуляцию облученных органов, чем при общем равномерном облучении.

Стромальные элементы костного мозга довольно радиорезистентны. В первые недели после облучения в дозах, при которых развитие патологического процесса связано главным образом с поражением кроветворной системы, покоящиеся стромальные фибробласты мало повреждаются. Сохраняется, а иногда и возрастает их функциональная активность как продуцентов простагландина Е и колониестимулирующих факторов (КСФ). Поэтому при общем облучении в дозах, при которых сохраняется совместимое с выживанием число СКК, повреждения стромальных элементов мало выражены, и значение их в развитии аплазии костного мозга невелико. При облучении в более высоких дозах (порядка 100 Гр), применяемых, в частности, при лучевой терапии опухолей, часть зрелых фибробластов погибает, в то же время секреция ими простагландина Е и КСФ повышается.

Что касается родоначальных для фибробластов клеток (КОЕ-Ф), то они у человека достаточно радиочувствительны: $D_0 = 1,3$ Гр. Кроме того, в периоде, когда костномозговое кроветворение восстанавливается, КОЕ-Ф пролиферируют очень вяло. Эти особенности могут иметь значение для развития отдаленных изменений в системе кроветворения, таких как апластическая анемия и т.п.

При морфологическом исследовании после облучения в высоких дозах (порядка 10 Гр) уже через несколько часов в красном костном мозге

наблюдаются повреждения ядер клеток: пикноз, кариорексис (апоптоз), кариолизис. Иногда разрушается и цитоплазма (цитолиз). Костномозговые синусы расширяются, эритроциты выходят в паренхиму костного мозга. Еще через несколько часов начинается процесс фагоцитоза поврежденных миеокариоцитов: фрагменты ядер, а иногда и целые клетки, обнаруживаются в костномозговых макрофагах. У крыс уже через 1-2 суток после сверхлетального облучения костный мозг очищается от продуктов клеточного распада, остаются лишь стромальные элементы. Развитие некротических изменений в клетках костного мозга сопровождается сосудистыми реакциями, и гистологическая картина костного мозга может быть охарактеризована как воспаление с характерными для него фазами альтерации, экссудации, а в последующем – развития репаративных процессов. В опустошенной отечной строме костного мозга наблюдаются геморрагии. Костный мозг через 3 суток после облучения в сверхлетальной дозе выглядит как «озеро крови». Незадолго перед смертью в костном мозге обнаруживаются бактерии.

При более низких дозах облучения изменения менее выражены. В случаях, заканчивающихся выздоровлением, вначале появляются отдельные очаги кроветворения, со временем они сливаются. У человека через 2 суток после облучения в дозах 2-6 Гр гистологическое исследование срезов костного мозга позволяет обнаружить снижение количества клеток эритроидного и гранулоцитарного ростков в 1,5-2 раза по сравнению с нормой, участки с обнаженной стромой, отечность основного вещества, мелкие кровоизлияния.

Позднее в костном мозге наблюдается прогрессирующее нарастание содержания стромальных элементов: фибробластов, ретикулярных клеток, макрофагов. После облучения в дозах 2-4 Гр в начале второй недели в период, соответствующий описанному ранее абортивному подъему, отмечается повышение митотической активности клеток костного мозга, увеличивается количество недифференцированных клеток. К концу третьей недели обнаруживается увеличение числа клеток гранулоцитарного и эритроидного ростков. При более высоких дозах облучения проявления абортивного подъема выражены значительно слабее.

С конца третьей недели после облучения в дозах более 2-3 Гр в костном мозге прогрессирует аплазия, проявляющаяся жировой атрофией. Площадь жировой ткани на срезах костного мозга может достигать 80%. Одновременно обнаруживаются и признаки регенерации: микроочаги недифференцированных клеток и клеток ранних генераций эритроидного и миеоидного ростков, а также усиление пролиферации стромальных клеток. В последующем очаги кроветворной ткани разрастаются

достаточно быстро, обеспечивая восстановление функции кроветворения.

Даже спустя год после облучения в дозах 2-4 Гр структура костного мозга восстанавливается не полностью. Сохраняются крупные очаги жировой дистрофии, увеличено по сравнению с нормой количество стромальных клеток, гемопоэтическая ткань в паренхиме костного мозга представлена не диффузно, а отдельными крупными очагами. После радиационного воздействия в дозах 5 Гр и выше в эти сроки в костном мозге наблюдаются распространенные очаги гипоплазии.

Морфологические изменения костномозговых клеток, связанные с их непосредственным повреждением (пикноз ядра, кариорексис, разрушение или отечность ядра), обычно удается зарегистрировать в первые часы после облучения. Разрушенные клетки довольно быстро удаляются. Позже начинают обнаруживаться клетки с аномалиями, связанными с нарушениями митозов: гигантские клетки, клетки с гиперсегментированным ядром, с аномальными митотическими фигурами (мосты в ана- или телофазе), хромосомные фрагменты в интерфазных клетках. Максимум выхода этих клеток приходится на 12-24 ч после облучения. К третьему дню большинство таких клеток также исчезает.

3.5.3. Постлучевые изменения морфологического состава периферической крови

Убыль числа функциональных клеток начинается, когда последние клетки, поступившие к моменту облучения в созревающий отдел, выйдут в периферическую кровь, то есть через срок, соответствующий времени прохождения клеток через этот отдел в норме. Содержание в крови нейтрофильных гранулоцитов,хождение которых через отдел созревания составляет 5-6 суток, начинает снижаться именно с этого времени.

Скорость уменьшения числа клеток в крови тем выше, чем короче продолжительность их циркуляции после выброса из костного мозга. Довольно большой срок между облучением и развитием максимальной нейтропении (это происходит к концу третьей недели) объясняется тем, что с середины второй недели после облучения в периферической крови развивается abortивный подъем содержания гранулоцитов.

Причины выброса в кровь в это время значительного числа зрелых нейтрофильных клеток связывают с влиянием на костный мозг экстрамедуллярных факторов, в частности, с возрастанием в крови на ран-

них сроках после облучения содержания катехоламинов и других биологически активных веществ.

В динамике изменения числа нейтрофилов крови после облучения можно выделить несколько фаз:

- начальный или первичный нейтрофилез;
- лаг-фаза (в это время естественный выход в ткани нейтрофилов крови компенсирован поступлением этих клеток из пула созревания);
- первичное опустошение;
- абортивный подъем;
- вторичное опустошение;
- восстановление.

Лимфоциты погибают уже в ранние сроки после облучения; соответственно их уровень в периферической крови быстро снижается.

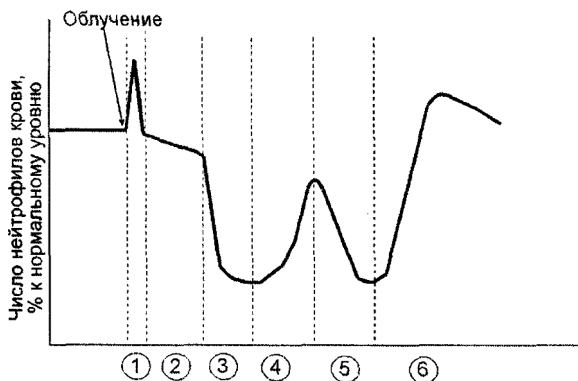


Рис. 11. Динамика изменений числа гранулоцитов в крови после общего облучения (по С. Киллмэну, 1974):

1 – первичный нейтрофилез; 2 – лаг-фаза; 3 – первичное опустошение; 4 – абортивный подъем; 5 – вторичное опустошение; 6 – восстановление

При резком снижении после облучения общего числа лейкоцитов в крови можно говорить о не менее глубоком уменьшении абсолютного количества моноцитов.

Содержание тканевых макрофагов в течение первой недели после облучения существенно не меняется. Функциональная активность этих клеток также не изменяется или даже оказывается повышенной. В то же время загруженность этих клеток продуктами тканевого распада снижает эффективность их участия в системе противомикробной защиты. В периоде выраженных клинических проявлений лучевого поражения число клеток системы мононуклеарных фагоцитов снижается.

Динамика содержания тромбоцитов после облучения имеет сходство с изменениями количества нейтрофилов. Абортивный подъем бывает выражен только после облучения в сравнительно невысоких (примерно до 3,5 Гр) дозах. В фазе вторичного опустошения наблюдается глубокая тромбоцитопения: к концу 3-4-й недели после облучения в среднелетальных дозах количество тромбоцитов достигает 5-8% от нормального уровня.

Содержание эритроцитов после облучения уменьшается в медленном темпе и умеренно, поскольку зрелые эритроциты достаточно радиорезистентны, а продолжительность жизни этих клеток составляет около 100 дней. Даже при полном прекращении их образования число эритроцитов в крови вследствие естественного отмирания снижается примерно на 1% за день (если нет осложняющих ситуацию кровотечений).

Глубина цитопении прямо зависит от дозы облучения. При дозах порядка 5-6 Гр нейтрофилы и тромбоциты могут вовсе не обнаруживаться в мазках периферической крови. Промежуток времени, необходимый для восстановления числа этих клеток до исходного уровня после облучения в высоких дозах, может оказаться, как об этом уже говорилось при характеристике изменений в кроветворных органах, короче, чем при воздействии меньших доз.

Кроме количественных сдвигов в клетках крови после облучения обнаруживаются и морфологические изменения: гомогенизация ядер лимфоцитов, появление лимфоцитов с микроядрами, гигантских гиперсегментированных нейтрофилов, гигантских тромбоцитов.

3.5.4. Влияние облучения на иммунную систему

Основной функцией иммунной системы является защита организма от воздействия чужеродных антигенов и контроль за поддержанием генетического постоянства внутренней среды организма. Эту функцию иммунная система выполняет с помощью естественных и адаптивных (приобретенных) механизмов. В основе естественного иммунитета лежит действие неспецифических механизмов, связанных с функционированием клеточных (нейтрофилы, макрофаги, ЕК-клетки (естественные киллеры) и др.) и гуморальных (комплемент, лизоцим, интерфероны и др.) факторов. Факторы естественного иммунитета относительно радиостойчивы и поражаются лишь при очень высоких дозах облучения. Специфический иммунитет, основанный на свойствах

T- и B-лимфоцитов избирательно отвечать на чужеродные вещества, напротив, высоко чувствителен к действию радиации.

Лимфоциты относятся к числу наиболее радиочувствительных клеток в организме, и гибель их отмечается уже после радиационного воздействия в десятых долях грея. При этом погибают не только молодые делящиеся клетки, но и (исключение из правила Бергонье и Трибондо) зрелые лимфоциты, которые в обычных условиях (без антигенной стимуляции) не делятся. Среди радиочувствительных клеток, подверженных интерфазной гибели при дозах, близких или даже более низких, чем вызывающие репродуктивную гибель стволовых кровяных клеток, выделяются T-лимфоциты (T-хелперы и T-супрессоры), B-лимфоциты и тимоциты вилочковой железы. Радиочувствительность B-лимфоцитов выше, чем T-лимфоцитов, а радиационная устойчивость T-супрессоров несколько больше, чем T-хелперов. Тимоциты также различаются по своей радиочувствительности: максимальная радиопоражаемость отмечается у камбиальных клеток, а наибольшая радиорезистентность – у эпителиальных клеток. Кроме того, среди T-лимфоцитов имеется сравнительно небольшая популяция радиоустойчивых клеток, которые сохраняют свою функциональную активность после облучения в весьма высоких дозах (6-10 Гр, а по некоторым данным – до 20 Гр). Эти клетки являются одновременно кортизонорезистентными. Их содержание составляет около 3-8% от всех T-лимфоцитов, и, возможно, они представляют собой T-клетки памяти.

С высокой радиочувствительностью зрелых популяций лимфоцитов крови и их интерфазной гибелью в первый день после воздействия ионизирующего излучения связано и быстрое развитие лимфопении после облучения. Интерфазная гибель лимфоцитов не связана с моментом клеточного митоза, она начинается через 6 часов и завершается через 3 суток после радиационного воздействия. Разрушение лимфоцитов после облучения происходит как в лимфоидных органах (тимус, лимфатические узлы, селезенка, лимфоидные образования в кишечнике), так и в периферической крови и лимфе. В результате можно обнаружить снижение числа лимфоцитов в крови уже через десятки минут после облучения, а к 3-м суткам число лимфоцитов снижается до минимальных величин. Глубина снижения уровня лимфоцитов, так же как и других клеток периферической крови, прямо зависит от дозы облучения. Следует подчеркнуть, что послерадиационное падение числа лимфоцитов, наряду с гранулоцитопенией, является основной причиной развития синдрома инфекционных осложнений в периоде разгара острой лучевой болезни.

Таблица 37 – Радиочувствительность некоторых клеток иммунной системы человека (по данным А.А. Ярилина, 1989, 1997; T. Szepesi, T.M. Fliedner, 1989)

| Вид клеток | Д ₀ , Гр | |
|--|---------------------|---------|
| Полипотентные стволовые кроветворные клетки | 0,9-1,0 | |
| Клетки-предшественники гранулоцитов | 1,15-1,20 | |
| Нейтрофилы крови | более 15,0 | |
| Клетки-предшественники моноцитов | 1,12-1,17 | |
| Моноциты крови | 10,0-15,0 | |
| ЕК-клетки (естественные киллеры) | более 10,0 | |
| Клетки-предшественники лимфоцитов: | ранние стадии | 0,5-0,8 |
| | поздние стадии | 1,3-1,9 |
| Лимфоциты крови: | Т-лимфоциты | 1,3-2,5 |
| | В-лимфоциты | 1,2-1,8 |
| Клетки-предшественники тимоцитов – камбиальные клетки тимуса | 2,5-3,7 | |
| Эпителиальные клетки тимуса | 8,0-10,0 | |
| Дендритные клетки тимуса | 2,0-4,0 | |

Воздействие радиации на лимфоидную ткань приводит не только к гибели лимфоцитов, но и вызывает значительные изменения их функциональной активности. Это, в свою очередь, может приводить к извращению иммунного ответа как в ближайшие сроки, так и (что особенно важно) в отдаленном периоде после лучевого воздействия.

Так, уже в ближайшие минуты-часы после облучения как для В-лимфоцитов, так и особенно для Т-лимфоцитов, характерна утрата имеющихся на их поверхности клеточных рецепторов для различных антигенов, что связано с вмешательством ионизирующих излучений в процесс реаранжировки генов TCR (антигенраспознающего рецептора Т-лимфоцитов). Пострадиационное изменение экспрессии молекул адгезии приводит к нарушению распределения лимфоцитов в крови и лимфоидных органах и фактически искажает пространственную организацию иммунной системы.

Уже в ранние сроки после облучения значительно снижается способность В-лимфоцитов к выработке специфических иммуноглобулинов в ответ на антигенную стимуляцию. Это угнетение прямо коррелирует с динамикой депопуляции лимфоидных органов, а наиболее выражено в случае введения антигена через 1-2 сут. после облучения. При введении антигена незадолго до облучения выработка антител может даже увеличиваться. В случае предварительной иммунизации перед воз-

действием радиации «вторичный ответ» на повторное введение антигена после облучения существенно не нарушается.

Еще одним ближайшим результатом радиационного воздействия является снижение пролиферативной активности Т-лимфоцитов, их миграционных свойств, способности инактивировать несингенные КОЕ. Гибель в результате облучения Т-лимфоцитов сопровождается снижением в организме их цитотоксических функций, что проявляется подавлением некоторых реакций гиперчувствительности замедленного типа, реакций типа «трансплантат против хозяина» и др. Выраженность угнетения этих реакций зависит в значительной мере и от уровня функциональной активности Т-лимфоцитов, которая оказывается подавленной уже после облучения в дозах 0,15-0,20 Гр.

Воздействие ионизирующих излучений приводит к нарушению баланса Т-хелперов классов Th1 и Th2, которые определяют соотношение клеточной опосредованной и гуморальной составляющей иммунного ответа, а также ряда проявлений иммунопатологии. Напомним, что продукты Th2 – интерлейкин-2, γ -интерферон, β -туморнекротический фактор – обеспечивают развитие клеточного иммунитета, а продукты Th2 – интерлейкин-4, -5, -10 – служат медиаторами гуморального ответа. Эти клетки находятся в соотношениях антагонизма, реализуемого с участием γ -интерферона и интерлейкина-10.

Дифференцировка Th1 поддерживается макрофагами через выработку интерлейкина-12, а развитие Th2 регулируется интерлейкином-4. В свою очередь продукт Th1 γ -интерферон стимулирует активность макрофагов.

Воздействие ионизирующих излучений существенным образом меняет функциональную структуру иммунной системы, сдвигая баланс Th1/Th2 сначала в сторону Th1, а в более отдаленные сроки – в сторону Th2. Следствием этого является наблюдаемое в ранние сроки после облучения преимущественное подавление антибактериальной защиты и других форм гуморального иммунитета, что наряду с другими факторами (лимфо- и гранулоцитопения, нарушение функциональной активности макрофагов и др.) является причиной развития синдрома инфекционных осложнений в период разгара острой лучевой болезни. В отдаленном периоде угнетение Th1 – зависимого звена иммунной системы проявляется ослаблением противоопухолевого иммунитета, противовирусной резистентности, снижением защиты организма от возбудителей туберкулеза, лепры, ряда паразитарных заболеваний, повышением склонности к аллергическим процессам и др.

Установлено, что чем выше зависимость иммунного ответа от тимуса, тем сильнее проявляется эффект радиации. Действие ионизирующих излучений на тимусзависимое звено иммунной системы складывается из непосредственного влияния на Т-клетки и опосредованного действия через строму тимуса. Активность стромы тимуса в ранние сроки после облучения может повышаться, а в более поздние, как правило, подавляется, что сопровождается ускоренной передачей полномочий тимуса периферическому отделу иммунной системы и развитием проявлений иммунологического старения.

В раннем пострадиационном периоде повышается и вероятность развития аутоиммунных реакций, выраженность которых нарастает с увеличением дозы облучения. Однако аутоиммунные процессы проявляются и в поздние сроки после лучевого воздействия, а также при действии малых доз радиации. Ряд исследователей полагают, что для малых доз и интенсивностей ионизирующих излучений развитие аутоиммунных процессов даже более характерно, чем для последствий облучения в высоких дозах.

При действии высоких доз ионизирующих излучений, убивающих большую часть лимфоцитов, нарушается формирование антигенраспознающего механизма. Клетки, обуславливающие селекцию тимоцитов, сильно различаются по своей радиочувствительности: эпителиальные клетки устойчивы к действию радиации в дозах до 8-10 Гр, а дендритные клетки погибают уже при дозах 2-4 Гр. В связи с этим процесс положительной селекции является относительно радиоустойчивым, а облучение в малых дозах даже может повышать его эффективность. Напротив, процесс отрицательной селекции нарушается уже при действии относительно малых доз радиации, вследствие чего часть аутореактивных клонов может сохраниться, и в последующем стать источником аутоагрессии. В поздние сроки после облучения могут страдать не только дендритные, но и эпителиальные клетки тимуса. Это связано с гибелью их относительно радиочувствительных предшественников – делящихся камбиальных клеток (D_0 для них составляет 2,5-3,7 Гр). В результате этого снижается число прошедших дифференцировку Т-лимфоцитов, уменьшается общая численность тимоцитов (подобный процесс наблюдается при старении) и, как следствие, возрастает вероятность развития аутоиммунных и опухолевых процессов.

Еще одним фактором, приводящим к прогрессированию аутоиммунных процессов в облученном организме, является ранняя пострадиационная гибель специальной популяции супрессорных клеток, сдерживающих образование В1-клетками естественных аутоантител к

эндогенным субстанциям. Устранение этих клеток облучением, а они погибают уже при дозах 4-6 Гр, приводит к усилению выработки естественных аутоантител и, как следствие, развитию органоспецифических аутоиммунных процессов.

Важным аспектом действия ионизирующих излучений на иммунитет является также их влияние на систему цитокинов – продуктов активированных клеток иммунной системы, играющих ключевую роль в регуляции гемопоза и межклеточного взаимодействия в ходе развития воспаления и иммунного ответа. Действие радиации на эту систему сильно зависит от природы клеток-продуцентов цитокинов. Так, образование лимфокинов *in vivo* подавляется в связи с массовой гибелью вырабатывающих их лимфоцитов, хотя сам по себе процесс продукции цитокина может стимулироваться радиацией (как это имеет место в случае с интерлейкином-2). В то же время воздействие ионизирующих излучений приводит к увеличению выработки интерлейкина-1, -6 и фактора некроза опухолей, макрофагами, стромальными и эпителиальными клетками тимуса. Стимуляция выработки этих цитокинов облучением особенно интересна, потому что интерлейкин-1 и фактор некроза опухолей, сами по себе обладают радиопротекторным действием, реализуемым при участии интерлейкина-6, а в сочетании с интерлейкином-1 радиозащитная активность проявляется также у гранулоцитарного и гранулоцитарно-макрофагального факторов. Эти факты, вероятно, свидетельствуют о том, что некоторые эффекты радиации направлены на ослабление или ликвидацию вызванных ею же последствий.

Таким образом, ионизирующие излучения существенным образом влияют на иммунную систему, вызывая широкий спектр ее реакций – от изменения регуляции иммунного ответа до гибели иммунокомпетентных клеток. Так, изменение экспрессии молекул адгезии, приводя к нарушениям распределения лимфоцитов, искажает пространственную организацию иммунной системы. Ее временная организация нарушается вследствие вмешательства радиации в процесс реаранжировки генов TCR, повреждения эпителия тимуса и связанного с этим «перевода иммунологических часов» в сторону старения.

3.5.5. Действие ионизирующей радиации на желудочно-кишечный тракт

В желудочно-кишечном тракте наиболее радиочувствительной является тонкая кишка, D_0 для стволовых клеток эпителия тонкой кишки составляет около 1 Гр, тогда как в толстой кишке этот показатель до-

стигает 2,7 Гр. Поэтому изменения в тонкой кишке являются наиболее значимыми для организма, облученного в «кишечном» диапазоне доз от 10 до 20 Гр.

Стенка тонкой кишки выстлана изнутри однослойным эпителием, покрывающим поверхность крипт – углублений слизистой оболочки в стенку кишки, и ворсинок – выпячиваний слизистой оболочки в ее просвет.

Эпителий слизистой оболочки тонкой кишки представляет собой принципиально такую же систему клеточного обновления, как и костный мозг. Но если на гистологических срезах костного мозга клетки, относящиеся к разным отделам по степени их созревания, располагаются без видимого порядка (рядом можно увидеть и проэритробласт, и мегакариоцит, и зрелый эозинofil), то в слизистой оболочке тонкой кишки имеет место четкое разграничение взаимного расположения клеток, относящихся к разным пулам.

На дне крипт находятся стволовые клетки, деление которых обеспечивает физиологическую регенерацию эпителия. Считается, что около 55-60% стволовых клеток кишечника активно участвуют в пролиферации, остальные находятся в G₀-стадии (стадии покоя) клеточного цикла. Из стволовых клеток в результате деления и созревания образуются цилиндрические клетки, составляющие около 90% от всей популяции энтероцитов, а также бокаловидные, энтерохромоаффинные клетки и клетки Панета. По мере деления потомков стволовых клеток и последующего их созревания клетки продвигаются по направлению к устью крипт, составляя пролиферативно-созревающий пул. Для созревания цилиндрических клеток требуется не менее 4 делений, бокаловидных – 2 деления и энтерохромоаффинных – 1 деление. Клетки, располагающиеся в районе устьев крипт, относятся к только созревающему пулу. По стенке ворсинок по направлению к их верхушкам продвигаются уже функциональные клетки, которые постепенно стареют. Достигнув верхушки ворсинки, энтероциты погибают и слущиваются в просвет кишки. Составные части погибших клеток реутилизируются. Утрата клеток с ворсинок сбалансирована притоком в них вновь образованных клеток из крипт. Время прохождения клеток по ворсинке кишечника у человека составляет 3-4 суток.

Вот некоторые данные, характеризующие описанные процессы количественно. У человека общее число крипт составляет 6×10^8 , общее количество продуцируемых клеток за 1 сут. – 5×10^9 , время перехода энтероцита с крипты на кончик ворсинки – около 3-4 суток.

Как уже отмечалось выше, наиболее радиочувствительными являются стволовые клетки крипт тонкого кишечника: большая их часть погибает уже при облучении в дозах 4-6 Гр. Проллиферирующий и созревающий пул крипты кишечника более устойчив к действию радиации: D_0 клеток этого пула составляет около 3,8 Гр. Зрелые эпителиоциты кишечных ворсинок являются значительно более радиорезистентными, основная их часть (так же, как и клетки функционального пула кроветворной ткани) погибает после облучения в дозах свыше 15 Гр. Большая (по сравнению с родоначальными элементами гемопоэтической системы) радиоустойчивость стволовых клеток кишечника связана с тем, что в последних процессы постлучевой репарации и регенерации протекают значительно быстрее, чем в костном мозге. При одинаковых значениях D_0 (около 1 Гр), D_0 для стволовых клеток эпителия слизистой оболочки кишки составляет примерно 4 Гр, то есть в 4-6 раз выше, чем для стволовых кроветворных клеток. Предполагается, что определенную роль в этом играют особенности клеточного микроокружения и локализации клеточных элементов крипт слизистой оболочки кишечника, которые, в отличие от миелокариоцитов, сконцентрированы в меньшем объеме, и более тесно контактируют между собой посредством медиаторов межклеточного взаимодействия – цитокинов, стимулирующих процессы постлучевой репарации, а также дифференцировки и созревания энтероцитов.

Клинические проявления кишечного синдрома могут отмечаться уже при тяжелой и крайне тяжелой степени острой лучевой болезни (доза облучения 6-10 Гр), однако дозовый порог полного опустошения стволового пула крипт, обуславливающего декомпенсацию функции кишечника при лучевом поражении, составляет для человека 10-20 Гр. Именно эти процессы и лежат в основе развития кишечной формы острой лучевой болезни.

Кинетические параметры развития кишечного синдрома определяются временем прохождения энтероцита по поверхности ворсинки от ее основания к вершине с последующим слущиванием. Сразу после облучения в «кишечном» диапазоне доз значительная часть стволовых клеток крипт погибает по интерфазному механизму, другие (по окончании фазы митотического блока) погибают после одного или нескольких делений (репродуктивная форма клеточной гибели). В результате опустошения высланных зародышевым эпителием крипт прерывается процесс новообразования и поступления на ворсинку эпителиоцитов и, поскольку продвижение зрелых клеток по ворсинке и их слущивание продолжается с нормальной скоростью, происходит полное оголение ворсинки и денудация слизистой оболочки кишечника.

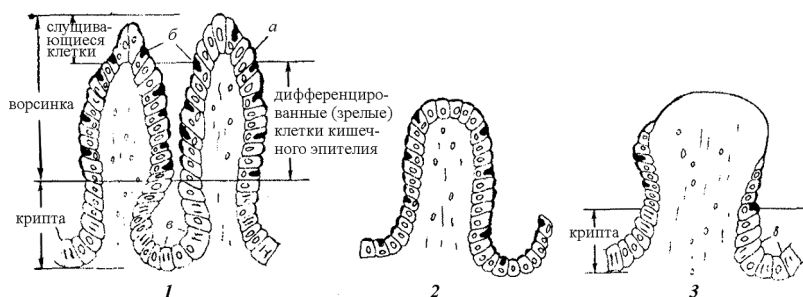


Рис. 12. Влияние облучения на ворсинку слизистой оболочки тонкой кишки:
 1 – нормальная ворсинка; 2 – постлучевая аплазия ворсинки (отсутствие клетки крипты;
 3 – оголение ворсинки, появление клеток крипт и регенерации кишечного эпителия;
 а – эпителиальная клетка, б – бокаловидная клетка, в – клетки крипты

Хотя для человека время перехода энтероцита с крипты на кончик ворсинки составляет 3-4 сут., клинические проявления лучевого поражения кишечника развиваются обычно на 7-8-е сутки. Этот временной сдвиг обусловлен наличием так называемых аномальных энтероцитов, возникающих в результате деления поврежденных радиацией стволовых элементов кишечника, а также «растягиванием» оставшихся эпителиоцитов по поверхности кишечной ворсинки. Когда эти компенсаторные механизмы становятся уже недостаточными для того, чтобы покрыть всю поверхность слизистой оболочки кишечника, образуются дефекты эпителиального покрытия, приводящие к нарушению его основных функций – поддержания водно-электролитного баланса организма и барьерной функции.

Наиболее важным следствием денудации тонкой кишки являются дегидратация и гипонатриемия. Обезвоживание организма при кишечном синдроме обусловлено нарушением процессов активного всасывания и реабсорбции воды и электролитов, возрастанием экскреции жидкости в просвет кишечника и усилением его моторно-эвакуаторной функции, что в конечном итоге приводит к развитию тяжелой диареи. Обусловленное денудацией слизистой оболочки кишечника и опустошением пейеровых бляшек нарушение барьерной функции кишечной стенки является причиной поступления во внутреннюю среду токсических продуктов, в частности эндотоксинов кишечной палочки, увеличивающих гибель эпителиоцитов и ускоряющих процесс оголения ворсинок.

По этой же причине во внутреннюю среду проникает кишечная микрофлора. Микробной инвазии и размножению микробов во внутренних

органах способствует развивающаяся гранулоцитопения, еще более снижающая противоифекционную резистентность организма.

Поскольку исчезновение эпителиальной выстилки тонкой кишки при гамма-облучении происходит уже в дозе 10 Гр (а именно с этим явлением связаны механизмы, приводящие к смертельному исходу после облучения в дозах 10-20 Гр), с увеличением дозы в кишечном диапазоне сроки гибели млекопитающих практически не меняются, составляя достаточно фиксированную величину: от 4 до 8 суток.

3.5.6. Действие ионизирующей радиации на эмбрион, плод

Данные о действии ионизирующих излучений на эмбрион и плод человека получены в результате изучения последствий лучевой терапии (при облучении области живота беременных женщин) и исследований детей, подвергшихся внутриутробному облучению в Хиросиме и Нагасаки. Общий вывод из этих наблюдений однозначен – **радиочувствительность плода высокая и она тем больше, чем он моложе.**

У выживших детей повреждающее действие радиации проявляется в виде различных уродств, задержки физического и умственного развития или их сочетаний. Наиболее частые уродства – микроцефалия, гидроцефалия и аномалии развития сердца.

Пороки развития и уродства, возникающие вследствие облучения *in utero*, объединяются термином **тератогешые эффекты.**

Крайне высокая радиочувствительность организма в антенатальном, внутриутробном периоде развития легко объяснима, так как в это время он представляет собой конгломерат из делящихся и дифференцирующихся клеток, обладающих наибольшей радиочувствительностью.

В зависимости от времени закладки, формирования и дифференцировки тех или иных тканей, органов или систем любая из них может оказаться крайне радиочувствительной, независимо от ее радиочувствительности во взрослом состоянии.

Например, весьма частым последствием облучения эмбриона является микроцефалия или вообще отсутствие ЦНС, возникающие при облучении уже в дозах 0,5-2 Гр, хотя во взрослом организме подобное не наблюдается и при самых высоких дозах. Поэтому вполне справедливо считать эмбрион и плод самыми радиочувствительными стадиями развития любого организма.

При мозаике развивающихся центров, каждый из которых жизненно необходим для выживания эмбриона, облучение в дозах, летальных для любого центра, будет смертельным для всего организма в целом. В этом случае радиочувствительность эмбриона определяется наиболее чувствительной системой, находящейся в данный момент в состоянии активного развития.

В то же время эмбрион обладает важной особенностью, не обнаруживаемой на иных стадиях жизненного цикла – выраженной способностью к восстановлению, регенерации и перестройке. Уже на самых ранних стадиях эмбрион содержит активные фагоциты, способные поглощать и устранять продукты клеточного распада и остатки разрушенных облучением клеток.

Различают три основных периода внутриутробного развития организма – *предимплантационный* (до внедрения зародыша в толщу слизистой оболочки матки), *период основного органогенеза*, *плодный период*.

Облучение на ранних стадиях (до имплантации и в начале органогенеза) как правило, заканчивается внутриутробной гибелью или гибелью новорожденного (при облучении в середине периода органогенеза). Воздействие в период основного органогенеза вызывает уродства, а облучение плода – лучевую болезнь новорожденного.

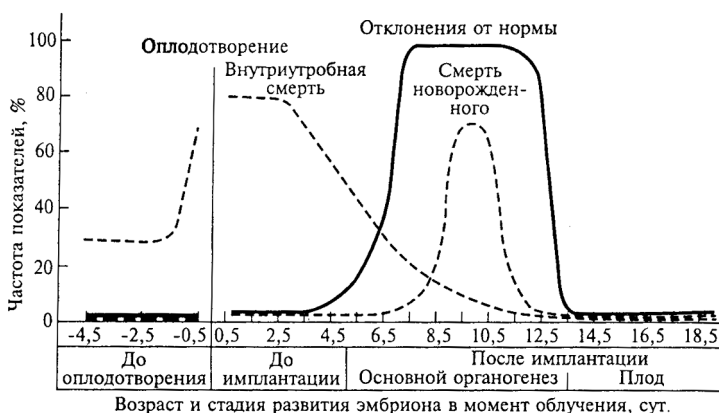


Рис. 13. Внутриутробная смертность новорожденных мышей и количество животных с признаками отклонения от нормы к моменту родов после облучения самок в различные периоды до оплодотворения в дозе 4 Гр и после оплодотворения в дозе 2 Гр (по Л. Рассел, У. Расселу, 1954)

После их удаления «организм в целом» старается по мере возможности заполнить образующийся дефицит оставшимися недифференцированными и неразрушенными первоначальными клетками.

Убедительно показано, что *эмбриогенное действие радиации является преимущественно прямым, возможность дистанционного влияния на нарушение развития плода составляет не более 5% от общего повреждающего действия радиации* (Нейфх А.А., 1975). Ярким доказательством справедливости этого заключения могут быть, например, данные Л. Рассел о том, что заметные отклонения эмбриона от нормы могут быть легко вызваны на 7-8-е сут. беременности облучением в дозах 0,1-0,25 Гр, на которое материнский организм, по существу, не реагирует. В то же время при облучении матери перед зачатием в заведомо повреждающих дозах (до 4 Гр) не обнаруживаются никаких признаков повреждения развивающегося плода.

По наблюдениям И.А. Пионтковского (1969), изменения, возникающие в нейробластах зародыша, обнаруживаются уже через 2 ч после облучения, т.е. значительно раньше, чем развивается лучевой синдром у матери. Наконец, о непосредственном травмирующем действии радиации на эмбрион свидетельствует прямая зависимость тератогенного (индуцирование пороков развития, уродств) эффекта от степени радиочувствительности эмбриона, определяемая радиочувствительностью конкретных систем на разных стадиях развития. Общая картина, схематически представленная на рисунке 13, подробнее будет рассмотрена ниже.

Эмбрионы до имплантации (до 5-х сут.) наиболее радиочувствительны к облучению – от 80 до 40% из них погибают до рождения, причем даже в этот период (с 1-х по 5-е сут.) радиочувствительность с возрастом заметно понижается. Выжившие эмбрионы обычно не имеют заметных уродств. Затем следует период 6,5-12,5 сут., когда облучение вызывает наибольшую частоту уродств при минимальной внутриутробной смертности и наибольшей гибели новорожденных. При дозе 2 Гр гибель бывает наивысшей, если облучение происходит в период от 9,5 до 10,5 сут. и не отличается от контроля при облучении до 7,5 или после 11,5 суток. Таким образом, период основного органогенеза (6,5-12,5 сут.) следует рассматривать как наиболее радиочувствительный для большинства органов и систем организма, облучение которых (в зависимости от их жизненной значимости) приводит к гибели плода, новорожденного или возникновению уродств.

Это не является чем-то неожиданным, так как еще раз подтверждает общую связь радиочувствительности клеток с такими процессами их

жизни, как деление и дифференцировка. При этом самыми радиочувствительными являются дифференцирующиеся клетки; именно они определяют наиболее радиочувствительные стадии в развитии определенной ткани, органа, системы. Вот почему ионизирующее излучение является великолепным инструментом в руках эмбриологов, с помощью которого удается со значительно большей точностью, чем посредством ранее применявшейся экстирпации, определять предполагаемые зоны формирования того или иного органа в эмбрионе на ранних стадиях развития, так как известно, что дифференциация органа может предшествовать видимому появлению его зачатка. Для наглядности ниже приведены основные аномалии развития, отмеченные в литературе, посвященной действию радиации на эмбрион животных и человека.

Таблица 38 – Основные отклонения от нормы, обнаруживаемые у млекопитающих (включая человека) после облучения плода

| Мозг | Глаза | Скелет | Другие аномалии |
|---|---|--|--|
| Отсутствие головного мозга | Полное отсутствие анофтальмия | Равномерное уменьшение: задержка роста | Обратное расположение органов |
| Парэнцефалия | Микроофтальмия | Уменьшение черепа | Водянка почки |
| Микроцефалия | Микрокорнеа | Сводчатый череп | Водянка мочеточника |
| Мозговая грыжа | Колобома | Узкая голова | Водянка яичка |
| Монголизм | Деформация радужной оболочки | Черепной пузырь | Отсутствие почки |
| Уменьшение продолговатого мозга | Отсутствие хрусталика (отдельно или в сочетании с отсутствием сетчатки) | Воронкообразная грудь | Дегенерация гонад |
| Атрофия головного мозга | | Врожденный вывих бедер | Атрофия нижних конечностей |
| Умственная отсталость | Открытые веки | Уменьшение и деформация хвоста | Депигментация и гиперпигментация кожи |
| Идиотия | Косоглазие | Чрезмерное развитие и деформация ног | Двигательные расстройства конечностей |
| Нейробластома | Ретинобластома | Уменьшение пальцев | Увеличение вероятности возникновения лейкоза |
| Сужение Silvioва водопровода | Дальнозоркость | Пяточная стопа | Врожденный порок сердца |
| Водянка головного мозга | Врожденная глаукома | Нарушение развития конечностей | Деформация уха |
| Розетки в нервной ткани | Частичный альбинизм | Синдактилия | Деформация лица |
| Расширение третьего и бокового желудочков мозга | | Брахидактилия | Нарушение функции гипофиза |
| Уменьшение или отсутствие некоторых черепно-мозговых нервов | | Нарушение онтогенеза | Дерматомальный мультимольный некроз |
| | | Экзостоз большеберцовой кости | |
| | | Изменение метафиза | |
| | | Нарушение эмалеобразования | |
| | | Склеротомный некроз | |

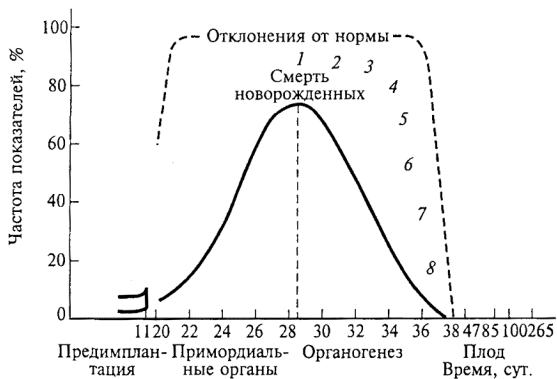


Рис. 14. Экстраполяционная кривая, демонстрирующая ожидаемые результаты облучения эмбриона человека на разных стадиях развития, построенная на основе экспериментов на животных (по Р. Рафу, 1962):

1 – мозговая грыжа, водянка мозга, микрофтальмия; 2 – изменение свода черепа; 3 – дегенерация сосудов головного мозга, уменьшение продолговатого мозга; 4 – перерождение среднего мозга и клеток коры; 5 – перерождение спинного и продолговатого мозга; 6 – нарушение развития мозолистого тела; 7 – нарушение развития полушарий головного мозга, аммонова рога; 8 – нарушение развития полосатого тела

Период наибольшей радиочувствительности эмбриона человека сильно растянут по времени. Он начинается, вероятно, с зачатия и кончается приблизительно 38-ми суткам после имплантации; в этот период развития у эмбриона человека начинают формироваться зачатки всех органов посредством быстрой дифференцировки из клеток первичных типов. Подобные превращения у эмбриона человека в период между 18-ми и 38-ми сутками происходят почти в каждой из тканей. Так как переход любой клетки из эмбрионального состояния в состояние зрелости – наиболее радиочувствительный период ее формирования и жизни (независимо от того, является ли она нейро-, мио-, остео- или эритробластом и др.), все ткани в это время оказываются высоко радиочувствительными.

Мозаичность процесса дифференциации эмбриона и связанное с этим процессом изменение числа наиболее радиочувствительных клеток определяют степень радиочувствительности той или иной системы или органа и вероятность появления специфической аномалии в каждый момент времени. Поэтому *фракционированное облучение плода приводит к более тяжелым повреждениям, так как воздействие захватывает разнообразные типы зародышевых клеток и их различное распределение, что вызывает повреждение большого количества зачатков*

органов, находящихся на критических стадиях развития. В этот период максимальное поражение может быть спровоцировано очень малыми дозами ионизирующего излучения; для получения аномалий в более поздний период эмбрионального развития требуется воздействие больших доз.

Приблизительно через 40 суток после зачатия грубые уродства вызвать трудно, а после рождения – невозможно. Однако следует помнить, что в каждый период развития эмбрион и плод человека содержат некоторое количество нейробластов, отличающихся высокой радиочувствительностью, а также отдельные зародышевые клетки, способные аккумулировать действие излучения.

Как показали результаты изучения последствий облучения беременных женщин во время атомной бомбардировки в Хиросиме и Нагасаки, степень проявления аномалий и их особенности в основном соответствовали ожидаемым. Так, согласно одному из обследований, у 30 женщин, находившихся в 2 км от эпицентра взрыва и имевших серьезные симптомы лучевого воздействия, примерно в половине случаев отмечена внутриутробная смертность плода, гибель новорожденных или младенцев, а у четырех из 16 выживших детей наблюдалась умственная отсталость. Согласно данным другого наблюдения, почти у половины (45%) детей, родившихся от матерей, подвергшихся облучению при сроках беременности 7-15 нед., имелись признаки умственной отсталости.

Кроме того, у потомства женщин, перенесших облучение в первой половине беременности, отмечены микроцефалия, задержка роста, монголизм и врожденные пороки сердца, частота и степень аномалий были выше в тех случаях, когда пострадавшие матери находились на расстоянии менее 2 км от эпицентра взрыва. Но и в этих случаях не наблюдалось таких резких неврологических нарушений, какие были получены при облучении мышей, что, вероятно, связано с малой выживаемостью таких детей. Эти наблюдения относятся лишь к 6-7-летним детям, а в этом возрасте еще не проявляются многие нарушения, которые могут быть обнаружены только в юношеском и более позднем возрасте.

Согласно данным обзора 1975 г., ежегодное обследование в Хиросиме и Нагасаки 1600 жителей, подвергшихся облучению в пренатальный период, показало, что у лиц, матери которых находились на расстоянии ~2 км от эпицентра, отмечалось некоторое уменьшение объема головы, замедление роста и снижение массы тела. При меньших дозах заметных отклонений в физическом развитии и росте детей не отмечено.

После уточнения индивидуальных доз было установлено, что в Хироме тератогенный эффект радиации проявлялся уже в диапазоне доз от 0,1 до 0,2 Гр.

Наибольший риск развития умственных расстройств наблюдается при облучении плода в период от 8 до 15 недель после зачатия.

Следует иметь в виду, что облучение эмбриона в малых дозах может вызвать такие функциональные изменения в клетке, которые невозможно зарегистрировать современными методами исследования, но которые способствуют развитию болезненного процесса через много лет после облучения. Следовательно, все отдаленные последствия облучения эмбриона могут быть выражены в большей степени, нежели при облучении взрослого организма. Так, например, согласно данным статистического анализа (Стьюарт А. и др., 1956), частота лейкемий у потомства матерей, подвергавшихся рентгеновскому облучению во время беременности, приблизительно удваивается.

Облучение эмбриона в первые 26 недель при дозе $> 0,1$ Гр чревато рождением неполноценных детей, в связи с чем подобная ситуация может служить основанием для аборта по медицинским показаниям.

Заслуживают внимания сведения о последствиях облучения матерей во второй половине беременности. К ним относятся данные о повышенной заболеваемости и смертности таких детей в Нагасаки, а также сообщения об аномалиях развития, наблюдавшихся при рентгенотерапевтических процедурах, проводимых на разных сроках беременности матерей. Так, в сводке, охватывающей 168 подобных случаев (Раф Р., 1962), утверждается, что облучение эмбриона человека в период первых двух месяцев ведет к 100%-му поражению, в период от 3 до 5 месяцев – к 64, в период от 6 до 10 месяцев – к 23% поражения эмбрионов. Эти данные следует, конечно, иметь в виду, но их ценность для надежных выводов относительно облучения эмбриона и плода человека ограничена отсутствием точных дозиметрических параметров.

Исключительная особенность эмбриона определяется наличием большого числа недифференцированных первичных клеток, направленных на компенсацию клеточных утрат, благодаря чему облученный организм продолжает развиваться как целое, хотя неминуемым следствием облучения является возникновение состояния недостаточности (неполноценности), переносимость которой организмом зависит от степени замещения пораженных клеток клетками, оставшимися недифференцированными.

Исход поражения эмбриона, таким образом, выражается неким равновесием между начальным эффектом облучения и способностью

«организма как целого» восстановить от поражения отдельные его части, регенерирующие посредством вновь ориентированных жизнеспособных первичных клеток.

Независимо от деталей механизма радиоэмбриологического эффекта последствия облучения эмбриона или плода таковы, что неизбежно приводят к выводу о необходимости любой ценой предотвращать лучевые воздействия в этом периоде. Пороговая доза излучения, вызывающая аномалию плода человека, пока не установлена, но облучение в дозе 0,05 Гр повышает частоту резорбции оплодотворенного яйца у мыши на очень ранней стадии (перед стадией дробления).

Есть основания полагать, что даже диагностические облучения беременных женщин (при дозах 0,001-0,2 Гр) могут вызвать значительные уродства, особенно если это происходит в период раннего онтогенеза.

Как полагает Д. Висли (1960), по крайней мере 96% всех смертей, вызванных врожденными уродствами, могут обуславливаться радиационным фоном, а наблюдавшееся в США с 30-х по 60-е годы прошлого века увеличение уродств на 60% явилось, по его мнению, результатом непродуманного медицинского применения рентгеновского излучения.

Кроме того, очень важной проблемой, влияющей на оценку результатов облучения в период эмбриогенеза, является изучение частоты и момента возникновения отдаленных последствий облучения. Например, если развитие видимой картины рака у человека происходит через 15-30 лет после облучения, то будет ли так же продолжителен латентный период, если облучению подвергается эмбрион или плод? Дополнительно к уже приведенным выше примерам, демонстрирующим серьезность этой проблемы, можно добавить следующее. Проведенный Р. Моулом (1974) ретроспективный анализ опубликованных материалов об опухолях у детей выявил повышенную частоту лейкемии и злокачественных опухолей у детей, рожденных от матерей, прошедших радиографические обследования, в 10% случаев это были одиночные плоды, а в 55% – близнецы. Множественность наблюдавшихся лейкемий и солидных опухолей дает основание автору для уверенного заключения о причинно-следственной связи между этими заболеваниями и облучением плода.

По данным А. Стьюарта (1973), в первые 10 лет жизни у 15 млн одиночных детей и 350 тыс. близнецов, подвергшихся облучению во внутриутробном состоянии, относительный риск заболевания лейкемией или солидными опухолями возрастает в 1,5 раза для одиночных детей и соответственно в 2,2 и 1,6 раза для близнецов.

Суммируя все имеющиеся данные, в последнем обзоре 1997 г. Долл и Векфорд пришли к следующему заключению. Облучение *in utero* в малых дозах, особенно в последний триместр, увеличивает риск детского рака (регистрируемого в первые 10-15 лет жизни). Уже при дозе около 0,01 Гр (1 рад) риск детского рака увеличивается на 40% выше спонтанного уровня. Увеличение абсолютного риска при этом составляет около 6% на 1 Гр, что не сильно отличается от риска выживших после бомбардировки взрослых японцев.

При облучении зачатков половых органов у эмбрионов на ранней стадии развития можно ожидать иных последствий, чем при облучении гонад взрослого организма, хотя бы из-за различия радиочувствительности их половых клеток. Кроме того, изменения в небольшом числе таких зачаточных половых клеток эмбриона окажут гораздо больший эффект, так как они являются предшественниками огромного числа клеток эпителия половых желез взрослого человека, следовательно, любое воздействие излучения на первичную зародышевую клетку эмбриона передается всем клеткам ее последующих поколений.

Все изложенное дает основание для подтверждения справедливости раннего (1962) высказывания одного из основоположников радиационной эмбриологии Р. Рафа: «...ионизирующее излучение является и будет оставаться в будущем важнейшим орудием в деле расцвета цивилизации, как это уже было показано в медицине, в других областях науки и техники. Средняя продолжительность жизни человека увеличилась в значительной степени благодаря развитию радиологии. Тем не менее задача каждого радиоэмбриолога – подчеркивать, что эмбрион крайне радиочувствителен и что облучение его может вызвать далеко идущие последствия». Демонстрацией справедливости, высказанной Р. Рафом 40 лет назад точки зрения, является остающееся без изменений заключение НКДАР-84 о том, что радиочувствительность плода по индукции отдаленных последствий облучения в 10-300 раз больше по сравнению с взрослым организмом.

Таким образом, можно сделать заключение, что:

– организм эмбриона и плода обладает крайне высокой радиочувствительностью. Облучение в этот период даже в незначительных дозах (> 0,1 Гр) вызывает тератогенные эффекты в виде различных пороков развития, задержки умственного развития и уродств;

– вероятность появления конкретных тератогенных эффектов зависит от того, на какой стадии эмбрионального развития произошло облучение, а число и тяжесть эффектов – от дозы;

- наиболее чувствительным периодом является период от 8 до 15 нед. после зачатия;
- эмбрионные эффекты облучения в основном являются следствием прямого воздействия, на опосредованное действие радиации через организм матери приходится не более 5%;
- облучение эмбриона даже в малых дозах в 1,5-2 раза увеличивает спонтанный уровень детского (в первые 10-15 лет жизни) рака;
- диагностическое применение ионизирующих излучений в период беременности должно производиться только в исключительных случаях по строгим медицинским показаниям, учитывающим вероятность развития тератогенных эффектов.

3.6. РАДИАЦИОННЫЕ ПОРАЖЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА

В зависимости от вида излучений, дозы облучения и его условий возможно возникновение различных видов лучевого поражения: острая лучевая болезнь от внешнего облучения; острая лучевая болезнь от внутреннего облучения; хроническая лучевая болезнь; различные клинические формы с преимущественно локальным поражением отдельных органов (лучевые пневмониты, дерматиты, энтериты), которые могут характеризоваться острым, подострым или хроническим течением; отдаленные последствия, из которых наиболее существенны blastomatoses процессы (катаракта, стерильность, склеротические изменения). Сюда же следует отнести и последствия облучения эмбриона в утробе матери, тератогенные эффекты и генетические последствия, наблюдаемые у потомков облученных родителей.

3.6.1. Острая лучевая болезнь от внешнего равномерного облучения

Согласно определению А.К. Гуськовой (2001), острая лучевая болезнь (ОЛБ) представляет собой нозологическую форму, характеризующуюся совокупностью поражений ряда органов и тканей, в результате чего формируются основные клинические синдромы заболевания – костномозговой, кишечный или церебральный, а также переходные формы или их сочетания.

ОЛБ от внешнего облучения возникает в результате кратковременного (мгновенного или в течение нескольких часов-суток) воздействия

на все органы и ткани организма или большую их часть гамма и/или 1 нейтронного излучения в дозе, превышающей 1 Гр.

В настоящем разделе будут рассмотрены материалы, характеризующие прежде всего ОЛБ, вызванную кратковременным общим относительно равномерным внешним гамма-облучением или гамма+нейтронным облучением. В основном такие же закономерности отмечаются и при ОЛБ, вызванной преимущественным воздействием нейтронов, однако в последнем случае имеются некоторые особенности.

Таблица 39 – Клинические формы и степени тяжести острой лучевой болезни, вызванной общим внешним относительно равномерным облучением

| Доза, Гр | Клиническая форма | Степень тяжести | Прогноз для жизни | Смертность, % | Сроки гибели, сут. |
|----------|----------------------------|---------------------|----------------------------|---------------|--------------------|
| 1-2 | костномозговая | I (легкая) | абсолютно благоприятный | 0 | – |
| 2-4 | то же | II (средняя) | относительно благоприятный | 5 | 40-60 |
| 4-6 | то же | III (тяжелая) | сомнительный | 50 | 30-40 |
| 6-10 | то же | IV (крайне тяжелая) | неблагоприятный | 95 | 11-20 |
| 10-20 | кишечная | то же | абсолютно неблагоприятный | 100 | 8-16 |
| 20-50 | токсемическая (сосудистая) | то же | то же | 100 | 4-7 |
| Более 50 | церебральная | то же | то же | 100 | 1-3 |

Наблюдающиеся после облучения в дозе ниже 1 Гр незначительные клинические и гематологические проявления обозначают как острую лучевую реакцию. В частности, у лиц, облученных в дозах 0,5-0,75 Гр, в ранний период могут наблюдаться слабость, преходящие проявления нейроциркуляторной дистонии, иногда тошнота, а при длительном и тщательном наблюдении через 6-7 нед. после острого облучения может быть обнаружено небольшое (до нижней границы нормы) снижение числа нейтрофилов и тромбоцитов.

При облучении в дозах от 1 до 10 Гр формируется *костномозговая* форма ОЛБ. Эту форму называют также *типичной*, поскольку именно при ней наиболее ярко проявляются особенности патогенеза и течения ОЛБ, характеризующая ее клиническая симптоматика, чему в зна-

чительной мере способствует достаточно большая продолжительность жизни при костномозговой форме, даже если болезнь заканчивается смертельным исходом. Как очевидно из самого названия, развивающийся патологический процесс в данном случае определяется прежде всего поражением кроветворной ткани, проявляющимся инфекционными осложнениями, кровоточивостью, анемией.

При облучении в дозах от 10 до 20 Гр клиническую симптоматику и исходы поражения будут определять процессы, протекающие в эпителии тонкой кишки (*кишечная форма* ОЛБ). Радиационное воздействие в дозах от 20 до 50 Гр приводит к формированию *токсемической формы* ОЛБ, характеризующейся массивным поражением практически всех паренхиматозных органов и развивающейся вследствие этого токсемией. При облучении организма в дозах свыше 50 Гр на первый план выходит поражение центральной нервной системы, что и послужило основанием тому, чтобы назвать данный вариант лучевой патологии церебральной формой ОЛБ.

3.6.1.1. Костномозговая форма острой лучевой болезни

В течение ОЛБ может быть выделено несколько периодов: начальный период или период первичной реакции на облучение (ПРО), скрытый период (период мнимого благополучия, латентный), период разгара и период восстановления.

Основное клиническое проявление начального периода ОЛБ – синдром первичной реакции на облучение (ПРО).

Синдром ПРО характеризуется комплексом диспептических (анорексия, тошнота, рвота, диарея, дискинезия кишечника), нейромоторных (быстрая утомляемость, апатия, общая слабость) и нейрососудистых (потливость, гипертермия, гипотензия, головокружение, головная боль) проявлений, а также местными реакциями кожи и слизистых оболочек (гиперемия, зуд, жжение и т.д.).

Следует отметить, что весь перечисленный выше симптомокомплекс ПРО наблюдается только при облучении в дозах, близких к абсолютно смертельным (порядка 8-10 Гр). Наиболее низок дозовый порог (0,5-1 Гр) для возникновения анорексии, тошноты и рвоты, слабость и повышенная утомляемость типичны при облучении в дозах 1-2 Гр, головная боль и диарея – при 4-6 Гр, головокружение – при 6-8 Гр, а гипертермия появляется при облучении в дозе свыше 8-10 Гр.

Таблица 40 – Проявления первичной реакции при облучении в различных дозах

| Показатель | Степень тяжести ОЛБ (доза, Гр) | | | |
|---|---|--------------------------------------|--------------------------------|--|
| | I (1-2) | II (2-4) | III (4-6) | IV (> 6) |
| Рвота (начало и интенсивность) | через 2 ч и более, однократная | через 1-2 ч, повторная | через 0,5-1 ч, многократная | через 5-20 ч, неукротимая |
| Диарея | как правило нет | как правило нет | как правило нет | может быть |
| Состояние организма | кратковременная головная боль, сознание ясное | головная боль, сознание ясное | головная боль, сознание ясное | сильная головная боль, сознание может быть спутанным |
| Температура тела | нормальная | субфебрильная | субфебрильная | 38-39°C |
| Состояние кожи и видимых слизистых оболочек | нормальное | слабая преходящая гиперемия | умеренная преходящая гиперемия | выраженная гиперемия |
| Продолжительность первичной реакции | отсутствует или длится несколько часов | до 1 сут. | до 2 сут. | более 2-3 сут. |
| Двигательная активность | нормальная | закономерных изменений не отмечается | | адинамия |

При объективном исследовании в этот период обычно обнаруживаются гиперемия кожи, гипергидроз, лабильность вазомоторных реакций, тремор пальцев рук, тахикардия, при больших дозах – повышенная температура тела.

В костном мозге обнаруживают клетки с признаками пикноза ядер, апоптоза, цитолиза, снижение митотического индекса. После восстановления митотической активности увеличивается доля клеток с хромосомными aberrациями. К концу начального периода может развиваться довольно выраженное снижение числа кариоцитов в костном мозге, особенно наиболее молодых стадий их созревания. В крови наблюдают прогрессирующее снижение числа лимфоцитов. В течение первых 12-24 ч отмечается перераспределительный нейтрофильный лейкоцитоз.

К концу начального периода находящиеся в тканях и циркулирующие в крови токсические продукты в значительной мере разрушаются или выводятся, уровень патологической импульсации в нервную систему снижается, высокие компенсаторные возможности нервной системы обеспечивают восстановление ее функций и тем самым устраняются причины проявления симптомов первичной реакции. Изменения же в

костном мозге к этому времени не достигают еще крайней степени выраженности и скомпенсированы за счет сохранившихся резервов. Поэтому клинических проявлений, связанных с повреждением гемопо-эза, еще нет, и в развитии лучевой болезни наступает **скрытый период**. Жалобы на состояние здоровья в скрытом периоде отсутствуют или слабо выражены. Могут отмечаться симптомы астенизации и вегетативно-сосудистой неустойчивости (повышенная утомляемость, потливость, периодическая головная боль, расстройства сна и т.д.), продолжается постепенное опустошение костного мозга, начиная со снижения числа наименее зрелых и завершаясь исчезновением клеток, уже закончивших процесс созревания, а затем и уменьшение содержания функциональных клеток в крови.

Прогрессирует нейтропения, снижается количество тромбоцитов, продолжают развиваться морфологические изменения в нейтрофилах (гиперсегментация ядер, вакуолизация ядра и цитоплазмы, хроматолиз, токсическая зернистость в цитоплазме) и лимфоцитах (полиморфизм ядер). Выраженность и характер гематологических сдвигов, а также продолжительность скрытого периода зависят от степени тяжести лучевого поражения: чем выше доза облучения, тем он короче, а при крайне тяжелых формах ОЛБ начальный период может непосредственно перейти в **период разгара заболевания**.

Наступление этого периода совпадает, как правило, со снижением числа функциональных клеток (гранулоцитов и тромбоцитов) ниже критического значения (менее $1,0 \times 10^9/\text{л}$ для гранулоцитов и ниже $30 \times 10^9/\text{л}$ – для тромбоцитов). Клинически период разгара характеризуется развитием инфекционного и геморрагического синдромов, обусловленных агранулоцитарным иммунодефицитом и тромбоцитарной недостаточностью гемостаза.

Источником инфекционных осложнений при лучевых поражениях чаще всего является собственная микрофлора, вегетирующая в просвете желудочно-кишечного тракта, в дыхательных путях, на коже и слизистых оболочках: стафилококки, кишечная палочка, реже – протей, синегнойная палочка и др. В облученном организме оказывается сниженной сопротивляемость и к экзогенной инфекции. Серьезную опасность представляет внутригоспитальное заражение штаммами стафилококков, как правило, чрезвычайно устойчивых к антибиотикам.

Инфекционный синдром ОЛБ начинается с резкого ухудшения самочувствия, появляются общая слабость, головокружение, головная боль. Повышается температура тела, появляются ознобы и проливные поты, учащается пульс, нарушаются сон и аппетит. К наиболее частым

типам инфекционных осложнений ОЛБ относятся: язвенно-некротический тонзиллит, бронхит, очаговая пневмония, язвенно-некротические поражения кожи и слизистых оболочек.

В тяжелых случаях могут присоединиться вирусная инфекция, грибковые поражения. Тяжелыми проявлениями инфекционного синдрома костномозговой формы ОЛБ являются поражения слизистой оболочки ротоносоглотки – так называемый орофарингеальный синдром (гиперемия, отечность слизистой оболочки полости рта, изъязвления и эрозии на слизистой оболочке щек, мягкого неба и подъязычной области, часто осложняющиеся вторичной инфекцией, региональный лимфаденит и др.) могут наблюдаться уже при облучении в дозах порядка 3-5 Гр.

Ведущая роль в патогенезе синдрома инфекционных осложнений принадлежит пострадиационному угнетению иммунитета (иммунный статус организма в этот период определяют как вторичный общий иммунодефицит панцитопенического типа). Снижение антимикробной резистентности является следствием повреждения ряда специфических и неспецифических иммунных механизмов.

Это, во-первых, гибель высоко радиочувствительных лимфоцитов, в результате чего оказываются нарушенными все связанные с этими клетками иммунологические функции, в частности, реакции формирования гуморального и клеточного иммунного ответа.

Во-вторых, нарушаются функции макрофагов, которые сами по себе не отличаются высокой радиочувствительностью, но могут быть блокированы избытком антигенов (продуктов тканевого распада). В результате не только ограничиваются захват и деградация микроорганизмов, но и нарушается обработка антигена, необходимая для его восприятия Т-лимфоцитом, искажается порядок взаимодействия Т- и В-лимфоцитов, изменяется секреция ряда компонентов системы комплемента, лизоцима, интерферона, некоторых гемопоэтических ростовых факторов, необходимых для пролиферации и дифференцировки предшественников гранулоцитов и Т-лимфоцитов.

В-третьих, в период разгара максимально проявляется гранулоцитопения. В облученном организме, несмотря на подавление практически всех звеньев специфического иммунитета, сохраняется способность предотвратить генерализацию инфекционного процесса, пока содержание гранулоцитов в крови держится на уровне не менее $0,8-1,0 \times 10^9/\text{л}$. Более глубокое падение, как правило, совпадает с началом бурного развития инфекционного процесса. Возвращение к этому уровню в результате регенерации кроветворения – необходимое условие обратного развития проявлений вторичной инфекции.

С развитием вторичной инфекции и частично геморрагических проявлений костномозгового синдрома ОЛБ связано и еще одно грозное осложнение – **некротическая энтеропатия**. Она возникает в результате нарушения механизмов иммунологической защиты и связанных с этим количественных и качественных изменений микрофлоры кишки. В тысячи и даже десятки тысяч раз увеличивается общее число микробных тел в просвете кишки. Микрофлора поступает в верхние отделы кишечника, где ее обычно не бывает. Меняется соотношение между отдельными видами микробов. Появляется много штаммов, обладающих гемолитическими, протеолитическими, индол- и сероводород образующими свойствами. Увеличивается число микробных тел кишечной палочки, протей, стафилококков, энтерококков, анаэробов, тогда как количество молочнокислых бактерий резко снижается.

В условиях, когда нарушена барьерная функция кишки, резкое увеличение числа микробов в ее просвете ведет к постоянному их поступлению во внутреннюю среду, обсеменению внутренних органов и тканей, развитию интоксикации продуктами распада собственной микрофлоры.

Как и при других аутоинфекционных осложнениях лучевой болезни, в генезе дисбактериоза ведущая роль принадлежит агранулоцитозу, вследствие которого в просвете кишки резко снижается число фагоцитирующих лейкоцитов. Также имеют значение угнетение секреции бактерицидных веществ, очаговое отторжение эпителиальной выстилки, атония кишечника.

Некротическая энтеропатия клинически проявляется болями в животе, вздутием живота, частым жидким стулом, лихорадкой. В отдельных случаях может развиваться непроходимость кишечника (вследствие инвагинации кишки), прободение кишки и перитонит. При патологоанатомическом исследовании обнаруживаются атрофия слизистой оболочки кишечника, отек, кровоизлияния, участки некроза.

При общем внешнем облучении проявления некротической энтеропатии могут развиваться, если доза облучения достигает 5 Гр и более. Иногда описанные осложнения называют проявлениями кишечного синдрома. Следует избегать употребления этого термина в данной ситуации, поскольку очевидны существенные отличия сроков развития, патогенеза и клинических проявлений некротической агранулоцитарной энтеропатии от изменений, развивающихся после облучения в дозах, превышающих 10 Гр.

Термин **геморрагический синдром** применяют для обозначения клинических проявлений повышенной кровоточивости, наблюдающих-

ся в разгаре ОЛБ. Это и кровоточивость десен, и более выраженные носовые кровотечения, и обильные кровотечения – кишечные, желудочные, маточные, из почечных лоханок. Это и геморрагии различных размеров в кожу, подкожную клетчатку, слизистые оболочки, в паренхиму внутренних органов. Больше всего кровоизлияний при вскрытии обнаруживается обычно в сердце (по ходу венечных сосудов, под эндокард, в ушки предсердий), а также в слизистых оболочках желудочно-кишечного тракта.

Геморрагические проявления чаще всего начинаются с появления кровоизлияний в слизистые оболочки полости рта, а затем и на коже. Появляются носовые кровотечения, кровь в кале, иногда гематурия. Резко удлиняются время кровотечения и время свертывания крови, нарушается ретракция кровяного сгустка, увеличивается фибринолитическая активность крови.

Кровоточивость в облученном организме развивается в результате нарушения всех трех факторов, ответственных за сохранение крови в пределах сосудистого русла: количественного содержания и функциональных свойств тромбоцитов, состояния сосудистой стенки, состояния свертывающей и противосвертывающей систем.

При менее тяжелых вариантах течения ОЛБ период разгара переходит в *период восстановления*, начало которого характеризуется улучшением состояния здоровья: появляется аппетит, нормализуется температура тела и функция желудочно-кишечного тракта, повышается масса тела, исчезают симптомы кровоточивости. Отмечаются признаки регенерации гемопоэза: в крови появляются ретикулоциты, юные и палочкоядерные нейтрофилы. Однако в это же время продолжает прогрессировать (до 5-6 мес. после облучения) анемия: число эритроцитов, как и большинство биохимических показателей крови, восстанавливается лишь спустя 8-10 мес. после радиационного воздействия.

Длительное время (иногда в течение нескольких лет) у больных сохраняются психические и вегетативно-сосудистые расстройства невротического, ипохондрического и астенодепрессивного характера (эмоциональная лабильность, напряженность, тревожность, различные формы патологии черепно-мозговых нервов, тремор пальцев рук и т.д.). Возможно развитие гастрита, эзофагита, гепатита. При лучевом поражении кожи период выздоровления протекает волнообразно, с рецидивами эритемы кожи, отеком подкожной клетчатки. После облучения в дозах свыше 3 Гр в период восстановления могут формироваться катаракты, возможно поражение сетчатки глаз, снижение остроты зрения.

Средняя длительность периода восстановления составляет от трех до шести месяцев.

У больных, перенесших ОЛБ, в течение длительного времени, иногда всю жизнь, могут сохраняться остаточные явления и развиваться отдаленные последствия.

Остаточные явления представляют собой последствия неполного восстановления повреждений, лежавших в основе острого поражения: лейкопения, анемия, стерильность и др.

Отдаленные последствия – новые патологические процессы, которые в силу достаточно длительного скрытого периода для своего развития в периоде разгара ОЛБ не проявлялись: катаракты, склеротические изменения, дистрофические процессы, новообразования; сокращение продолжительности жизни. Практически остаточные явления и отдаленные последствия не всегда легко различить.

Здесь следует упомянуть также и генетические последствия, проявляющиеся у потомства облученных родителей в результате мутагенного действия радиации на герминативные клетки.

*Краткая характеристика степеней тяжести
костномозговой формы острой лучевой болезни*

Выраженность различных синдромов ОЛБ, сроки начала и продолжительность различных периодов ее течения зависят от степени тяжести заболевания.

Таблица 41 – Общая характеристика костномозговой формы ОЛБ различной степени тяжести (по данным Г.М. Аветисова и соавторов, 1999)

| Показатель | Степень тяжести ОЛБ | | | |
|--|---------------------|----------------|----------------------------|--------------------------------|
| | I (легкая) | II (средняя) | III (тяжелая) | IV (крайне тяжелая) |
| Продолжительность синдрома ПРО | может отсутствовать | от 4-6 до 10 ч | более 12 ч (до 1-1,5 сут.) | более 2 сут. |
| Латентный период | неотчетливый | до 2 нед. | 1-2 нед. | до 1 нед., может отсутствовать |
| Цитопения | на 4-5 нед. | на 3-4 нед. | на 2-3 нед. | с 1-2 нед. |
| Минимальное число лейкоцитов $\times 10^9$ /л | 1,5-2 | менее 1,0 | < 0,1-0,5 | единичные в препарате |
| Минимальное число тромбоцитов $\times 10^9$ /л | 40-50 | 20-40 | 10-20 | 0-10 |

При ОЛБ I (легкой) степени первичная реакция может отсутствовать или проявляться в виде умеренно выраженной тошноты, головной боли, общей слабости, однократной рвоты. Латентный период длится 4-5 нед., число лейкоцитов в периоде разгара (если он регистрируется клинически) снижается до $1,5-2 \times 10^9/\text{л}$, тромбоцитов – до $40-50 \times 10^9/\text{л}$. Клинические признаки разгара носят характер астеновегетативного синдрома (общая слабость, нарушения нейровисцеральной регуляции). В период восстановления возможно снижение тонуса мозговых сосудов, эмоциональная лабильность, акрогипергидроз.

ОЛБ II (средней) степени характеризуется достаточно выраженной первичной реакцией продолжительностью от 6 до 10 ч (тошнота, повторная или неоднократная рвота). Время появления рвоты – около 1-2 часов. Изредка регистрируются общемозговые явления, нарушения черепно-мозговой иннервации, умеренные вегетативно-сосудистые расстройства. В период разгара (в случае развития агранулоцитоза) повышается температура, возможны инфекционные осложнения, кровоточивость (при снижении числа тромбоцитов в крови до $20-40 \times 10^9/\text{л}$). Наблюдаются симптомы астеновегетативного характера (общая слабость, головная боль). Продолжительность периода разгара составляет около 2 недель. В фазе восстановления у некоторых пострадавших сохраняются психические и вегетативно-сосудистые нарушения в рамках неврастенического, ипохондрического, астено-депрессивного или вегетативно-дистонического синдромов.

При ОЛБ III (тяжелой) степени синдром ПРО развивается спустя 0,5-1 ч (чаще через 1,5-2 ч) после облучения и длится более 1 суток. Рвота, как правило, обильная, многократная, отмечаются выраженная общая слабость, головная боль, субфебрильная температура. Реже наблюдаются головокружение, гиперемия кожных покровов, диарея. Скрытый период продолжается 1-2 недели. Период разгара характеризуется инфекционно-токсическими проявлениями, возможны симптомы печеночно-почечной недостаточности и радиационно-токсической энцефалопатии (оглушенность, мозговая кома, острый психоз и др.). Агранулоцитоз развивается в 100% случаев, сопровождается выраженной лихорадкой, уровень СОЭ достигает 40-80 мм/ч, у 30% пострадавших возможно развитие герпетической инфекции с угрозой поражения легких. При критическом падении уровня тромбоцитов ($10-20 \times 10^9/\text{л}$) развивается геморрагический синдром с множественными кровоизлияниями в кожу, слизистые оболочки, мозг, сердце, легкие, желудочно-кишечный тракт. Велика опасность внутренних кровотечений.

У больных, перенесших острый период ОЛБ, длительное время сохраняются астено-невротические расстройства в сочетании с вегетативно-сосудистой и эмоциональной лабильностью, депрессивным фоном настроения, стойкая микроочаговая симптоматика (признаки нарушения функции черепно-мозговых нервов, гипер- и анизорефлексия, нистагм, патологические рефлексы и др.). При реоэнцефалографическом исследовании обнаруживаются признаки повышения тонуса мозговых сосудов, снижение кровенаполнения с признаками затруднения венозного оттока.

ОЛБ IV (крайне тяжелой) степени характеризуется ранней и чрезвычайно выраженной ПРО (тошнота, многократная рвота, головная боль, общая слабость, гиперемия, диарея, анизо- и гипорефлексия, нистагм), переходящей (часто без латентного периода) в разгар заболевания. На фоне быстро развивающегося агранулоцитоза отмечаются все классические признаки инфекционно-токсического синдрома ОЛБ – лихорадка, бактериемия, септицемия, радиационно-токсическая энцефалопатия, мозговая, печеночная и почечная кома.

Прогноз для жизни при ОЛБ легкой степени благоприятный; при ОЛБ средней степени адекватное лечение в большинстве случаев гарантирует выздоровление; при ОЛБ тяжелой степени прогноз сомнительный: выживание возможно при отсутствии местных поражений и использовании интенсивной комплексной терапии. При облучении в дозах 6-10 Гр (крайне тяжелая степень ОЛБ) прогноз неблагоприятный, хотя и не безнадежный. Более высокие дозы облучения, как правило, приводят к летальному исходу, несмотря на проводимую терапию.

3.6.1.2. Кишечная форма острой лучевой болезни

После общего облучения в дозах 10-20 Гр развивается кишечная форма ОЛБ, при которой обычно также можно выделить отдельные периоды, соответствующие тем, которые описывались при костномозговой форме.

Начальный период отличается большей тяжестью проявлений и большей длительностью тех симптомов, которые преобладают и при костномозговой форме: тошноты, рвоты, анорексии, прогрессирующей общей слабости, которую иногда характеризуют как нарастающую летаргию, гиподинамию. Кроме того, при кишечной форме уже с первых дней часто присоединяется диарея, снижается артериальное давление (иногда развивается коллаптоидное состояние). Весьма выражена и длительно сохраняется ранняя эритема, проявляющаяся гиперемией кожи и слизистых оболочек. Температура тела в начальном периоде повышает-

ся до фебрильных цифр. Больные жалуются на боли в животе, миалгии, артралгии, головные боли. Продолжительность первичной реакции при кишечной форме ОЛБ составляет 2-3 суток. Затем может наступить кратковременное (не более 2-3 суток) улучшение общего состояния (*эквивалент скрытого периода* ОЛБ), однако проявления заболевания в этом случае полностью не исчезают.

Наступление **периода разгара** кишечной формы ОЛБ проявляется резким ухудшением общего состояния, развитием диареи, повышением температуры тела до 39-40 °С. Снова резко снижается аппетит. В результате атонии желудка пищевые массы могут надолго задерживаться в нем. Нарушаются процессы всасывания в кишечнике, масса тела начинает быстро снижаться. Количество лейкоцитов в крови катастрофически падает. Развиваются тяжелые проявления орофарингеального синдрома, обезвоживания, интоксикации и эндогенной инфекции, которой способствует раннее наступление агранулоцитоза. Появляющиеся в слизистой оболочке кишечника геморрагии и инфекционные осложнения еще в большей степени отягощают состояние пораженных.

При условии лечения пораженные с кишечной формой ОЛБ от внешнего равномерного облучения могут прожить до двух и даже двух с половиной недель. Связанная с лечением сравнительно большая продолжительность жизни человека при этой форме ОЛБ объясняет развитие у него выраженных проявлений вторичной инфекции и кровоточивости, возникающих прежде всего из-за подавления кроветворной функции. Гибель пострадавших наступает при явлениях энтерита, пареза и непроходимости кишечника, нарушений водно-электролитного обмена, нарастания сердечно-сосудистой недостаточности.

Смертельному исходу обычно предшествует развитие сопора и комы.

3.6.1.3. Токсемическая форма острой лучевой болезни

Токсемическая форма развивается после облучения в диапазоне 20-50 Гр. Для этой формы характерны тяжелые гемодинамические расстройства, связанные с парезом и повышением проницаемости сосудов, проявления общей интоксикации, как следствие проникновения во внутреннюю среду продуктов распада тканей, первичных и вторичных радиотоксинов, эндотоксинов кишечной микрофлоры. Более поздние проявления сходны с симптомами церебральной формы, но по сравнению с последней они несколько отодвинуты во времени: если при церебральной форме продолжительность жизни не превышает чаще всего

48 ч, то при токсемической смертельные исходы наступают в течение 4-7 суток.

Нарушения функций нервных центров при токсемической форме в значительной мере обусловлены токсемией, а также снижением питания и снабжения кислородом нервных клеток вследствие расстройства гемодинамики в головном мозге, повышения проницаемости сосудов гематоэнцефалического барьера и проникновения в межклеточные пространства богатой белком жидкости, механически сдавливающей, помимо всего прочего, нервные клетки. В связи со значимостью расстройств циркуляции в развитии токсемической формы ОЛБ ее называют еще сосудистой.

3.6.1.4. Церебральная форма острой лучевой болезни

В основе церебральной формы ОЛБ, развивающейся у человека после облучения в дозах 50 Гр и выше, лежит синдром поражения центральной нервной системы. При таком уровне доз даже в высокорезистентных нервных клетках количество повреждений становится несовместимым с их нормальным функционированием. Очень важное значение для развития церебрального синдрома имеет прогрессирующий дефицит макроэргов в нервных клетках, связанный с повышенным потреблением никотинадениндинуфосфат (НАД) в интересах репарации молекулярных повреждений ДНК.

Повреждение нервных клеток и кровеносных сосудов приводит к тому, что почти сразу же после облучения развивается тяжелое общее состояние, характеризующееся обильной рвотой, поносом, прострацией, а в ряде случаев временной (на 20-40 мин) потерей сознания (**синдром ранней преходящей недееспособности**). В дальнейшем сознание может восстановиться, но развиваются прогрессирующие признаки отека мозга, психомоторное возбуждение, атаксия, дезориентация, гиперкинезы, клонические и тонические судороги, расстройства дыхания, сосудистого тонуса, кома.

В связи с небольшой продолжительностью жизни пораженных с церебральной формой ОЛБ в периферической крови успевают обнаружиться лишь самые начальные проявления костномозгового синдрома: нейтрофильный лейкоцитоз, достигающий уровня $20-30 \times 10^9/\text{л}$ уже в первые часы после облучения, и глубокая лимфопения.

Смерть пострадавших обычно наступает в течение не более чем 48 ч после облучения от паралича дыхательного центра.

3.6.2. Биологическое действие инкорпорированных радионуклидов

У многих радионуклидов существенная в биологическом отношении активность содержится в очень малом количестве вещества. Так, масса 50 мкКи полония-210 (доза, при поступлении которой в организм человека можно ожидать развития глубоких нарушений функций печени и почек) составляет всего 12×10^{-9} г, а 1 мКи стронция-90 (ЛД_{50/30} для крыс) содержится в 8 мкг этого изотопа. Даже труднорастворимые соединения радионуклидов в столь малых количествах часто оказываются в растворе в виде ионов, что значительно облегчает их проникновение через биологические барьеры, всасывание и распространение по организму.

3.6.2.1. Пути поступления радиоактивных веществ в организм

Во внутреннюю среду РВ могут попасть ингаляционно, через стенки желудочно-кишечного тракта, через травматические и ожоговые повреждения, через неповрежденную кожу. Всосавшиеся РВ через лимфу и кровь могут попасть в ткани и органы, фиксироваться в них, проникнуть внутрь клеток и связаться с внутриклеточными структурами.

Знание пути поступления радионуклида в организм весьма важно в практическом отношении. У ряда РВ характер всасывания, распределение по органам и тканям, выведение и биологическое действие существенно зависят от пути поступления.

Ингаляционное поступление радиоактивных веществ. Общая поверхность альвеол составляет около 100 м^2 , что приблизительно в 50 раз превышает поверхность кожи, и при контакте, особенно профессиональном, с аэрозолями РВ, радиоактивными газами и парами ингаляционный путь заражения является основным.

Радионуклиды, попавшие в органы дыхания, в различной степени могут задерживаться в легких и верхних дыхательных путях. На количество РВ, остающееся в органах дыхания после выдоха, влияют прежде всего аэродинамические свойства аэрозоля, зависящие от размера, плотности, формы частиц, от их влажности, гигроскопичности, растворимости и химической природы. В легких откладываются преимущественно частицы диаметром от 0,01 до 1 мкм. Имеют значение и анатомо-физиологические особенности дыхательной системы, в частности, соотношение размеров альвеолярных и бронхиальных поверхностей,

минутный объем легких, частота дыхания, скорость движения воздуха по дыхательным путям.

Метаболизм радионуклидов, оставшихся после выдоха в органах дыхания, определяется следующими основными процессами:

- ретроградным выносом частиц со слизью в результате деятельности мерцательного эпителия в глотку с последующим их заглатыванием (отчасти, отхаркиванием);

- резорбцией РВ в кровь через альвеолярные мембраны с последующим отложением в органах или выведением. Резорбции подвергаются преимущественно растворимые частицы. В зависимости от их растворимости время резорбции может составлять от нескольких десятков минут до нескольких дней и даже более. Степень резорбции одного и того же радионуклида сильно зависит от химической формулы соединения, в состав которого он входит;

- фагоцитозом макрофагами нерастворимых частиц и коллоидных форм радионуклидов. Часть захвативших радионуклиды фагоцитов ретроградно удаляется в глотку и заглатывается или отхаркивается. Другая часть транспортируется лимфой и откладывается в бронхо-легочных узлах. Наибольшее практическое значение этот вид отложения имеет при ингаляционном поступлении нерастворимых или слабо растворимых соединений плутония, тория, цезия.

Около 10% радионуклидов, захваченных фагоцитами, перемещаются через альвеолярную мембрану с периодом полувыведения около нескольких дней. Небольшая часть РВ задерживается в паренхиме легких, эпителиальных клетках: период полувыведения из них составляет около 600 суток. Еще прочнее фиксация РВ в бронхо-легочных лимфатических узлах, куда они попадают с фагоцитами.

При оценке опасности ингаляционного поступления РВ учитывают лучевую нагрузку на легкие, эпителий бронхов, регионарные лимфатические узлы, на стенку желудочно-кишечного тракта, последствия резорбции, а в случае ингаляции гамма излучающих радионуклидов определенное значение может иметь и облучение других органов грудной полости.

При поступлении радионуклидов через органы дыхания их химические соединения подразделяются на три ингаляционных класса в зависимости от длительности эффективного периода полувыведения ($T_{эфф.}$) из легких. К классу «М» (медленный) отнесены соединения с $T_{эфф.}$ более 100 сут., к классу «П» (промежуточный) – с $T_{эфф.}$ от 10 до 100 сут. и к классу «Б» (быстрый) – с $T_{эфф.}$ менее 10 суток.

Поступление радиоактивных веществ через желудочно-кишечный тракт. Желудочно-кишечный тракт – второй основной путь поступления РВ в организм. Оно может произойти как непосредственно после их попадания во внешнюю среду, так и после прохождения по биологическим цепочкам. Поражающее действие при алиментарном поступлении радиоактивных веществ связано как с лучевой нагрузкой на стенку пищеварительного тракта, так и с всасыванием РВ в кровь и лимфу.

Продвижение радионуклидов по желудочно-кишечному тракту не имеет каких-то особенностей по сравнению с нерадиоактивными веществами, содержащимися в пище. Резорбция РВ зависит от химических свойств вещества (главным образом, растворимости), физиологического состояния желудочно-кишечного тракта (рН среды, моторная функция), состава пищевого рациона. Молоко, например, способствует усилению всасывания радиоактивного стронция. Резорбция радионуклидов снижается при увеличении содержания в пище стабильных изотопов этих же элементов и наоборот.

Преимущественно через ЖКТ поступают и всасываются **щелочные элементы** – К, Са, Na, Rb, Cs, I, и в меньшей степени – **щелочно-земельные элементы** – Sr (40-60%), Со (30%), Mg (10%), Zn (10%), Ва (5%). **Трансурановые элементы и редкоземельные металлы** в желудочно-кишечном тракте образуют труднорастворимые соединения и поэтому степень их всасывания очень низкая – Po – 6%, Ru – 3%, U – 3-6%, Pu – 0,01%, Zr – 0,01%.

Всасывание хорошо растворимых радионуклидов происходит в основном в тонкой кишке. Значительно меньше РВ всасывается в желудке. Всасывание в толстой кишке практического значения не имеет. Наиболее интенсивно и полно резорбируются растворимые радионуклиды, находящиеся в ионной форме. Радионуклиды щелочных металлов и галоидов после попадания в желудочно-кишечный тракт практически полностью всасываются в кровь. Изотопы редкоземельных элементов, плутония, трансурановых элементов вследствие склонности их солей к гидролизу и образованию труднорастворимых и нерастворимых соединений всасываются в кишке в пределах нескольких сотых-десятитысячных долей процента от поступившего количества. Всосавшиеся радионуклиды могут повторно и неоднократно (с желчью, кишечными соками) поступать в желудочно-кишечный тракт и дополнительно облучать его слизистую оболочку.

Все сказанное относится и к радиоактивным продуктам, вторично попавшим в желудочно-кишечный тракт после ингаляционного поступления.

Нерастворимые и мало растворимые гамма-излучатели облучают кишечник и другие органы брюшной полости, а бета-излучатели – только слизистую оболочку кишки, в основном до выведения радионуклидов с калом, в течение примерно 30 часов. Однако в криптах кишечника РВ могут задерживаться в течение длительного времени, формируя высокие локальные дозы.

При нормировании поступления радионуклидов в организм с водой и пищей, так же как и при нормировании ингаляционного поступления, исходят из той предпосылки, чтобы при достижении предела годового поступления (ПП) величина дозы, накопленной за год, равнялась величине соответствующего годового предела дозы.

Поступление радиоактивных веществ через неповрежденные кожные покровы, раневые и ожоговые поверхности. Большинство радиоактивных веществ практически не проникают через неповрежденную кожу. Исключение составляют окись трития, йод, нитрат и фторид уранила, а также полоний. Коэффициенты резорбции в этих случаях составляют сотые и тысячные доли единицы.

Проникновение РВ через кожу зависит от площади загрязненного участка, от физико-химических свойств соединения, в состав которого они входят, растворимости в воде и липидах, рН среды, от физиологического состояния кожи. Всасывание радионуклидов повышается при повышении температуры среды вследствие расширения кровеносных и лимфатических сосудов, раскрытия сальных и потовых желез.

Требует особого внимания радиоактивное загрязнение ран в производственных и лабораторных условиях. Основную опасность в случае производственного заражения представляет резорбция высокотоксичных радионуклидов (например, полоний), которая у растворимых РВ может достигать десятков процентов от общего количества, поступившего в рану. Большие количества РВ могут поступить не только через колотые или резаные раны, но и через небольшие царапины и ссадины. Всасывание через них щелочных, щелочноземельных элементов и галлоидов в 100-200 раз превышает резорбцию через неповрежденную кожу; это всасывание с поверхности раны трудно растворимых РВ (чаще всего относится и к продуктам ядерного взрыва) происходит медленнее и в значительно меньшем количестве, но все же в сотни раз интенсивнее, чем через интактную кожу. С поверхности ожогов I-II степеней продукты ядерного взрыва всасываются всего в 2-10 раз быстрее.

Проявление общего действия резорбированных продуктов ядерного взрыва с раневых и ожоговых поверхностей мало вероятно. Лишь в редких случаях возможно поступление через раны значительных количеств редкоземельных элементов.

Резорбция плохо растворимых соединений РВ в основном происходит по лимфатическим путям, в результате чего радионуклиды накапливаются в лимфатических узлах. Оттуда некоторая часть радионуклидов с фагоцитами поступает в органы ретикулоэндотелиальной системы. Последствия резорбции чаще всего связаны с избирательной тропностью тех или иных изотопов к отдельным органам (новообразования, лейкозы, другие системные заболевания крови).

В месте нахождения радионуклида в плохо растворимой форме могут возникнуть опухоли (чаще остеогенные саркомы). Имеет значение и воздействие ионизирующего излучения на течение раневого процесса. При поступлении в рану большого количества плохо резорбирующихся радионуклидов под влиянием облучения в клетках тканей раневой поверхности развиваются дегенеративные и некротические процессы, снижается способность клеток к размножению. В ранах часто развиваются гнойные, иногда анаэробные процессы. Медленно отторгаются некротизированные ткани, замедляется регенерация.

3.6.2.2. Метаболизм радиоактивных веществ, всосавшихся в кровь

В крови радионуклиды могут находиться в свободном состоянии или в составе различного рода химических соединений и комплексов. Значительная часть радионуклидов связывается протеинами. Часть радионуклидов, попавших в кровь, выводится из организма, другая часть проникает в органы и депонируется в них. Знание характера распределения, особенностей обмена и депонирования РВ, возможного их перераспределения со временем необходимо для предсказания преимущественного поражения того или другого органа, дозы облучения этого критического органа, клинических проявлений и исхода поражения.

Понятия *концентрация* и *содержание* радионуклида в органе не являются синонимами. Под концентрацией понимают удельную активность радионуклида, выражаемую в Бк/г, а содержание – это абсолютное значение активности в целом органе. Концентрация РВ в органе после однократного поступления постепенно снижается, что зависит от радиоактивного распада изотопа и его биологического выведения.

Суммарная константа уменьшения концентрации изотопа в органе ($T_{эфф.}$) представляет собой сумму констант радиоактивного распада

и биологического выведения. При расчетах чаще пользуются понятием эффективного периода полувыведения – $T_{эфф.}$. Он связан с периодом полураспада и периодом биологического полувыведения:

$$T_{эфф.} = (T_{физ.} \times T_{биол.}) / (T_{физ.} + T_{биол.}).$$

При длительном поступлении РВ в организме или в отдельном органе ежедневно накапливается определенная доля поступившего за эти сутки количества. Показателем этого накопления служит величина, называемая «кратностью накопления». Эта величина показывает, во сколько раз содержание радионуклида превышает величину его ежедневного поступления. Так, если к концу поступления РВ в организме содержится 150% от величины суточного поступления, кратность накопления составит 1,5.

Бывает, что после одноразового сравнительно массивного радиоактивного заражения поступление РВ в организм не прекращается полностью, а продолжается длительное время, но в меньших количествах. В этих случаях могут преобладать (в зависимости от уровня поступления) либо процессы депонирования в органе, либо процессы выведения из него.

3.6.2.3. Выведение радиоактивных веществ из организма

Попавшие в организм РВ могут выводиться через почки, желудочно-кишечный тракт (в том числе с желчью), легкие, а также со слюной, молоком, потом. В большинстве случаев основные количества РВ экскретируются с калом и мочой. С калом преимущественно выводятся РВ, поступившие алиментарным путем, а также и при ингаляционном заражении и вторичном заглатывании частиц, вынесенных ретроградно в глотку. Некоторые растворимые радионуклиды могут выделяться с желчью и другими пищеварительными соками и также выводиться с калом. В желудочно-кишечном тракте процессы экскреции РВ постоянно сопровождаются процессами их реабсорбции.

При выведении радионуклидов преимущественно с мочой высокая доза облучения может быть получена почками.

Выведение с выдыхаемым воздухом имеет существенное значение для трития, паров окиси трития, радона и торона, образующихся при распаде поступивших в организм радия и тория.

Динамика выведения РВ из организма описывается теми же формулами, которые приводились в предыдущем разделе при характеристике скорости уменьшения концентрации радионуклидов в отдельных орга-

нах. По содержанию РВ в выделениях можно судить о количестве их в организме как на момент определения, так и на момент поступления.

Таким образом, в обмене поступивших в организм радионуклидов можно выделить четыре основные стадии:

- образование на месте поступления первичного депо (кожа, раны, слизистые оболочки желудочно-кишечного тракта, верхних дыхательных путей);
- всасывание с мест поступления в кровь или лимфу;
- депонирование в критическом органе (образование вторичных депо);
- выведение различными путями, в том числе и с явлениями рециркуляции.

Продолжительность названных стадий существенно различается для различных радионуклидов и их соединений, а также для разных путей поступления РВ в организм.

Указанные положения должны учитываться при оценке клинической картины поражения и планировании лечебно-профилактических мероприятий. Особенности пространственного и временного распределения дозы определяют характер течения поражения отдельными радионуклидами, различающийся как по особенностям проявления, так и по срокам формирования эффектов. В зависимости от этого меняются и конкретные диагностические, и лечебные мероприятия в различные сроки с момента заражения, и прогностическая оценка данных радиометрических определений.

3.6.2.4. Биологическое действие радиоактивных веществ

При внутреннем радиоактивном заражении (инкорпорации радионуклидов) количество поступивших в организм радионуклидов чаще всего не может создать в течение короткого времени дозы, достаточно высокой для развития острого лучевого поражения. В этих случаях более характерно развитие хронической лучевой болезни.

При внутреннем радиоактивном заражении концепция критического органа представляется сложнее, чем при общем внешнем облучении. В этом случае прежде всего имеют значение особенности распределения радионуклидов по органам и тканям (тропность радионуклидов). Важным фактором являются значения пороговых повреждающих доз для разных тканей. По способности преимущественно накапливаться в тех или иных органах выделяют следующие основные группы радиоактивных элементов (табл. 42).

Таблица 42 – Типы распределения радиоактивных элементов в организме

| Тип распределения | Элементы |
|--------------------------|--|
| Равномерный (диффузный) | Элементы I группы периодической системы: H, Li, Na, K, Rb, Cs, Ru, Cl, Br и др. |
| Скелетный (остеотропный) | Щелочно-земельные элементы: Be, Ca, Sr, Ra, Zr, Ir, F и др. |
| Печеночный | La, Ce, Pm, Pu, Th, Mn и др. |
| Почечный | Bi, Sr, As, U, Se и др. |
| Тиреотропный | I, Br, As |

Орган, в котором происходит избирательное накопление радионуклидов и вследствие чего он подвергается наибольшему облучению и повреждению, называется **критическим**.

Из данных таблицы видно, что радионуклиды, избирательно откладывающиеся в костях – остеотропные. Это щелочноземельные элементы: радий, стронций, барий, кальций.

Остеотропность проявляют некоторые соединения плутония и тория. Поражения, развивающиеся при поступлении в организм остеотропных радионуклидов, прежде всего характеризуются изменениями в кровеносной и костной системах. В начальные сроки после массивных поступлений патологический процесс может напоминать острую лучевую болезнь от внешнего облучения. В более поздние сроки обнаруживаются костные опухоли, лейкозы. Поздние эффекты могут наблюдаться и после инкорпорации сравнительно небольших активностей.

Радионуклиды, избирательно накапливающиеся в органах, богатых элементами ретикулоэндотелиальной системы (гепатотропные). Это изотопы редкоземельных элементов (лантан, церий, прометий, празеодим), а также актиний, торий и некоторые соединения плутония. При их поступлении наблюдаются поражения печени, проксимальных отделов кишки (эти элементы, выделяясь с желчью, реабсорбируются в кишечнике и поэтому могут неоднократно контактировать со слизистой оболочкой тонкой кишки). В более поздние сроки наблюдаются циррозы, опухоли печени. Могут проявиться также опухоли скелета, желез внутренней секреции и опухоли другой локализации.

Радионуклиды, равномерно распределяющиеся по организму. Это изотопы щелочных металлов (цезия, калия, натрия, рубидия), водорода, углерода, азота, а также изотопы некоторых других элементов, в частности полония. При их поступлении поражения носят диффузный характер: развивается атрофия лимфоидной ткани, в том числе селезенки,

атрофия семенников, нарушения функции мышц (при поступлении радиоактивного цезия). В поздние сроки наблюдаются опухоли мягких тканей: молочных желез, кишечника, почек и т.п.

В отдельную группу выделяют радиоактивные изотопы йода, избирательно накапливающиеся в щитовидной железе. При их поступлении в большом количестве вначале наблюдается стимуляция, а позже угнетение функции щитовидной железы. В поздние сроки развиваются опухоли этого органа.

Плохо резорбирующиеся радионуклиды, которые являются причиной возникновения местных процессов, локализующихся в зависимости от путей поступления РВ.

В зависимости от физико-химической формы соединения, в состав которого входит радионуклид, особенно от его растворимости, в роли критических могут выступать различные органы. Так, при ингаляционном поступлении нерастворимых соединений элементов из группы остеотропных или равномерно распределяющихся по телу критическим органом оказываются легкие. В разные сроки после поступления радионуклида в организм распределение его по органам может быть различным, то есть роль критических могут выполнять различные органы.

При оценке биологического действия радионуклидов следует учитывать, что быстро обновляющиеся клетки подвергаются при инкорпорации РВ кратковременному облучению, тогда как необновляющиеся облучаются в течение всего периода нахождения РВ в организме.

При поступлении радионуклидов в организм в количествах, обеспечивающих накопление в течение короткого срока (несколько дней) среднетканевой дозы, эквивалентной 1 Гр гамма-облучения и выше, развивается острое лучевое поражение.

Отмечено возрастание частоты злокачественных новообразований у больных, которым в течение нескольких лет назначали внутрь небольшие количества радия. Хорошо известно профессиональное возникновение костных сарком у работников, занимавшихся нанесением светового состава, содержащего радий, на циферблаты (во время работы женщины прикасались губами к кисточке со световым составом).

Ранее в рентгенодиагностике широко применяли как контрастное средство торотраст. Оказалось, что входящий в его состав торий полностью выводится с мочой, а частично фагоцитируется и откладывается в клетках ретикулоэндотелиальной системы в лимфатических узлах, селезенке, печени. Альфа-излучение тория явилось в ряде случаев причиной возникновения сарком, карцином, лейкозией. Следует также упомянуть высокую частоту возникновения рака легких у шахтеров урановых

рудников. Экспериментальные данные показывают, что зависимость между количеством инкорпорированного радионуклида и числом возникших злокачественных новообразований имеет максимум, после которого выход опухолей на единицу активности снижается. Обычно этот факт объясняют гибелью части злокачественно трансформированных клеток при воздействии высоких доз излучения.

Среди отдаленных последствий внутреннего радиоактивного заражения не менее важное место, чем при внешнем облучении, занимают генетические последствия.

3.6.2.5. Особенности действия отдельных биологически значимых радионуклидов

Радиоактивный йод (¹³¹I и другие изотопы)

Йод-131 представляет собой бета-, гамма-излучатель с периодом полураспада 8,05 суток. Энергия бета-частиц составляет 0,25-0,82 МэВ, энергия гамма-квантов – от 0,08 до 0,72 МэВ. Гамма-постоянная изотопа равна $2,156 \text{ Р} \times \text{см}^2 \times \text{ч}^{-1} \times \text{мКи}^{-1}$.

Соединения йода хорошо растворимы, и при алиментарном поступлении практически полностью всасываются в кровь. Большая часть йода всасывается и при ингаляционном поступлении.

Около 30% поступившего в кровь йода откладывается в щитовидной железе, и выводится из нее с биологическим периодом полувыведения ($T_{\text{биол.}}$) 120 суток. Эффективный период полувыведения ($T_{\text{эфф.}}$) из щитовидной железы равен 7,5 суток. Остальные 70% абсорбированного йода равномерно распределяются по различным органам и тканям. Биологический период полувыведения этой фракции составляет 12 сут., а эффективный – 4,8 суток. Около 10% от этой фракции радиоактивного йода выводится с калом, а основная часть – с мочой. Некоторое количество изотопов йода выводится через легкие, а также с потом, слюной, молоком.

У взрослого человека при алиментарном поступлении 1 мКи йода-131 ожидаемая эквивалентная доза облучения щитовидной железы составляет 0,018 Зв ($4,8 \times 10^{-7}$ Зв/Бк), а при ингаляционном поступлении – $2,9 \times 10^{-7}$ Зв/Бк.

Доза облучения щитовидной железы детей и подростков при поступлении такого же количества радиоактивного йода больше из-за меньшей массы щитовидной железы. Тем не менее для оценки дозы облучения щитовидной железы детей при поступлении йода-131 можно использовать дозовые коэффициенты для взрослого, перемножив их на от-

ношение масс щитовидной железы взрослого человека и ребенка данной возрастной группы.

Если содержание йода-131 в щитовидной железе измерено с помощью приборов типа СРП, то доза облучения этого органа может быть рассчитана с помощью следующих дозовых коэффициентов: 6,5 эр/мкКи ($1,8 \times 10^{-6}$ Зв/Бк) для взрослого человека с массой щитовидной железы 20 г и 65 бэр/мкКи ($1,8 \times 10^{-5}$ Зв/Бк) для ребенка 1 года.

После однократного поступления йода-131 доза облучения щитовидной железы накапливается очень быстро. Большинство других радиоактивных изотопов йода имеют более короткий период полураспада и характеризуются меньшей радиотоксичностью. Поэтому при определении содержания радиоактивного йода по мощности дозы от щитовидной железы необходимо вносить поправку на вклад излучения от других изотопов.

Таблица 43 – Время накопления определенной доли ожидаемой эквивалентной дозы в щитовидной железе и других органах и тканях за счет инкорпорированного йода-131, сут. (по данным З.С. Арефьевой и соавт., 1988)

| Доза, % | 5 | 10 | 25 | 50 | 80 | 90 |
|-------------------|-----|-----|-----|-----|------|------|
| Щитовидная железа | 0,6 | 1,0 | 3,0 | 7,5 | 17,5 | 25,0 |
| Другие органы | 0,4 | 0,7 | 2,0 | 5,0 | 11,0 | 16,0 |

Токсичность йода-131 может быть охарактеризована следующими данными.

У крыс при однократном введении в желудок ЛД_{30/10} для йода-131 составила 88,8 Бк/г. При введении изотопа в дозе, в 10 раз меньшей, у животных наблюдали развитие деструктивных процессов в щитовидной и паращитовидной железах, а также реактивные изменения в гипофизе. Кроме того, у животных развивалось расстройство функций половых желез, нарушался астральный цикл, снижалась плодовитость вплоть до полной стерильности.

При длительном введении животным радиоактивного йода развивались изменения в передней доле гипофиза, нарушались функции всех желез внутренней секреции. В поздней стадии хронического поражения развивался нефросклероз.

Пороговой дозой для развития гипотиреоза у человека называют дозу в 45 Гр. Как можно вывести из приводившихся ранее соотношений, эта доза соответствует результату поступления в организм примерно 3 мКи йода-131.

В отдаленные сроки после введения радиоактивного йода у животных развивались опухоли щитовидной, паращитовидной и молочной желез. У человека коэффициент риска развития злокачественной опухоли щитовидной железы после радиационного воздействия составляет $5 \times 10^{-4} \text{Зв}^{-1}$.

Одно из следствий воздействия на щитовидную железу радиоактивного йода – возникновение аутоиммунного тиреоидита.

При обследовании детей и подростков, проживающих в районах, загрязненных радиоактивными продуктами после Чернобыльской аварии, антитела к микросомальному антигену щитовидной железы были обнаружены в 1,2-4,8% случаев, что достоверно выше контрольного уровня. Однако корреляции между титром антител и дозой облучения щитовидной железы не обнаружено. Весьма вероятно, что причиной возникновения аутоиммунного тиреоидита в ряде случаев явилось не само радиационное воздействие, а неадекватная и несвоевременная йодная профилактика. Дело в том, что поступление значительного количества йода в щитовидную железу, особенно у детей, а также в *щитовидную железу, подвергшуюся разным воздействиям*, в том числе лучевому, может привести к развитию аутоиммунного тиреоидита. Это связано с тем, что при окислении йода в щитовидной железе образуется большое число различных радикалов, оказывающих радиомиметическое действие.

Возможно, причины неожиданно раннего и высокого выхода иммунных тиреоидитов и рака щитовидной железы у детского населения Беларуси и Украины (опухолевые заболевания щитовидной железы у жителей Гомельской области обнаружены на уровне 80 на 1 млн в год по сравнению с мировым уровнем 1 случай на 1 млн) связаны с особенностями проведения йодной профилактики. Она в отдельных случаях не проводилась совсем или проводилась очень поздно и с большими нарушениями, которые заключались, помимо позднего начала, в чрезвычайно большом неконтролируемом количестве йода, который получали дети.

Рак щитовидной железы возникал у детей, получавших в основном не более 2 Зв на щитовидную железу. Вряд ли это непосредственная причина рака через 4 года после аварии. Среди причин неожиданно высокого появления рака щитовидной железы у лиц, пострадавших при аварии в Чернобыле, следует также рассмотреть возможную неточность дозиметрии и повышенную тщательность диагностики.

Обнаружение у пациента аутоиммунного тиреоидита является основанием для включения пострадавшего в группу риска, в которой значительно повышена вероятность возникновения системных заболеваний крови.

Радиоактивный цезий
(¹³⁷Cs, ¹³⁴Cs)

Цезий-137 – смешанный бета-, гамма-излучатель с периодом полураспада около 30 лет. Максимальная энергия бета-частиц составляет 0,51 МэВ, энергия гамма-квантов – 0,662 МэВ, гамма-постоянная – $3,2 \text{ Р} \times \text{м}^2 \times \text{ч} \times \text{мКи}$.

Предельно допустимое содержание цезия-137 в организме человека составляет 33 мкКи. Чаще всего основное количество цезия-137 поступает в организм человека с пищей, до 25% – через органы дыхания.

Большинство солей цезия хорошо растворимы, и поэтому всасывание радиоактивного цезия из легких и желудочно-кишечного тракта осуществляется быстро и практически полностью. Распределение в организме этого радионуклида сравнительно равномерное. До 50% цезия-137 концентрируется в мышечной ткани, причем чем интенсивнее работает мышца, тем больше в ней откладывается радиоактивного цезия. Наибольшее содержание цезия-137 обнаруживается в миокарде. В более поздние сроки после поступления довольно большое количество цезия-137 содержится в печени и почках. В скелете задерживается не более 5% поступившего в организм изотопа.

Выведение цезия, независимо от пути его поступления, на 3/5 происходит с мочой и на 2/5 с калом. Выводимый через кишку цезий в значительной мере подвергается реабсорбции. Эффективный период полувыведения цезия-137 у человека составляет от 50 до 150 сут. (в среднем 110 сут.).

При длительном поступлении цезия-137 в организм происходит его накопление. При этом кратность накопления (отношение содержания изотопа в организме к его суточному поступлению) может составлять от 3 (мыши) до 30 (собаки).

Через плаценту радиоактивный цезий легко проникает в организм плода. У лактирующих животных около 10% цезия-137 поступает в молоко.

При одновременном поступлении в организм цезия и калия, калий накапливается в 3 раза быстрее и может вытеснить цезий.

Радиоактивный цезий принадлежит к числу наиболее сильно загрязняющих среду продуктов ядерного деления. Уже примерно через 6 недель после аварии в Чернобыле, когда содержание йода-131 на загрязненных территориях и в организме человека вследствие естественного распада значительно снизилось, цезий-137 вышел по значимости на первое место среди радиоактивных продуктов, выпавших на местности. Отчасти, это объясняется высокой летучестью цезия, который кипит при 637 °С, и даже при сравнительно невысокой температуре, харак-

терной для условий аварии ядерного реактора, значительное количество радиоактивного цезия возгоняется. По некоторым оценкам, общий выброс продуктов ядерного деления, накопившихся в реакторе перед Чернобыльской катастрофой, составил около 3,5%, а количество выброшенного в окружающую среду радиоактивного цезия достигло 45%.

При ядерных взрывах, для только что образовавшихся продуктов деления при той температуре, которая в это время создается, разница в точках кипения цезия и стронция значения не имеет. Поэтому в составе загрязнении на следе облака, да и среди глобальных выпадений, преобладает стронций-90, которого образуется относительно больше, чем цезия (при взрыве боеприпаса мощностью 1 Мт образуется около 150 кКи стронция-90 и около 100 кКи цезия-137).

Цезий-137 с выбросами атомных электростанций поступает не только в воздух, но и в воду (особенно с атомных подводных лодок и других судов, оснащенных ядерными энергетическими установками). Аварии на таких судах представляют серьезную опасность в плане возможного загрязнения воды. Кроме того, изотопы цезия применяются в химических исследованиях, при лучевой терапии, при проведении дефектоскопии, в радиобиологических экспериментах.

Изотопы цезия легко включаются в биологический круговорот и свободно мигрируют по биологическим цепочкам. Сейчас цезий-137 повсеместно обнаруживают в организмах разных животных и у человека. Количество радиоактивного цезия в организме человека хорошо отражает содержание его во внешней среде (обнаруживается четкая корреляция в нарастании того и другого показателя при испытаниях ядерного оружия, при радиационных авариях).

Содержание цезия-137 в организме может быть измерено как прямыми (измерение мощности дозы гамма-излучения от тела), так и косвенными (измерение бета- и гамма-излучений от выделений) методами. С помощью стационарных счетчиков излучений человека (СИЧ) с защитной камерой удастся зарегистрировать присутствие в организме 1,0 нКи цезия-137 (40 Бк). В пробах мочи определяются концентрации порядка 15 пКи/л (0,6 Бк/л).

Изотоп цезия-134 имеет период полураспада около 2 лет, что и определяет его меньшую опасность по сравнению с цезием-137. Мощность дозы на зараженной цезием-134 территории снижается значительно быстрее. Качественно же по биологическому действию оба изотопа существенно не различаются.

Радиоактивный стронций
(⁹⁰Sr, ⁸⁹Sr)

Стронций-90 является бета-излучателем с периодом полураспада 28,6 лет.

Энергия испускаемых при его распаде бета-частиц составляет 0,54 МэВ. В результате распада стронция-90 образуется иттрий-90, тоже бета-излучатель с максимальной энергией частиц 2,18 МэВ. Период полураспада иттрия-90 составляет 64,2 часа.

Предельно допустимое содержание стронция-90 в организме – 2 мкКи.

Выпадающие на поверхность Земли изотопы стронция мигрируют по биологическим цепочкам и в конце концов могут поступить в организм человека. Степень и скорость всасывания радиоактивного стронция из желудочно-кишечного тракта зависят от того, в состав какого химического соединения входит этот радионуклид, от возраста человека и функционального состояния организма, от состава пищевого рациона. Так, у молодых особей стронций всасывается быстрее и полнее. Увеличение содержания в диете солей кальция снижает всасываемость соединений стронция, особенно в молодом возрасте. В присутствии в рационе молока всасываемость стронция повышается. В разных условиях всасываемость стронция из желудочно-кишечного тракта человека колеблется от 11 до 99%.

Всосавшийся стронций активно включается в минеральный обмен. Являясь аналогом кальция, радиоактивный стронций депонируется преимущественно в костях и в костном мозге, которые и оказываются критическими органами.

При ингаляционном поступлении малорастворимых соединений стронция (например, из светового состава постоянного действия) изотоп может достаточно прочно фиксироваться в легких, которые в этих случаях вместе с дыхательными путями являются критическими органами. Однако в отдаленные сроки и после ингаляционного поступления критическими органами становятся кости и костный мозг, в которых депонируются до 90% всей активности стронция.

Выводится стронций с калом и мочой, а у лактирующих самок и с молоком. Эффективный период полувыведения составляет ~17,5 лет.

Поступление 400 мкКи стронция-90 создает за 2 мес. в костном мозге дозу в 1 Зв. В ранние сроки после поступления этого радионуклида в большом количестве наблюдаются изменения в органах, через которые он поступает или выводится: слизистые оболочки рта, верхних дыхательных путей, кишечника. Позднее нарушаются функции печени.

В процессе реакции кроветворной ткани на радиоактивный стронций в течение длительного времени морфологический состав крови меняет-

ся мало. Лишь при поступлении больших количеств развивается и прогрессирует цитопения. Тяжелых случаев интоксикации с острым или подострым течением у человека не наблюдали. По аналогии с данными, полученными на животных, можно полагать, что такие случаи будут напоминать клинику острой лучевой болезни после внешнего облучения в дозах, при которых преимущественно поражается костный мозг.

При длительном поступлении радиоактивного стронция и подостром течении лучевой болезни постепенно развивается анемия, наблюдается сокращение продолжительности жизни. Если количество радиоактивного стронция в условиях длительного поступления сравнительно невелико, существенного укорочения продолжительности жизни не происходит, однако наблюдаются угнетение спермато- и овогенеза, нарушения иммунитета, функции печени и почек, нейроэндокринной системы.

В отдаленные сроки развиваются гипер- или гипопластические процессы в костном мозге, лейкозы, саркомы кости. Реже наблюдаются новообразования в гипофизе и других эндокринных органах, в яичниках, молочной железе. Большой период полураспада стронция-90 определяет длительное сохранение высоких уровней загрязнения территорий и объектов среды после загрязнения этим радионуклидом.

Среди продуктов ядерного деления присутствует и стронций-89, который также является бета-излучателем. Энергия бета-частиц у него составляет 1,5 МэВ. Однако период полураспада стронция-89 составляет всего 53 сут., поэтому он менее опасен при поступлении внутрь организма, и степень радиоактивного загрязнения объектов стронцием-89 снижается гораздо быстрее.

Плутоний (^{239}Pu)

Среди продуктов, участвующих в формировании зон радиоактивного заражения после ядерных взрывов или аварий ядерных энергетических установок присутствует часть нераспавшегося ядерного горючего или заряда, в частности, плутоний. Обычно его количества мало значимы, однако в случаях механического разрушения ядерных боеприпасов заражение плутонием может быть достаточно существенно, как это, например, имело место при аварии в 1966 году американского бомбардировщика, когда в результате разрушения двух из находившихся на борту ядерных боеприпасов произошло диспергирование плутония-239.

Плутоний – трансуранный элемент, обладающий высокой радиотоксичностью. Это смешанный альфа- и гамма-излучатель. Энергия альфа-частиц составляет 5,5 МэВ, а гамма-квантов – около 0,01-0,4 МэВ.

Период полураспада плутония-239 составляет 24360 лет. Гамма-постоянная у плутония-239 равна $0,1 \text{ Р} \times \text{м}^2 \times \text{ч} \times \text{мКи}$.

Плутоний легко гидролизуется и склонен к комплексообразованию. Образующиеся в результате соединения в большинстве очень плохо растворимы.

Внешнее облучение плутонием-239 не опасно для человека. Поступление же этого изотопа внутрь организма, которое может произойти алиментарным, ингаляционным путем или через поврежденную и даже неповрежденную кожу, требует проведения немедленных и весьма активных лечебных мероприятий.

Абсорбция плутония из желудочно-кишечного тракта в кровь очень мала. Для наиболее «хорошо растворимых» соединений (нитрат плутония) она составляет $3 \times 10^{-5}\%$, а для «сравнительно плохо растворимых», например, PuO_2 – $1 \times 10^{-6}\%$. Иногда могут быть и более высокие значения резорбции. На абсорбцию существенно влияет состав пищевого рациона.

При ингаляционном поступлении значительное количество плутония надолго оседает в легких, позднее частично перемещается в бронхолегочные лимфатические узлы, а затем и в кровь. В последующем ведущим в воздействии на человека фактором является облучение костных поверхностей и печени.

Всасывание плутония через кожу зависит от ее состояния. Наличие ссадин и царапин, воздействие растворителей и кислот резко повышают резорбцию плутония через кожу. Если кожа не повреждена, плутоний поступает в основном через волосяные фолликулы.

Поступивший в кровь плутоний откладывается в печени (45%), в скелете (45%), остальное количество – в других органах и тканях, и выводится с экскретами в ранние сроки после поступления.

Доля плутония, отложившегося в гонадах, составляет примерно $3,5 \times 10^{-4}\%$ у мужчин и $1 \times 10^{-4}\%$ – у женщин.

Время накопления дозы после поступления в организм плутония медленное: около 50% дозы в скелете и печени реализуются в течение 27-100 лет.

Биологический период полувыведения плутония из скелета составляет 100 лет, а из печени – 40 лет. Эффективный период полувыведения для плутония-239 практически равен биологическому.

После энтерального введения больших количеств плутония в клинической картине преобладали проявления поражения функций кровотока и кровообращения. Животные погибали в течение 2-3 нед. от апластической анемии и кровоизлияний. При подостром поражении

нарушения кроветворной функции сопровождались развитием регенераторных процессов в системе крови. Происходило рассасывание костного вещества. Животные погибали от цирроза печени, проявлявшегося асцитом, желтухой, истощением.

После введения малых доз плутония-239 крысам ($< 4,6 \times 10^{-4}$ мг/кг) развивалась хроническая форма поражения, проявлявшаяся возникновением гипо- и гиперпластических процессов в системе крови, развитием цирроза печени, нефросклероза, злокачественными новообразованиями в различных органах, наиболее часто – в костях.

При ингаляционном поступлении плутония критическим органом оказываются легкие. Острые поражения плутонием при ингаляционных затравках характеризовались развитием фибринозной пневмонии с пневмосклерозом, от которой при введении высоких доз (порядка $8,1 \times 10^4$ Бк/кг) собаки погибали через 4 месяца. Наблюдалось истощение животных, постепенно развивались умеренные лимфопения и лейкопения. Развитие пневмосклероза наблюдалось при введении в легкие и меньших количеств плутония, однако в этих случаях процесс протекал медленнее. Для поздних сроков характерно возникновение опухолей легких.

Прижизненное определение плутония в организме возможно с помощью СИЧ или при измерении активности проб мочи.

Полоний (^{210}Po)

Полоний-210 представляет собой альфа-излучатель с периодом полураспада 138,3 дня. Энергия альфа-частиц составляет 5,3 МэВ.

Полоний широко применяется при изготовлении источников альфа- и нейтронного излучения, в активационном анализе, при создании малогабаритных источников питания, в частности, в установках космического назначения (в частности, «Луноход-1»).

Небольшие количества полония содержатся в выхлопных газах, в табачном дыме. Довольно значительное его количество (до 3,7 Бк) ежедневно поступает в организм эскимосов с мясом оленей, питающихся лишайниками, в которых накапливается этот элемент.

В организм человека полоний может проникнуть ингаляционно, алиментарным путем, через поврежденную и неповрежденную кожу. Через неповрежденную кожу человека в сутки резорбируется до 2% полония. В связи с высокой удельной активностью (4500 Ки в 1 г) и токсичностью серьезную опасность представляет поступление (особенно непосредственно в кровь через поврежденную кожу) даже небольших по весу и объему количеств полония.

Распределение полония в организме сравнительно равномерное, однако преимущественно он накапливается в органах, богатых ретикуло-эндотелиальной тканью.

В течение короткого срока после поступления полония-210 в организм наибольшие поглощенные дозы накапливаются в почках, селезенке и печени, являющихся критическими органами. В крови в первые два месяца после заражения содержится 10-20% от общего количества полония-210 в организме. При ингаляционном поступлении до 30% полония задерживается в органах дыхания.

В ранние сроки после заражения полоний выводится преимущественно (до 90%) с калом, позже – с мочой. Эффективный период полувыведения полония-210 составляет 30-40 суток.

Тканевая доза в критических органах формируется очень быстро – до 80% дозы за 100 дней. Поэтому клинические проявления (а они наблюдаются уже при превышении допустимой дозы всего в 10-50 раз) развиваются сравнительно рано. Это – изменения в капиллярах, в системе кровообращения в целом, в состоянии ферментных систем и желчеотделительной функции печени. У больных наблюдаются преходящая билирубинемия, увеличение содержания альдолаз в сыворотке, нарушения почечного плазмотока, сдвиги в показателях адсорбции ^{131}I -бенгальского розового клетками печени.

В экспериментах на собаках введение полония-210 в дозе $5,5-6,6 \times 10^3$ Бк/кг вызывало развитие острой лучевой болезни. Скрытый период в этом случае продолжался около недели. Первыми клиническими проявлениями были вялость, снижение пищевой возбудимости, понос, рвота, жажда, похудание. Появлялись геморрагии на коже и слизистых оболочках, кровотечения из прямой кишки и мочевыводящих путей. В периферической крови резко снижалось содержание лейкоцитов и тромбоцитов. Перед гибелью животные впадали в состояние прострации. Смерть наступала на 10-28-е сутки.

Подострая форма лучевой болезни развивалась после введения $0,74-1,1 \times 10^3$ Бк/кг полония – геморрагический синдром, в этих случаях были менее выражены. У части животных в ходе заболевания временно улучшалось общее состояние и показатели периферической крови. Однако через несколько дней симптомы возвращались и животные погибали.

Хроническая интоксикация с гибелью в течение полугода-года наблюдалась после введения $0,09 \times 10^3$ Бк/кг полония-210. Клиника хронической лучевой болезни была неспецифичной.

При хроническом поступлении полония в организм собак в дозе $3,7 \times 10^{-2}$ Бк/г в течение полугода ежедневно не было отмечено призна-

ков интоксикации. Однако часть самок погибала во время родов, часть потомства рождалась мертвыми или была мало жизнеспособна.

У животных, не погибших в ранние сроки после введения полония, развивались атрофические и склеротические изменения в органах и тканях, дисгормональные расстройства, сокращалась продолжительность жизни. Из новообразований чаще всего встречались опухоли почек, печени, толстой кишки, надпочечников, гипофиза, молочных желез, щитовидной железы, яичников, простаты и матки. При ингаляционном поступлении в отдаленном периоде характерны опухоли легких. При подкожном введении полония наблюдали саркомы кожи и подкожной клетчатки в месте введения.

Радон (^{222}Rn и другие изотопы)

Изотопы радона, образующиеся при распаде радия и тория, – источник радиационного воздействия, относящийся к группе естественных. В среднем на долю радона и продуктов его распада приходится около половины всей дозы, получаемой за счет естественных источников радиации.

Радон – бесцветный газ, без вкуса и запаха. Он в 7,5 раз тяжелее воздуха. Есть три изотопа радона: радон-222, с периодом полураспада 3,8 суток, образующийся в ряду продуктов распада урана-238; радон-220 с периодом полураспада 55 с (иначе он называется торон) – это продукт превращений тория-232; радон-219 (актинон) с периодом полураспада 3,9 с – продукт распада урана-235. Около 95% всего радона составляет радон-222, около 5% – радон-220. Радон-219 содержится в очень малой концентрации.

Энергия альфа-излучения радона-222 составляет 5,48 МэВ. Испустив альфа-частицу, радон превращается в полоний-218 – тоже альфа-излучатель с периодом полураспада около 3 минут. Радиоактивный распад с образованием промежуточных короткоживущих изотопов, испускающих альфа- и бета-частицы, продолжается вплоть до образования стабильного изотопа свинца. В отличие от химически инертного радона, продукты его распада обладают электрическим зарядом и легко связываются с пылинками, постоянно имеющимися в воздухе. Образующийся тонкодисперсный аэрозоль при вдыхании оседает на стенках дыхательных путей и альвеол. Таким образом, радиационная нагрузка на легкие при вдыхании радона и продуктов его распада создается главным образом последними. Радон может поступать в организм и через неповрежденную кожу.

До 10% заболеваний раком легкого связывают с воздействием на человека радона и продуктов его распада (это около 5000 случаев в год среди населения России).

Основная часть дозы облучения от радона может быть получена в закрытых плохо вентилируемых помещениях, особенно в подвалах и нижних этажах домов, куда радон поступает из грунта, а также из материалов, использованных при постройке сооружений. Из естественных строительных материалов много радона выделяют гранит и пемза, а наибольшее количество радия и тория, из которых образуется радон, обнаружено в отходах урановых обогатительных предприятий, глиноземе и некоторых других материалах, используемых в строительстве.

Средняя активность радона-222 в домах США составляет около 50 Бк/м³, но в довольно большом количестве домов она достигает 700-800 Бк/м³. Описаны случаи, когда концентрация радона в воздухе жилых помещений в 5000 раз превышала его содержание в наружном воздухе.

Вдыхание воздуха, содержащего радон-222 в концентрации 1 Бк/м³, создает эффективную дозу облучения верхних дыхательных путей около 50 мкЗв/год. По рекомендациям НКДАР, предельно допустимое содержание радона в воздухе помещений составляет 350 Бк/м³. Есть предложения снизить этот уровень вдвое.

В НРБ-99 заложено требование, чтобы в проектируемых зданиях жилищного и общественного назначения среднегодовая эквивалентная объемная активность радона и торона в воздухе не превышала 100 Бк/м³, а в эксплуатируемых зданиях была не выше 200 Бк/м³.

Заделка щелей в полах, стенах и другие не очень сложные меры уменьшают поступление радона в помещения, а частое проветривание способствует его удалению. В меньшей степени, но все же значительно поступление радона в дома с водой и природным газом.

Наиболее высок риск возникновения рака, связанного с радоном, у шахтеров урановых рудников. Чаще других встречаются мелкоклеточный рак легкого, аденокарцинома, чешуйчатоклеточный рак. У этих контингентов увеличивается число случаев и рака бронхов. По некоторым материалам, повышается также риск возникновения рака желудка и рака кожи.

Кроме злокачественных новообразований под влиянием радона и дочерних продуктов его распада у горнорабочих наблюдают развитие радиационного пневмосклероза. В этих случаях трудно дифференцировать действие радона и рудничной пыли, вызывающей силикоз.

РАДИАЦИОННАЯ ЭКОЛОГИЯ ЭКОСИСТЕМ

4.1. НАЗЕМНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ

Наземные экосистемы тесно связаны с почвой. Исследования в системе «почва – раствор» (Куликов и др., 1990) показали, что прочность поглощения почвой искусственных и естественных радионуклидов зависит, во-первых, от природы самих химических элементов, во-вторых, от свойств почвы и состава почвенных растворов.

Из всех естественных радионуклидов наиболее прочно связываются в почвах уран и торий, а из искусственных – плутоний, железо и цезий. Плутоний, стронций и цезий в целом довольно медленно мигрируют в вертикальном разрезе почв, о чем свидетельствуют данные распределения этих радионуклидов в почвах на территории ВУРС-а (Мартюшов и др., 1995). Линейная миграция их составляет не более 1 см/год (табл. 44).

Таблица 44 – Распределение радионуклидов в почвах на территории ВУРС-а через 36 лет после аварии, % от содержания в слое 0-30 см (Мартюшов и др., 1995)

| Почва | Глубина, см | | | | | | | | |
|--------------------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| | 0-2 | | | 10-20 | | | 20-30 | | |
| | ²³⁹ Pu | ⁹⁰ Sr | ¹³⁷ Cs | ²³⁹ Pu | ⁹⁰ Sr | ¹³⁷ Cs | ²³⁹ Pu | ⁹⁰ Sr | ¹³⁷ Cs |
| Серые лесные | 73 | 55 | 68 | 14 | 26 | 23 | 13 | 19 | 9 |
| Черноземные | 60 | 42 | 60 | 31 | 34 | 29 | 9 | 24 | 11 |
| Черноземно-луговые | 86 | 71 | 78 | 10 | 21 | 20 | 4 | 8 | 2 |

Химические элементы существуют в почвах в растворенном и адсорбированном состояниях. В первом случае они легкодоступны для растений, а во втором – нет. Сорбционная способность почв зависит в первую очередь от их состава. Чем больше в почве органики (особенно гумуса) и илестых частиц, тем прочнее она фиксирует радионуклиды. Этими качествами обладают луговые почвы, которые хорошо связывают радиоизотопы. К снижению подвижности всех радионуклидов в системе «почва – раствор» приводит и увеличение времени взаимодействия почв с этими химическими элементами.

Большое влияние на поглощение радионуклидов почвой оказывает рН почвы и состав почвенного раствора. Поглощение почвой железа, церия, кобальта, иттрия с повышением рН снижается. Особенно это заметно в случае наличия в почвенном растворе ионов трехвалентного железа и алюминия, что связано с сорбцией радиоизотопов на коллоидах гидроокислов этих элементов, трудно сорбируемых почвами.

В Институте экологии растений и животных УО РАН были проведены опыты со сложными искусственными соединениями (*комплексами*), которыми пропитывали почву, содержащую радионуклиды (Куликов и др., 1990). В частности, использовался этилендиаминтетрауксусной кислоты (ЭДТА) с химической формулой $C_{10}H_{16}O_8N_2$. Установлено, что в присутствии этого химиката резко снижается сорбция почвой железа, кобальта, иттрия, церия и в меньшей степени стронция. На сорбцию почвой цезия комплексен не оказывает влияния. В данном случае радионуклиды образуют с ЭДТА прочные соединения, которые остаются в почвенном растворе.

Примерно такой же эффект дают экстракты из опавших листьев. В присутствии этих экстрактов в почвенных растворах растворимость большинства радионуклидов увеличивается в 5-6 раз, что вызывает переход радионуклидов из почвы в почвенный раствор. Такое свойство растительных экстрактов объясняется способностью органических веществ переводить радиоизотопы в растворимые в воде комплексные соединения. Этот важный результат исследований можно использовать при *дезактивации почв*, содержащих указанные выше радиоизотопы. Однако при этом большая часть радиоактивного цезия остается в почве. Для извлечения из почвы радионуклидов рекомендуется использовать *десорбенты*, т.е. родственные катионы, способные вступать в такие же соединения, что и вытесняемые ими радионуклиды. Миграция радионуклидов в системе «почва – раствор» сильно зависит и от степени обводненности почв. Во влажной почве подвижность стронция возрастает в десятки раз по сравнению с почвами менее насыщенными водой. Проводились опыты по вытеснению радионуклидов из разных почв дистиллированной водой (Куликов и др., 1990). Оказалось, что радиоизотопы (особенно стронций) наиболее подвижны в почвах, обогащенных песчаной фракцией и наименее подвижны в дерново-луговых почвах.

Из этих экспериментов вытекает заключение, что почвы можно промывать от радионуклидов. Однако это чревато резким понижением их плодородия, поскольку при данной операции вместе с удаляемыми химическими элементами из почв уходит наиболее важная их часть – гумус.

Повышенная подвижность стронция, в сравнении с другими элементами, подтверждается и миграцией его в почвах по вертикали, на что указывают опыты с колонками (Куликов и др., 1990). В три металлические колонки высотой 30 см помещали увлажненную дерново-луговую почву, в поверхностный слой которой на глубину 2 см вносили радиоактивные элементы (стронций, цезий и церий). Коэффициент обводненности в первой, второй и третьей колонках составлял соответственно 0,2; 0,3 и 1. Эксперимент продолжался три месяца. В конце опыта из каждого двухсантиметрового слоя почвы были отобраны и проанализированы пробы.

Результаты показали, что вертикальная миграция стронция в почве возрастает с повышением ее обводненности. Этот радионуклид в первой колонке проник на глубину 6, во второй – 10 и в третьей – на 15 см. Глубина миграции цезия и церия не превышает 6 см и не зависит от степени увлажненности почвы.

Радионуклиды обладают способностью «старения». Такое свойство радиоактивного стронция было обнаружено А.И. Ильенко (1980). Наблюдения показали неизменное его содержание в 5-сантиметровом слое почвы в течение многих лет. В то же время концентрация этого радионуклида в скелете грызунов уменьшилась за этот же срок на 3 порядка. Ученые полагают, что это связано с постепенным переходом стронция в нерастворимые в воде соли.

С результатами, полученными при изучении подвижности радионуклидов в системе «почва – раствор», хорошо согласуются данные вегетационных опытов в системе «почва – растение».

Стронций слабо фиксируется в почве. Большая часть его находится в почвенном растворе, поэтому он легко поступает в растения. В прямой зависимости от влажности почвы находится и биомасса растений. Следовательно, с повышением увлажненности почвы увеличивается общий (валовый) вынос радионуклидов растениями. Это обстоятельство с успехом используется при дезактивации почв. Радионуклиды переводятся из почвы в растения, дающие пышную зеленую массу. После этого следует их выкос и захоронение. Повышение температуры воды, используемой для полива, несколько увеличивает миграцию радионуклидов из почвы в растения.

Внесение в почву таких радионуклидов как железо, кобальт и иттрий совместно с искусственным комплексоном ЭДТА значительно повышает подвижность этих элементов, что вызывает увеличение поступления их в растения. Указанный комплексен почти не влияет на подвижность стронция, цезия и церия в системе «почва – растение».

Содержание радионуклидов в растениях зависит также от их индивидуальной способности избирательно аккумулировать в себе определенные химические элементы. В частности, некоторые представители растительных сообществ концентрируют радиоактивные вещества. К таким растениям относятся, в первую очередь, мхи и лишайники. М.Г. Нифонтовой (1997) установлено, что накопление радионуклидов этими растениями в значительной степени определяется уровнями радиоактивности глобальных атмосферных выпадений. Рисунок 15 четко демонстрирует увеличение концентрации радиоактивного цезия в этих растениях на целый порядок во время аварии на Чернобыльской АЭС 1986 года. Поэтому мохово-лишайниковую растительность рекомендуется использовать при проведении длительного *радиоэкологического мониторинга* окружающей среды.

Искусственные радионуклиды поступают в лишайники и мхи аэральным путем. Другие растения накапливают отдельные радионуклиды, заимствуя их преимущественно из почвы. В этом отношении интересна работа Е.Н. Каравасовой и И.В. Молчановой (1998) о накоплении радионуклидов дикорастущими лекарственными растениями Ольховского болота в зоне влияния Белоярской АЭС, где наблюдается повышенная концентрация радионуклидов в почве. Некоторые виды лекарственных растений названного урочища (крапива двудомная, череда трехраздельная) накапливают значительные количества радиоизотопов стронция и цезия, тогда как другие травы, растущие рядом, этой способностью не обладают. Причем, если крапива накапливает оба радионуклида, то череда – преимущественно цезий.

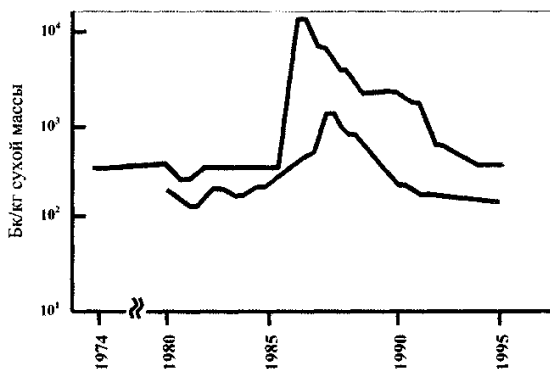


Рис. 15. Динамика содержания ^{137}Cs в надпочвенном мохово-лишайниковом покрове (нижнее) и в почве (верхнее). На графике четко выделяется Чернобыльский пик (Нифонтова М.Г., 1997)

Таблица 45 – Содержание радионуклидов в надземной массе лекарственных растений, Бк/кг (Караваева, Молчанова, 1998)

| Виды растений | ⁹⁰ Sr | | ¹³⁷ Cs | |
|----------------------|------------------|----|-------------------|----|
| | 1 | 2 | 1 | 2 |
| Иван-чай узколистный | 24 | 9 | – | 16 |
| Крапива двудомная | 580 | 15 | 2043 | 12 |
| Таволга вязолистная | 62 | 65 | 247 | 93 |
| Горец змеиный | 61 | 15 | 678 | 40 |

Примечание. 1 – зона Белоярской АЭС, 2 – контрольный участок.

Как и в организме животных, распределение радионуклидов в разных частях растений неодинаково. Так большая часть искусственных радиоизотопов концентрируется в вегетативных частях растений и корнях, а меньшая – в семенах (табл. 46).

Таблица 46 – Содержание искусственных радионуклидов в культурных сельскохозяйственных растениях (в % на единицу массы, по А.И. Ильенко, Т.П. Крапивко, 1989)

| Части растений | Радионуклиды | | | |
|--------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | ⁹⁰ Sr | ¹³⁷ Cs | ¹¹⁴ Ce | ¹⁰⁶ Ru |
| Пшеница: семена | 4,26 | 4,8 | 0,2 | 0,1 |
| вегетативные части | 90,03 | 78,2 | 3,0 | 4,2 |
| корни | 5,71 | 17,0 | 96,8 | 95,7 |
| Горох: семена | 1,45 | 21,4 | 2,4 | – |
| вегетативные части | 73,95 | 52,8 | 6,8 | – |
| корни | 24,6 | 25,8 | 90,8 | – |

В древесине деревьев обычно накапливается меньше радионуклидов, чем в листьях или хвое. Коэффициент концентрации радиоизотопов в разных частях дерева зависит также от его вида (см. табл. 47).

Таблица 47 – Коэффициенты концентрации ¹³⁷Cs в различных частях деревьев (Рябов и др., 1997)

| Структурные части дерева | Коэффициенты концентрации | | |
|--------------------------|---------------------------|------|--------|
| | сосна | дуб | береза |
| Кора | 16,5 | 26,0 | 17,5 |
| Камбий | 50,0 | 6,2 | 16,0 |
| Древесина | 4,5 | 1,3 | 4,6 |
| Ветки | 13,0 | 9,8 | 20,0 |
| Листья (хвоя) | 86,0 | 32,0 | 68,0 |

Коэффициенты концентрации радиоизотопов у молодых деревьев выше, чем у старых, поскольку у последних обменные процессы замедлены. Коэффициенты накопления цезия-137 у разных ягод различаются в 2-3 раза (см. табл. 48).

Таблица 48 – Коэффициенты накопления ^{137}Cs ягодами
(по Рябову и др., 2001)

| Виды ягод | Коэффициенты накопления |
|-----------|-------------------------|
| Брусника | 10 |
| Клюква | 13 |
| Черника | 7 |
| Земляника | 4 |
| Малина | 3 |

4.1.1. Радионуклиды в искусственных агробиогеоценозах

Решение основных экологических вопросов в случаях загрязнений местности в чрезвычайных ситуациях связано в основном с искусственными агробиогеоценозами.

Радиоактивные частицы, находящиеся в нижних слоях атмосферы (в тропосфере), осаждаются на растительный и почвенный покров в течение нескольких часов, а стратосферного происхождения – в течение длительного периода – десятки лет (примерно 10% от общего количества ежегодно после выброса в стратосферу). Они выпадают в результате вымывания атмосферными осадками («мокрое выпадение») или в виде сухих частиц за счет гравитационных сил, вертикального движения воздушных масс и турбулентной диффузии («сухое» отложение). Максимальное выпадение наблюдается в весенне-летний период (около 60% годового отложения), менее интенсивное выпадение – в осенне-зимний период. Известно, что основное количество долгоживущих радионуклидов стронция и цезия попало в атмосферу до заключения в 1963 году Московского договора о запрещении испытания ядерного оружия в атмосфере, космическом пространстве и под водой.

Миграция радиоактивных частиц, выпавших на поверхность земли, происходит по биологическим цепочкам, начиная от внекорневого поступления их в растительный биоценоз по определенным закономерностям.

Радиоактивные вещества, попадающие на вегетирующие посевы, задерживаются на растениях, оседают на поверхности почвы. Первичное удерживание зависит от плотности растительного покрова, морфологии растений, размеров и агрегатного состояния радиоактивных веществ, метеорологических условий в момент выпадения радиоактивных осадков.

По мере увеличения запаса растительной массы на единицу площади повышается степень удерживания радионуклидов.

Таблица 49 – Первичное удерживание радионуклидов, % от нанесенного количества

| Фаза развития | Масса растений на 1 м ² , кг | ⁹⁰ Sr | ¹³⁷ Cs |
|-------------------|---|------------------|-------------------|
| Кущение | 0,1 | 24 | 16 |
| Выход в трубку | 0,3 | 28 | 24 |
| Цветение | 0,6 | 52 | 48 |
| Молочная спелость | 0,8 | 48 | 62 |
| Восковая | 0,9 | 50 | 62 |

Первичное удержание водорастворимых форм РВ в 4-7 раз выше, чем нерастворимых. С увеличением размера частиц уменьшается их удерживание растениями. Различные сельскохозяйственные культуры обладают неодинаковой способностью удерживания РВ.

Таблица 50 – Величина первичного удерживания РВ сельскохозяйственными культурами, %

| Культура | Водорастворимые формы | Нерастворимые формы |
|----------------|-----------------------|---------------------|
| Пшеница яровая | 71 | 13 |
| Ячмень яровой | 51 | 19 |
| Овес | 51 | 12 |
| Просо | 51 | 10 |
| Горох | 74 | 31 |
| Гречиха | 39 | – |
| Картофель | 25 | – |

У некоторых растений хозяйственно ценные части урожая достаточно надежно защищены от загрязнения – зерно бобовых культур, просо, риса, ячменя, овса, початки кукурузы, клубни картофеля, корнеплоды.

Неодинаковая способность растений к первоначальному удержанию РВ обуславливает большие различия в уровнях загрязнения урожая.

Наиболее высоким содержанием ^{90}Sr на единицу массы отличаются вегетативные органы растений (десятки и сотни раз выше, чем в зерне, клубнях и корнеплодах), в зерне гречихи наблюдается максимальная концентрация, минимальная – в зерне гороха.

Выпадение ^{90}Sr и ^{137}Cs наиболее опасно для овощных культур, причем радиоцезий включается в метаболизм растений.

При выпадении РВ на луговую и пастбищную растительность значительная их часть задерживается в нижней части растений и в верхнем слое прикорневой дернины, откуда поступают в растения через основные стебля и поверхностные корни, также образуют «дернинный резервуар».

РВ, попадающие в почву, частично вымываются и загрязняют грунтовые воды, но почва довольно прочно удерживает их и обеспечивает очень длительное их нахождение в почвенном горизонте и поступление в сельскохозяйственную продукцию за счет почвенного поглощающего комплекса (ППК).

Гранулометрический состав почвы влияет на закрепление РВ в почве следующим образом:

- тяжелые почвы сильнее закрепляют поглощенные радионуклиды, чем легкие;
- радионуклид ^{137}Cs поглощается и удерживается почвой в большей степени, чем ^{90}Sr .

Минералогический состав почвы также оказывает существенное влияние на эти процессы. Наибольшей поглотительной способностью обладают минералы монтмориллонитовой группы и группы гидрослюдов, наименьшей – каолиновой группы. Поглощенный ^{137}Cs в отличие от ^{90}Sr прочнее сорбируется минералами.

Механизм усвоения радионуклидов корнями растений сходен с поглощением основных питательных веществ – макро- и микроэлементов. Определенное сходство наблюдается в поглощении растениями и передвижении по ним ^{90}Sr и ^{137}Cs и их химических аналогов – кальция и калия. В наибольших количествах поглощается растениями ^{137}Cs , значительно меньше – ^{90}Sr , еще в меньших количествах – ^{60}Co , ^{106}Ru , ^{144}Ce , ^{147}Pm (концентрируются преимущественно в корневой системе). Радионуклиды, поступившие в надземную часть растений зерновых культур, в основном концентрируются в соломе (листья и стебли), меньше – в мякоте (колосья, метелки без зерна). С возрастом растений в их надземных органах увеличивается абсолютное количество радионуклидов и снижается содержание на единицу массы сухого вещества.

После накопления радиоактивных веществ растениями начинает работать следующее звено перемещения радионуклидов, а именно миграция их в организм животных и человека (рис. 16). Дикие и домашние животные, потребляя загрязненную растительную пищу, накапливают радионуклиды, которые тут же начинают разрушать их организм изнутри. Не все дикие животные одинаково накапливают радиоактивные цезий и стронций. Меньше всего их концентрируют животные, питающиеся листьями кустарников. К таковым относится, например, лось. В мясе этого животного в 10-12 раз меньше радиоцезия, чем в мясе кабана, промышляющего в лесной подстилке.

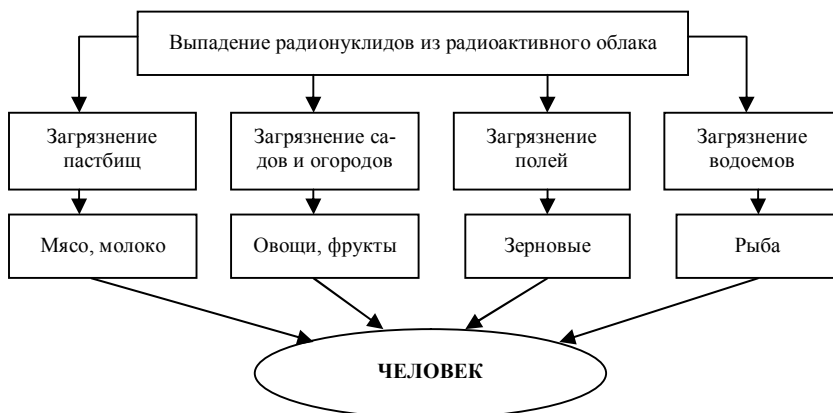


Рис. 16. Схема движения радионуклидов по пищевым цепочкам

Очень важно уметь грамотно наладить сельскохозяйственное производство на загрязненных радионуклидами землях. Все мероприятия должны быть направлены на защиту населения и животных, т.к. радиорезистентность растений на порядок или два порядка выше по сравнению с млекопитающими (табл. 51, 52).

Радиочувствительность бактерий и простейших составляет 1000-3000 Гр, а бактерий *Micrococcus radiodurens*, обитающих в каналах ядерных реакторов, – до 10^6 Гр.

Радиочувствительность сельскохозяйственных культур определяется по снижению урожайности на 50% при облучении от всходов до цветения, данные представлены в таблице 52.

Таблица 51 – Летальные дозы облучения биологических объектов, Гр

| Вид | ЛД _{50/30} | ЛД _{100/30} |
|----------------------|---------------------|----------------------|
| Морская свинка | 1,5-3,0 | 4,0-6,0 |
| Мышь | 4,6-7,5 | 7,0 |
| Крыса | 5,0-7,0 | 10,0 |
| Овца | 1,5-4,0 | 5,5-7,5 |
| Ягнята до 3 мес. | 1,5-3,0 | 6,0 |
| Крупный рогатый скот | 1,6-5,5 | 6,5 |
| Телята до 5 мес. | 2,0-5,5 | 8,0 |
| Свинья | 2,5-3,0 | 4,5 |
| Поросята до 2 мес. | 2,5-6,0 | – |
| Лошадь | 3,5-4,0 | 5,0-6,5 |
| Осел | 2,1-5,5 | 7,5 |
| Коза | 2,5 | – |
| Верблюд | 2,5-4,0 | 4,0-6,0 |
| Собака | 2,0-3,5 | 4,0-5,0 |
| Кошка | 5,0-7,5 | 8,0 |
| Щенки до 3 мес. | 4,5-7,0 | 8,0-10,5 |
| Человек | 2,5-5,5 | 4,0-6,0 |
| Обезьяна | 2,5-6,0 | 8,0 |
| Летучая мышь | 5,0-8,0 | 9,5 |
| Хомяк | 5,5-8,0 | – |
| Полевка | 6,0-9,0 | 9,0-10,0 |
| Суслик | 6,0-9,5 | 9,0-11,5 |
| Сурок | 8,0-10,0 | 11,0-12,0 |
| Кролик | 10,0-13,0 | 14,0 |
| Монгольская песчанка | – | 15,0-18,0 |
| Птицы, рыбы | 8,0-20,0 | – |
| Насекомые | 10,0-100,0 | – |
| Змеи | 80,0-200,0 | – |
| Растения | 10-1 500 | |

Таблица 52 – Радиочувствительность основных сельскохозяйственных культур

| Сельскохозяйственные культуры | Экспозиционная доза, Р |
|-------------------------------------|------------------------|
| Горох, озимая рожь | 2 000 |
| Пшеница, ячмень, овес, подсолнечник | 3 000 |
| Гречиха, просо, томаты | 5 000 |
| Лен | 10 000 |
| Картофель | 15 000 |
| Сахарная свекла, турнепс | 20 000 |
| Капуста, морковь, столовая свекла | 25 000 |

Действие ионизирующей радиации на растительные клетки обусловлено ионизацией молекул, при которой образуются ионы и свободные радикалы из молекул воды, неорганических и органических соединений.

Химический этап взаимодействия энергии с веществом начинается с образования в облученных клетках активных радикалов и перекисей, энергично вступающих в химические реакции с ненарушенными молекулами других веществ клетки. Третий этап действия радиации на живую клетку – биологический.

Радиационно-химические изменения ведут к нарушению во всех частях и биологических структурах клетки – происходят изменения в молекулярных структурах ядер клеток, в хромосомном аппарате, в ДНК и РНК.

Далее следуют изменения физиологических функций клеток, повреждение ядерного аппарата, нарушение ростовых процессов, появление внешних морфологических аномалий и изменение генома, нарушается согласованный процесс ДНК – РНК – белок. Поражение ДНК обуславливает мутагенное действие радиации, обуславливают хромосомные aberrации (перестройки), разрывы и другие нарушения.

Хотя клетка реагирует на излучение как единое целое, цитоплазма обладает сравнительно высокой чувствительностью, а ядро проявляет высокую чувствительность даже к небольшим дозам ионизирующей радиации.

Различные хромосомные нарушения являются одной из основных причин задержки митоза и гибели клеток. Избирательность действия ИИ на различные ткани определяется законом Бергонье-Трибондо, согласно которому более радиочувствительны интенсивно делящиеся клетки (меристемные, ростковые клетки).

Очень важна способность клеток и тканей – противостоять неблагоприятным и повреждающим воздействиям ИИ, в ответ на которые включаются процессы репарации (восстановления).

Радиочувствительность разных видов и сортов растений колеблется в широких пределах.

Критические дозы облучения семян на порядок выше, чем вегетирующих травянистых растений. Для большинства вегетирующих растений критическая доза оценивается 1-5 крад, а летальная – в 5-10 крад, соответствующие дозы для облучения составляют 30-50 крад.

Радиорезистентность (радиоустойчивость) растений в разные периоды онтогенеза колеблется в значительной степени и составляет в последовательностях:

- 1) семена молочной спелости – восковой спелости – полной спелости – покоящиеся – возрастает;
- 2) семена покоящиеся – прорастающие – всходы – снижается;
- 3) всходы – заложение вегетативных органов – заложение оси соцветия – возрастает;
- 4) от заложения оси соцветия и перехода к генеративному состоянию – формированию элементов цветка – спорогенез – повышается;
- 5) от спорогенеза до гаметогенеза – снижается.

Снижение урожайности зерна озимых культур в зависимости от гамма-облучения в разные фазы развития представлено в таблице 53.

Таблица 53 – Снижение урожайности зерна озимых культур, %

| Фаза развития | Доза облучения, Р | | |
|-------------------|-------------------|-------|-------|
| | 1 000 | 2 000 | 3 000 |
| Кущение | 5 | 25 | 55 |
| Выход в трубку | 25 | 55 | 80 |
| Колошение | 15 | 20 | 28 |
| Цветение | 8 | 13 | 21 |
| Молочная спелость | 5 | 7 | 9 |
| Полная спелость | 0 | 0 | 0 |

Зерновые бобовые культуры обладают наибольшей радиочувствительностью в период бутонизации.

Продовольственное и техническое качество сельскохозяйственной продукции существенно не ухудшается даже при снижении урожайности до 30-40% от контроля (необлученных растений).

Содержание белка и клейковины в зерне пшеницы, рассчитанное на единицу массы, не снижается.

Снижение масличности семян подсолнечника (на 8-27%) наблюдается при облучении растений в фазы генеративного развития дозами 3-10 крад.

Аналогичная закономерность наблюдается и по выходу сахара в урожае корнеплодов.

Посевные и посадочные качества семян и клубней снижаются. При облучении картофеля до периода бутонизации и цветения клубни получают безростковыми из-за высокой радиочувствительности промеристематических клеток, но они по содержанию крахмала и по вкусовым качествам не отличаются от обычных клубней. Данные по снижению полевой всхожести до 50% представлены в таблице 54.

Таблица 54 – Дозы облучения, при которых семена непригодны для посева

| Культуры | Фазы развития | Доза, Р |
|-----------------|---|---------|
| Зерновые озимые | 1. Выход в трубку, колошение, цветение | 2 500 |
| | 2. Всходы, кущение | 1 000 |
| Зерновые яровые | 1. Цветение | 2 500 |
| | 2. Всходы, кущение, выход в трубку, колошение | 7 000 |
| Кукуруза | Выметывание метелки, цветение | 7 000 |
| Горох | 1. Всходы, бутонизация, цветение | 23 500 |
| | 2. Созревание | 20 000 |

4.1.1.1. Особенности ведения сельскохозяйственного производства в ближайший период после выпадения радиоактивных осадков

До выяснения радиационной обстановки и получения необходимых инструкций, специальных указаний необходимо население и обслуживающий персонал укрыть в защитных сооружениях на 2-4 дня (до получения результатов и информации об уровнях радиации на местности). За этот период происходит значительное уменьшение радиоактивности.

Таблица 55 – Снижение радиоактивности продуктов ядерного деления с течением времени, в условных единицах

| Время после взрыва, ч | Относительный уровень радиации, % | Время после взрыва, ч | Относительный уровень радиации, % |
|-----------------------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| 0,5 | 240 | 30 | 1,69 |
| 1 | 100 | 48 | 0,96 |
| 5 | 14,5 | 60 | 0,73 |
| 10 | 6,3 | 72 | 0,59 |
| 11 | 5,6 | 96 | 0,42 |
| 24 | 2,2 | 120 | 0,32 |

Животных в этот период необходимо загнать в помещение, принять меры по предотвращению выпаса скота на загрязненных пастбищах, по попаданию РВ в помещение через вентиляционные системы. Продолжительность стойлового безвыгульного содержания скота определяется конкретной радиационной обстановкой и периодом года. При радиоактивных выпадениях в зимне-стойловый период проблем с кормлением скота не должно быть, если заготовлено достаточное количество кормов. Если какие-то корма подвергаются под открытым небом радиоак-

тивному загрязнению, поверхностный слой кормов легко удалить до начала использования.

Более сложные вопросы в животноводстве возникают при выпадении РВ в летне-пастбищный период, особенно в молочном скотоводстве. Для производства молока с низким содержанием радионуклидов рекомендуется сформировать группу высокопродуктивных животных и скормливать им в условиях стойлового содержания заведомо чистые в отношении РВ кормов (силос, сенаж, грубые и концентрированные корма, заготовленные на зимний стойловый период). При отсутствии запасов этих кормов в последующие периоды после загрязнения РВ нужно организовать зеленый конвейер из посевов озимых, многолетних и однолетних трав, прежде всего, с культурных угодий, так как при выпасе молочного скота на естественных пастбищах с низким запасом биомассы вместе с травой и дерниной в организм животных и в продукцию животноводства поступает больше радионуклидов.

С получением данных радиационных разведок и с учетом уровня загрязненности территории РВ, они подразделяются на отдельные зоны. Все мероприятия по ведению сельского хозяйства ведутся с учетом этих зон, т.е. уровня радиационного загрязнения территории.

При аварии на предприятиях ядерной промышленности выделяют следующие зоны (первая цифра по «Ветеринарным правилам обеспечения радиационной безопасности животных и продукции животного происхождения ВП 13.7.13» от 12 июля 1999 г.; вторая – по НРБ-99 – «2.6.1. Ионизирующее излучение. Радиационная безопасность. Нормы радиационной безопасности. СП 2.6.1.758-99»):

1) зона выборочного радиационного контроля – уровень внешне-го радиационного фона на границе зоны не более 0,03 мР/ч (возможная величина годовой эффективной дозы населения, которая может быть получена при отсутствии мер радиационной защиты от 1 мЗв до 5 мЗв);

2) зона жесткого, сплошного радиационного контроля (или зона ограниченного проживания населения) – 0,03-0,1 мР/ч (возможная величина годовой эффективной дозы населения, которая может быть получена при отсутствии мер радиационной защиты от 5 мЗв до 20 мЗв);

3) зона отселения – 0,1-3 мР/ч (возможная величина годовой эффективной дозы населения, которая может быть получена при отсутствии мер радиационной защиты от 20 мЗв до 50 мЗв);

4) зона отчуждения – более 3 мР/ч (возможная величина годовой эффективной дозы населения, которая может быть получена при отсутствии мер радиационной защиты более 50 мЗв).

При локальных радиоактивных загрязнениях критерием вмешательства является следующее:

1. При возможной годовой эффективной дозе населения от 0,01-0,3 мЗв/год требуется выполнить исследование источника загрязнения с целью уточнения оценки годовой эффективной дозы и определения величины дозы, ожидаемой за 70 лет.

2. Уровень вмешательства – более 0,3 мЗв/год. При превышении этого уровня требуется проведение защитных мероприятий с целью ограничения облучения населения.

По времени, прошедшего с момента чрезвычайной ситуации, различают период «йодной опасности», период поверхностного загрязнения территории и период корневого поступления РВ в сельскохозяйственные культуры. Вышеназванное разделение на отдельные зоны относится к периоду именно «йодной опасности».

4.1.1.2. Ведение сельскохозяйственного производства в период «йодной опасности»

Первые дни и недели после чрезвычайной ситуации являются периодом «йодной опасности» (до 60 дней) потому, что в это время идет интенсивное выпадение радионуклидов из воздуха на объекты внешней среды – растения, почву, здания и сооружения и на животных короткоживущих радионуклидов, преимущественно ^{131}I и др., которые поражают щитовидную железу.

В этот период в **зоне выборочного радиационного контроля (зона 1)** проводится выборочный радиационный контроль продукции растениеводства и животноводства. Если эта продукция содержит РВ не выше временно допустимых уровней (ВДУ), эта продукция используется без ограничения, если радиоактивное загрязнение выше ВДУ, проводится пересмотр границ этой зоны или выбор пастбищ с низкой удельной радиоактивностью трав.

В **зоне жесткого радиационного контроля (зона 2)** вся продукция растениеводства и животноводства подвергается радиационному контролю. С целью снижения радиационного воздействия на животных и уменьшения радиоактивного загрязнения продукции животноводства устанавливается запрет на выпас животных на пастбище, организуется их стойловое содержание с соответствующим типом кормления или кормят зеленой массой однолетних и многолетних кормовых культур с низким содержанием РВ.

Для ограничения поступления населению молока с высоким содержанием радионуклидов выполняют следующие меры:

1) все свежее молоко как общественного, так и частного секторов изымается из употребления;

2) молоко перерабатывается на молокозаводах на молочные продукты, которые выдерживаются до естественной дезактивации или подвергаются искусственной дезактивации;

3) в рацион молочного скота вводятся препараты стабильного йода, вызывающие ускоренное выведение радиоактивного йода из организма.

Содержание свиней и кур в закрытых помещениях в этой зоне не требует специальных защитных мероприятий. Также не требуют специальных защитных мероприятий крупные предприятия по доращиванию и откорму скота с использованием следующих типов кормления: силосно-концентратного в сочетании с грубыми кормами; сенажно-концентратного; жомового или бардяного в сочетании с грубыми кормами, силосом, сенажом и концентратами. Такие типы кормления предотвращают поступление РВ с зелеными кормами, потому что используются ранее заготовленные корма.

Клеточное звероводство ведется в обычном порядке.

Убой животных разрешается только на специально оборудованных убойных пунктах и мясокомбинатах с обязательным исследованием мяса и других продуктов убоя на радиоактивность.

Запрещается охота на диких и промысловых животных, отлов рыбы, сбор ягод, грибов и т.д.

Зона 3 – отселения. После истечения 4-7 дневного срока после начала радиоактивного загрязнения все работы в растениеводстве и животноводстве прекращаются. Население и животные эвакуируются в безопасные места. Уборка созревшего урожая сельскохозяйственных культур ведется вахтовым методом и используется после соответствующей дезактивации. При снижении уровня радиоактивности в этой зоне может устанавливаться режим 2 зоны.

Зона 4 – отчуждения. Население и сельскохозяйственные животные эвакуируются в обязательном порядке. Проведение всех сельскохозяйственных работ прекращается. Сельскохозяйственные угодья подлежат залесению.

Из зоны отчуждения и отселения животные эвакуируются, поэтому возникает необходимость их сортировки в зависимости от степени тяжести острой лучевой болезни и возможности получения животноводческой продукции хорошего качества.

Радиационные поражения в значительной степени влияют на продуктивность молочных животных и качественный состав молока. При внутреннем облучении коров дозой 3 Ки в первые сутки удой снижается

на 33%, на 10 – на 52%, на 30 – на 85%; при тяжелой степени ОЛБ от внешнего облучения начиная с 7 суток продуктивность падает на 50%, а за несколько суток до смерти молокообразование прекращается полностью.

Изменяется состав молока – увеличивается показатель сухого обезжиренного молочного остатка (СОМО) в 1,5 раза, повышается удельная масса, кислотность, содержание кальция (Ca); снижается жирность (на 20%) и антибактериальные свойства.

Так как в волосяных фолликулах, сальных железах и других элементах кожи при воздействии радиации происходят структурно-морфологические изменения атрофического порядка, эти изменения способствуют снижению качества кожевенного сырья и шерсти: уменьшается настриг шерсти, ее густота, длина, тонина, извитость шерсти; прочность и толщина овчины.

Существенных изменений в мышцах как при внешнем, так и при внутреннем облучении не происходит – образующиеся радиотоксины разрушаются при кипячении; но возможны бактериальная обсемененность мышц, прежде всего, микрофлорой кишечника, снижение pH мяса. При развитии геморрагического синдрома возможны обширные кровоизлияния в мышцы, что ведет к снижению товарных качеств мяса.

Возможность использования молока и мяса определяется поглощенной дозой внешнего облучения и степенью внутреннего загрязнения скота радионуклидами йода – ^{131}I и другими короткоживущими радионуклидами в первые 2 месяца после радиоактивного загрязнения; ^{137}Cs и ^{90}Sr – в последующие сроки.

В случае внешнего облучения кур дозой 200-400 Р яйцекладка не изменяется, при тяжелой степени ОЛБ при внешнем облучении – прекращается в разгар развития ОЛБ. При внутреннем облучении яичник кур является критическим органом для радиоактивных веществ, которые выводятся с яйцами. Наблюдается избирательное накопление радионуклидов в отдельных частях яиц: ^{131}I – в желтке, ^{137}Cs – в белке и ^{90}Sr – в скорлупе яиц. Вопрос дальнейшего их использования решается с учетом удельной радиоактивности.

На основании клинического обследования животных они подразделяются на следующие группы:

1 группа – животные, предназначенные для дальнейшего использования по назначению. В эту группу отбирают животных с легкой степенью острой лучевой болезни (ОЛБ при внешнем облучении 1-2 Гр, при внутреннем облучении 3 мКи/кг). При необходимости плановый убой этих животных проводят в последнюю очередь. Эта группа

животных нуждается в полноценном кормлении и в создании хороших условий содержания, им необходимо выделять «чистые» в отношении радионуклидов пастбища для предотвращения дальнейшего поступления в организм РВ;

2 группа – животные, нуждающиеся в лечении. В эту группу отбирают обычных животных со средней степенью радиационного поражения (внешнее облучение в дозе 2-4 Гр, внутреннее облучение в дозе 0,1-0,5 мКи/кг); молодых животных с полноценной продуктивностью; высокоценных в племенном отношении животных с тяжелой степенью лучевого поражения. Эта группа животных подвергается интенсивному лечению, им предоставляются хорошее содержание и лучшие корма;

3 группа – животные, предназначенные для уоя. В эту группу включают животных с крайне тяжелой (более 6 Гр при внешнем и более 3 мКи/кг при внутреннем облучении) и тяжелой (4-6 Гр при внешнем облучении, 1,0-3,0 мКи/кг при внутреннем облучении) степенями острой лучевой болезни; ослабленных, старых, малопродуктивных животных со средней степенью лучевого поражения. Эта группа животных нуждается в поддерживающем лечении до уоя. При выборе очередности уоя животных этой группы необходимо руководствоваться следующими правилами:

1) животных, имеющих только внешнее облучение, забивают как можно раньше с целью предупреждения потери упитанности и профилактики бактериальной обсемененности мяса и внутренних органов – при крайне тяжелой степени ОЛБ – не позднее 3-5 суток, при тяжелой степени ОЛБ – в первые 6-10 суток, при средней тяжести ОЛБ – в первые 10-12 суток после радиационного воздействия;

2) при внутреннем облучении, если нет нового поступления радионуклидов, убой животных со средней и тяжелой степенью радиационного поражения задерживают для снижения удельной радиоактивности за счет физического распада ($T_{\text{физ.}}$) и биологического выведения ($T_{\text{биол.}}$); животным этой группы предоставляют «чистые» корма и воду;

3) при сочетанном облучении животных (внешнее + внутреннее облучение) поступают как с животными с тяжелой и крайне тяжелой степенями острой лучевой болезни.

4 группа – животные в агональном состоянии. Животные этой группы подвергаются немедленному убою в первую очередь. Туша подвергается утилизации.

При определении сроков и процентов уоя и использования можно пользоваться данными таблицы 56.

Таблица 56 – Сроки и процент использования для убоя на мясо сельскохозяйственных животных

| Дозы облучения | Время после облучения, сут. | Выжило животных, % | Используется в пищу мяса, % |
|----------------------------|-----------------------------|--------------------|-----------------------------|
| 350 Р-ЛД _{50/30} | 7 | 100 | 100 |
| | 14 | 100 | 100 |
| | 30 | 100 | 100 |
| | 365 | 100 | 100 |
| 550 Р-ЛД _{50/30} | 7 | 100 | 100 |
| | 14 | 80 | 100 |
| | 30 | 50 | 50 |
| | 365 | 48 | 48 |
| 750 Р-ЛД _{100/30} | 4 | 100 | 100 |
| | 7 | 100 | 100 |
| | 14 | 35 | 35 |
| | 30 | 0 | 0 |
| | 365 | 0 | 0 |

Существует следующий порядок оценки продуктов убоя, полученных при убое животных при внешнем, внутреннем облучении и внешнем загрязнении:

1. Продукты убоя, полученные при внешнем облучении при отсутствии патологических изменений выпускаются без изменения; но при наличии патологических изменений мяса и внутренних органов подвергаются бактериологическому исследованию – при отрицательном результате они используются без ограничения, при положительном результате – подвергаются обеззараживанию от микроорганизмов путем термической обработки (проварка).

2. Продукты убоя, полученные от животных при инкорпорации РВ и подвергшихся внутреннему облучению и при сочетанном радиационном поражении – подвергаются обязательной радиометрии. *При отсутствии патологических изменений*, если удельная радиоактивность не выше ВДУ, используются без ограничений; а если выше ВДУ – подвергаются дезактивации существующими методами. *При наличии патологических изменений*, если удельная радиоактивность не выше ВДУ, подвергаются бактериологическому исследованию, при отрицательном результате используются без ограничений, а при положительном результате – подвергаются обеззараживанию путем термической обработки.

3. Внутренние органы, полученные от животных при внутреннем и сочетанном облучении, подвергаются утилизации или захоронению.

4. При поверхностном загрязнении продуктов убоя РВ они должны обязательно подвергаться радиометрии, если удельная радиоактивность выше ВДУ, подвергаются дезактивации путем обмывания или зачистки поверхностных слоев. Если удельная радиоактивность ниже ВДУ, то такие продукты убоя используются без ограничений.

5. При наличии наведенной радиоактивности продукты убоя подвергаются хранению при низкой температуре в течение 5-7 суток, затем они подлежат повторной радиометрии, если удельная радиоактивность ниже ВДУ – продукты используются без ограничений.

Если удельная радиоактивность сельскохозяйственной продукции выше ВДУ, она подвергается дезактивации.

Дезактивацией называется снижение удельной радиоактивности продуктов животноводства, окружающей среды, кормов, воды и других объектов при их загрязнении радиоактивными веществами.

Методы дезактивации продукции животноводства

Дезактивация мяса. При обработке мясной продукции следует учитывать особенности распределения радионуклидов по разным органам и тканям. Например, концентрация ^{90}Sr в костной ткани свиней, получавших с рационом этот радионуклид, хронически превышает концентрацию в мягких тканях в 600-7000 раз. Радионуклиды ^{137}Cs и ^{40}K концентрируются главным образом в мышцах. В ранние периоды после поступления радионуклидов во внешнюю среду наибольшая концентрация радиоактивного йода накапливается в щитовидной железе. С учетом указанных особенностей распределения радионуклидов при разделке животных часть продукции (мышцы, субпродукты) может быть использована для пищевых целей, а другая часть (щитовидная железа, лимфатические узлы) выведены из пищевой цепи или подвержены выдержке для уменьшения концентрации короткоживущих радионуклидов. В последнем случае наиболее быстро содержание радионуклидов будет уменьшаться в субпродуктах, более медленно – в костях. Для снижения содержания радионуклидов в костной ткани рекомендуется вываривать ее в воде с добавлением соли. Переход ^{90}Sr из кости в бульон после хронического поступления радионуклида в организм животного колеблется в пределах 0,009-0,18%, а при затравке животных перед убоем – 4-10% и более. Из костей коровы, которой был введен ^{131}I за неделю до убоя, в бульон переходит $2,5 \pm 0,2\%$. Выварка

^{106}Ru из костей козы, затравленной за 8 суток до убоя, не превышает 33%, а из костей разных животных в бульон переходит 67-80% ^{137}Cs .

В процессе варки мяса 7-месячного бычка в бульон переходит $57 \pm 11\%$ ^{90}Sr , а после добавления в воду кислоты (лимонной или молочной) – 76-85%. Примерно столько же ^{90}Sr переходит из мяса в бульон у кур, получавших радионуклид в течение 1 месяца. При этом 50-60% радионуклида, накопленного в мясе, переходит в бульон в первые 10 мин варки и может быть удалено вместе с бульоном.

Выварка ^{137}Cs не связана с длительностью затравки и видом животных, но имеет тенденцию к увеличению у взрослых животных. Так, и из мяса телят, козлят и поросят в бульон переходит 77-81% ^{137}Cs , а из мяса взрослых животных – 85-87%, что позволяет снизить концентрацию цезия в вываренном мясе в 3-6 раз по сравнению с сырым продуктом. Аналогичные данные получены для рыб и кроликов.

Снизить концентрацию радионуклидов в мясе можно длительным хранением его в засоленном виде и вымачиванием солонины. Применение этих технологических приемов (четыре обработки со сменой рассола) снижает концентрацию ^{137}Cs в мышечной ткани на 63-99%, причем эти значения зависят от размеров нарезанных кусочков мышечной ткани, числа обработок проточной водой, длительности вымачивания и отношения твердой и жидкой фаз. Перетопка сала сопровождается переходом свыше 95% ^{137}Cs в шквару, в результате чего концентрация этого радионуклида в топленом жире снижается почти в 20 раз и становится примерно в 100 раз меньше, чем в мышцах.

Обвалка мяса – отделение мягких тканей мяса от костной ткани. Так как костная ткань является основным органом, где происходит накопление радиостронция, удаление костей вызывает снижение радиоактивности на 15-45%.

При контактном, поверхностном загрязнении мяса РВ эффективна промывка водой или слабыми растворами кислот (молочной, уксусной, лимонной) и удаление поверхностных загрязненных слоев.

Таким образом, применение стандартных и специальных методов технологической, кулинарной обработки мяса позволяет существенным образом снизить содержание радионуклидов.

Дезактивация молока. В случае превышения ВДУ загрязнения молока радионуклидами оно подвергается дезактивации. Так, после сепарирования цельного молока 85-90% ^{90}Sr , ^{131}I , ^{137}Cs остаются в обезжиренном молоке и 8-16% – в сливках. Двух-, трехкратная промывка сливок теплой питьевой водой и обезжиренным молоком снижает содержание в них ^{90}Sr еще в 50-100 раз. При переработке сливок в сли-

вочное масло основная часть указанных радионуклидов переходит в пахту и промывные воды. Концентрация ^{90}Sr , ^{131}I , ^{137}Cs в сливочном масле составляет 36, 76 и 49% концентрации радионуклидов в молоке. Очевидно, из загрязненного молока прежде всего целесообразно получать сливки и сливочное масло. Переработка сливок на масло и пахту – в пахте остается 7-13% радиоактивных веществ от первоначального содержания в молоке, в масле – 2-3%. Перетопка сливочного масла позволяет удалить из этого продукта практически полностью ^{90}Sr и ^{137}Cs , ^{131}I – 10%. Переработка молока на сыры, творог, порошковые и сгущенное молоко, которые также могут быть подвергнуты длительному хранению, позволяет значительно снизить или исключить содержание в этих продуктах короткоживущих радионуклидов, например ^{89}Sr , ^{131}I , ^{140}Ba . Обезжиренное молоко, в котором остается основная часть радионуклидов, может быть использовано для получения белковых концентратов – творога и сыра. При переработке обрат на кислый казеин и сыворотку в казеине остаточное количество РВ составляет 2-6,5%, в сыворотке – 80-85% от первоначального содержания в молоке.

В результате такой технологической обработки молока получают относительно «чистые» в отношении радионуклидов конечные продукты – топленое масло и кислый казеин.

По способности переходить из молока в творог при кислотном способе свертывания радионуклиды образуют следующий ряд: $^{131}\text{I} > ^{137}\text{Cs} > ^{90}\text{Sr}$. После промывки кислотного сгустка происходит эффективное вымывание из него ^{131}I и особенно ^{137}Cs , тогда как ^{90}Sr остается в сгустке. В кислотный казеин из молока поступает 6,3-8,2% ^{90}Sr , 3,0-3,9% ^{131}I и лишь 1,0-1,6% ^{137}Cs . Из обезжиренного молока может быть выработан сыр типа коттедж, в который переходит лишь 2,7% ^{90}Sr и 1,1% ^{137}Cs . Концентрация радионуклидов в сыре соответственно в 1,9 и 6,2 раза меньше, чем в молоке.

Таким образом, замена в рационе молока, содержащего повышенные концентрации радионуклидов, полученными из него продуктами позволяет более чем в 10 раз снизить поступление радионуклидов в рацион человека. Переработка цельного молока в сметану и творог домашним способом исключает из питания человека до 63-82% содержащихся в нем ^{90}Sr , ^{137}Cs и ^{131}I , а переработка такого молока на творог и сыр заводским способом снижает содержание в рационе ^{90}Sr , ^{137}Cs на 90%, а ^{131}I на 70%.

Радиоизотопы цезия и йода находятся главным образом в водной фазе молока, поэтому при получении масла и сыров они в основном остаются в водной фазе. Стронций же, являясь аналогом кальция, в основ-

ном связан с казеином в виде казеинат-фосфатного комплекса. Поэтому для очистки в молоке необходимо вначале разрушать этот комплекс путем подкисления лимонной или соляной кислотой. При сквашивании молока этот комплекс разрушается молочной кислотой, выделяемой молочнокислыми бактериями. При кислотном свертывании молока до 85% стронция удаляется с сывороткой, а при бескислотном сычужном свертывании молока с сывороткой удаляется не более 20% стронция и 80% его переходит в сыр. Удаление с сывороткой ^{137}Cs и ^{131}I практически одинаково как при сычужном, так и при кислотном свертывании молока. В полученном таким образом сыре остается в среднем 6% цезия и около 10% йода.

Очистка молока от радионуклидов может быть проведена с помощью малорастворимых соединений щелочноземельных элементов, использования ионообменного метода и электродиализа. Так, применение пирофосфата в течение 1 суток позволяет удалить из молока до 83% ^{90}Sr без существенного изменения состава и свойств продукта. Один объем анионита Дауэкс 2Wx-8 позволяет удалить свыше 95% ^{131}I из объемов молока и примерно 50% ^{90}Sr . Такой прием позволяет с помощью одного катионита удалить около 70% ^{137}Cs из 30 объемов молока; при этом химический состав продукта практически не изменяется. Электродиализный метод очистки молока удаляет до 90% ^{90}Sr , 80% ^{140}Ba и 99% ^{137}Cs , а на электродиализной установке с анионообменной мембраной из молока может быть удалено 70-90% ^{131}I . Этот метод представляется перспективным для промышленного применения, так как характеризуется компактностью оборудования, простотой эксплуатации и эффективностью удаления радионуклидов из молока.

Хорошие результаты получают при использовании ионообменных смол – анионитов, которые удаляют до 90% цезия и йода и 60-65% стронция без ухудшения качества молока. Силикагель удаляет из молока 80-90% цезия и йода и 30-40% стронция; цеолиты снижают загрязненность молока цезием на 90%.

Сорбент на основе анионообменной целлюлозы ЦМ-А2 можно использовать как в промышленных условиях, так и в индивидуальных хозяйствах. Он позволяет убрать из молока до 95% радиоактивного йода. Метод очень прост и технически выполняется добавлением данного сорбента прямо в ведро из расчета на 1 л молока 35-40 грамм. Через 15-30 мин перемешивания сорбент отделяют фильтрованием через слой ваты или лавсановую ткань. Сорбент в индивидуальных хозяйствах рассчитан на однократное использование, после чего его утилизируют как радиоактивные отходы.

В случае контактного загрязнения молочных продуктов (масла сливочного, сыра, брынзы) их дезактивацию проводят срезанием поверхностного слоя на глубину 2-3 мм.

Дезактивация яиц. Яичник кур является критическим органом для радиойода – ^{131}I , при поступлении РВ в желтке откладывается до 3-4% радиойода, в белке депонируется до 9-10% ^{137}Cs , в скорлупе – до 37-40% ^{90}Sr от суммы РВ, введенных в организм. В первые дни после радиоактивного загрязнения птицы радиоактивность яйца по ^{131}I может составить 50% общей активности от суточной дозы, а на 19-20 сутки соотношение отдельных радиоактивных веществ изменяется и составляет: по ^{131}I – 6,5-3,7%, по ^{90}Sr – 75-93%, по ^{137}Cs – 18-30%.

Дезактивация яиц проводится методом длительного хранения целых яиц или же отдельной переработкой желтка и белка на меланж и яичный порошок с закладкой их на длительное хранение.

Радиоактивность белка за 43 дня хранения, желтка за 14 суток хранения уменьшается в 10 раз. Скорлупа при переработке яиц на меланж и яичный порошок закапывается в землю.

Яйца, полученные от кур при внешнем облучении, используются без ограничений.

Дезактивация шерсти и кожевенного сырья проводится методом длительного хранения при соответствующих условиях.

Переработка загрязненной растениеводческой продукции дает возможность существенно снизить содержание радионуклидов в конечном продукте. Даже такие простейшие операции, как обмывание в проточной воде, позволяет снизить загрязнение зерна в 1,5-3 раза.

Таблица 57 – Эффективность приемов переработки урожая, загрязненного РВ

| Культура | Способ обработки | Кратность снижения |
|----------------------------|-----------------------------|--------------------|
| Пшеница, рожь (зерно) | Отвешивание | 1,2 |
| | Отмывание проточной водой | 1,5-3,0 |
| | Переработка в крахмал | 50 |
| | Переработка в спирт | 1 000 |
| Рис, гречиха, ячмень, овес | Обрушение, удаление пленок | 10-20 |
| | Очистка | 2 |
| Картофель (клубни) | Переработка в крахмал | 50 |
| | Удаление кроющих листьев | 40 |
| Капуста (кочан) | Удаление кроющих листьев | 40 |
| Турнепс, свекла | Срезание головки корнеплода | 20 |
| Томаты, огурцы | Отмывание проточной водой | 3-10 |
| | Засолка отмытых овощей | 2-2,5 |
| Конопля, лен | Отмачивание в воде | 3-4 |

4.1.1.3. Ведение сельскохозяйственного производства в период поверхностного загрязнения почвы радиоактивными веществами

В течение первого года после выпадения радиоактивных осадков радионуклиды находятся на поверхности растений и в верхнем 5-сантиметровом слое почвы. В этот период и в последующее время зонирование территории проводится по количеству находящихся на ней наиболее опасных в радиобиологическом отношении долгоживущих радионуклидов – ^{137}Cs и ^{134}Cs , ^{89}Sr и ^{90}Sr , ^{239}Pu и ^{240}Pu и других на единице площади, выраженное в Бк/км² или Ки/км².

Таблица 58 – Зонирование территории в зависимости от плотности загрязнения долгоживущими РВ

| Зона загрязнения | Плотность загрязнения, Ки/км ² | |
|------------------|---|------------------|
| | ^{137}Cs | ^{90}Sr |
| 1 | до 15 | до 3 |
| 2 | 15-40 | 3-10 |
| 3 | 40-80 | 10-30 |
| 4 | свыше 80 | свыше 30 |

В хозяйствах, расположенных в зоне 1, сельскохозяйственное производство ведется без существенного репрофилирования.

В зоне 2 коров переводят на стойлово-лагерное содержание. Естественные сенокосы и пастбища исключают из использования для молочного скота, а для откормочного скота исключают их за 2-3 месяца до убоя.

При кормлении животных учитывают коэффициент перехода (дискриминации) изотопов из рациона в продукцию животноводства. **Коэффициент дискриминации (перехода)** – процентное содержание РВ в животноводческой продукции от общего содержания в рационе. Например, коэффициенты перехода ^{137}Cs в продукцию животноводства следующие – в молоко 1%, мясо говяжье – 4%, мясо свиное – 25%, сало свиное – 5%, мясо баранье – 15%, мясо куриное – 45%, в яйцо – 2,5%.

В зоне 3 сельскохозяйственные угодья не используют, подвергают их коренному улучшению.

В зоне 4 все виды сельскохозяйственных работ запрещены, коренного улучшения земли не проводится.

4.1.1.4. Ведение сельскохозяйственного производства в период корневого поступления РВ в растения

На второй и последующие годы после выпадения радиоактивных осадков основное количество РВ будет находиться в почве и из нее поступать в вегетативную массу и урожай сельскохозяйственных культур и траву пастбищ, а затем с кормом – в организм животных; через продукты питания – в организм человека.

Зонирование территории в этот период будет производиться также по удельной радиоактивности территории.

Таблица 59 – Зонирование территории в период корневого поступления РВ

| Зоны | ^{137}Cs – Ки/км ² | ^{90}Sr – Ки/км ² |
|------|--|---------------------------------------|
| 1 | 1-5 | 1-2 |
| 2 | 5-15 | 2-3 |
| 3 | 15-40 | свыше 3 |
| 4 | свыше 40 | – |

Для снижения поступления радиоактивных веществ в корма, организм животных проводят ряд комплексных мероприятий как агротехнических, так и зоотехнических.

4.1.1.4.1. Агротехнические мероприятия. Агротехнические мероприятия разделяются на 2 группы:

1. Традиционные в растениеводстве, направленные на повышение плодородия почвы, урожайности и качества продукции.
2. Специальные приемы, направленные на снижение накопления радионуклидов в продукции растениеводства.

Традиционные мероприятия или агротехнические мероприятия включают вспашку загрязненной почвы с оборотом пласта или отвальным плугом; подбор культур и сортов растений с наименьшим накоплением радионуклидов; применение приемов прополки, снижающих вторичное загрязнение; перевод естественных кормовых угодий в кормовой севооборот (полевое кормопроизводство); поверхностное улучшение кормовых угодий; коренное улучшение природных сенокосов и пастбищ, известкование кислых почв; внесение двойных доз калийных и фосфорных удобрений, внесение органических удобрений (40 т/га и более) и микроудобрений.

Специальные защитные мероприятия предусматривают применение высоких доз калийных удобрений, глинистых минералов и местных глин для увеличения емкости поглощения почвой радиоактивного цезия

и снижения его биологической подвижности. Специальные технологические приемы включают применение приемов уборки урожая, снижающих вторичное загрязнение частицами почвы: уборка зерновых прямым комбайнированием, использование высокопроизводительных машин, промывку, сортировку и первичную очистку плодоовощной продукции и корнеплодов, переработку продукции с целью снижения содержания радионуклидов.

Агротехнические мероприятия. Обработка почв. Система обработки почв в зоне радиоактивного загрязнения направлена на снижение накопления радионуклидов в урожае, уменьшение эрозийных процессов и снижение времени воздействия ионизирующих излучений на работающих в поле.

Мелиоративная глубокая вспашка, снижающая поступление радионуклидов в 5-10 раз, возможна на почвах с мощным гумусовым и торфяным слоем. Выполняют ее плантажными, болотными или специальными одноярусными плугами с предплужниками. По пласту многолетних трав для проведения такой вспашки необходима предварительная разделка дернины фрезерованием на глубину загрязнения. Такая вспашка производится один раз, последующие обработки проводятся таким образом, чтобы их глубина была меньше глубины расположения заделанного загрязненного слоя. На легких песчаных и супесчаных почвах с уровнем загрязнения менее 15 Ки/км^2 (555 кБк/м^2) по ^{137}Cs и менее 1 Ки/км^2 (37 кБк/м^2) по ^{90}Sr целесообразна система минимальной обработки. Вспашка необходима только на задерненных почвах, а также под пропашные культуры (картофель, корнеплоды) при внесении больших доз органических удобрений.

При высокой плотности загрязнения радионуклидами ($15-40 \text{ Ки/км}^2$ или $555-1480 \text{ кБк/м}^2$ по ^{137}Cs и $1-3 \text{ Ки/км}^2$ или $37-111 \text{ кБк/км}^2$ по ^{90}Sr) рекомендуется комбинированная система обработки почвы, включающая дополнительно к минимальной обработке почвы заделку в подпахотные слои больших доз органических удобрений или сидеральных культур. Глубина вспашки не должна превышать мощности пахотного горизонта.

Посев зерновых, зернобобовых и крестоцветных культур должен быть особо качественным, на строго заданную глубину, с равномерным распределением по площади питания. Повышение эффективности и уменьшение потерь удобрений обеспечивается при закладке на глубину 5-9 см с боковой ориентацией относительно рядков семян в пределах 3-4 см.

Коренное улучшение – наиболее эффективный способ снижения поступления радионуклидов из почвы в луговые травы малопродуктивных естественных кормовых угодий. Первичную обработку дернины осуществляют тяжелыми дисками в два-три слоя на глубину 18-20 см (слабозадерненные луга), 30-35 см (сильнозадерненные луга и торфяно-болотные почвы).

Подбор кормовых культур. Многолетние травы сенокосов и пастбищ отличаются наибольшей способностью аккумулировать радионуклиды. По степени уменьшения поступления радионуклида естественные травы располагаются в следующем порядке: *разнотравье – осоки – ежа сборная – мятлики*. Среди злаковых многолетних трав по накоплению ^{137}Cs установлен следующий убывающий ряд: *костер безостый – тимopheевка луговая – ежа сборная – овсяница луговая – мятлик луговой – райграс пастбищный*. Накопление ^{137}Cs на единицу сухого вещества однолетних полевых культур уменьшается в следующем порядке: *зерно люпина, зеленая масса пелюшки, редьки масличной и рапса, зерно гороха и вики, семена рапса, зеленая масса гороха, вики, ботва свеклы, солома ячменная, овсяная, озимой ржи, озимой пшеницы, зерно кукурузы, овса, ячменя, озимой ржи и пшеницы*.

Убывающий ряд культур по накоплению ^{90}Sr следующий: *клевер – горох – рапс – люпин – однолетние бобово-злаковые смеси – разнотравье суходольных сенокосов и пастбищ – многолетние злаковые травы – солома ячменная – солома овса – зеленая масса кукурузы и озимой ржи – свекла кормовая – зерно ячменя – овса – озимой ржи – картофель*.

Известкование кислых почв. Внесение извести – эффективный прием снижения поступления ^{137}Cs и ^{90}Sr из почвы в растения и одновременного повышения урожайности. Установлено, что внесение извести в дозе, соответствующей полной гидролитической кислотности, снижает содержание радионуклидов в продукции растениеводства в 1,5-3 раза в зависимости от типа почв и исходной кислотности. Минимальное накопление радионуклидов наблюдается при оптимальных показателях реакции почвенной среды (рН в KCl), которые для дерново-подзолистых почв в зависимости от гранулометрического состава составляют: глинистые и суглинистые – 6,0-6,7; супесчаные – 5,8-6,2; песчаные – 5,6-5,8; на торфяно-болотные – 5,0-5,3; минеральные почвы сенокосов и пастбищ – 5,8-6,2. Если разовая доза внесения извести составляет более 8 т/га, она вносится в два приема – под вспашку и под культивацию. При плотности загрязнения ^{137}Cs свыше 350 Бк/м² известкование проводится один раз в три года, а при меньших плотностях загрязнения один раз в пять лет.

Применение удобрений. Применение органических удобрений в обычных дозах уменьшает переход радионуклидов из почвы в растения на 15-30%.

Применение калийных удобрений в высоких дозах обеспечивает антагонизм ионов калия по отношению к радиоактивному цезию, что снижает его накопление в растениях, особенно на бедных калием дерново-подзолистых песчаных и супесчаных почвах (K_2O вносится из расчета более 240 кг/га, в первые годы после радионуклидного загрязнения почвы), в последующие годы калийные удобрения вносят в обычных дозах. Одновременно калийные удобрения снижают накопление и радиостронция в растениях. Особенно эффективно внесение повышенных доз калийных удобрений под многолетние травы, картофель и корнеплоды.

Фосфорные удобрения снижают поступление радионуклидов в растительную продукцию на почвах с низким содержанием подвижных фосфатов.

При недостатке доступного азота в почве снижается урожайность и концентрация радионуклидов в продукции несколько повышается. Повышенные дозы азотных удобрений усиливают накопление радионуклидов в растениях.

Микроудобрения также снижают поступление радионуклидов в сельскохозяйственные культуры.

Размеры накопления радионуклидов в урожае зависят от их видовых и сортовых особенностей при наблюдающейся аналогии поступлений в растения радиостронция, радиоцезия и стабильных изотопов кальция и калия. В товарной части растениеводческой продукции на единицу сухой массы урожая больше всего ^{90}Sr и ^{137}Cs содержат корнеплоды, бобовые культуры, картофель и зерновые культуры.

Следует отметить существенную разницу в накоплении радионуклидов в урожае озимых и яровых зерновых культур. Озимые зерновые культуры накапливают в 2-2,5 раза меньше стронция и радиоцезия, чем яровые зерновые культуры. Для относительной оценки содержания радионуклидов в рационе животных необходимо знать размеры сравнительного их накопления в хозяйственно ценной части урожая.

Разные сорта одних и тех же растений также отличаются по степени поглощения радионуклидов из почвы, межсортные различия могут достигать 2-, 3-кратных величин. Закономерности такие, что растения с более продолжительным вегетационным периодом меньше накапливают радионуклиды.

Таблица 60 – Сравнительное количество радионуклидов в урожае растений

| Культура | Коэффициент содержания | |
|-----------------------------------|------------------------|-----------------------|
| | для ^{90}Sr | для ^{137}Cs |
| Пшеница яровая (зерно) | 1 | 1 |
| Пшеница озимая (зерно) | 0,35 | 0,4 |
| Рожь озимая (зерно) | 0,35 | 0,4 |
| Овес (зерно) | 1,3 | 0,8 |
| Горох (зерно) | 2,0 | 1,9 |
| Гречиха (зерно) | 1,4 | 0,9 |
| Кукуруза (зеленая масса) | 2,6 | 0,6 |
| Викоовсяная смесь (зеленая масса) | 2,2 | 1,9 |
| Картофель (клубни) | 0,8 | 0,6 |
| Столовая свекла (корнеплоды) | 1,6 | 2,3 |

Таблица 61 – Временные допустимые уровни содержания радионуклидов ^{137}Cs в пищевых продуктах и питьевой воде, установленные в связи с аварией на Чернобыльской АЭС (Бк/кг)

| Продукт | Удельная активность | | |
|---|---------------------|--------|----------------------|
| | ВДУ-88 | ВДУ-93 | РДУ-96 Белоруссия |
| Вода питьевая | 18,5 | 18,5 | 18,5 |
| Молоко, кисломолочные продукты, сметана, творог, сыр, масло сливочное | 370 | 370 | 111 |
| Молоко сгущенное | 1110 | 1200 | 740 |
| Молоко сухое | 1850 | 6000 | 740 |
| Масло сливочное | 1110 | 370 | 185 |
| Мясо и продукты из них: | | | |
| говядина | 2960 | 600 | 600 |
| свинина | 1850 | 600 | 370 |
| птицы | 1850 | 600 | 370 |
| баранина | 1850 | 600 | 600 |
| Жиры растительные и животные, маргарин | 370 | 370 | 185 |
| Картофель, корнеплоды, овощи, столовая зелень, садовые фрукты, ягоды, овощи | 740 | 600 | 100 |
| консервированные продукты из овощей, садовых фруктов и ягод | 740 | 600 | 74 |
| Хлеб и хлебопродукты, крупы, мука, сахар | 370 | 370 | 74 |
| Свежие дикорастущие ягоды и грибы | 1850 | 600 | 370 |
| Сухофрукты | 11 100 | 6000 | 3700 |
| Сушеные грибы | 11 100 | 6000 | 3700 |
| Специальные продукты детского питания | 370 | 185 | 37 |

Луговые и пастбищные растения отличаются более высоким накоплением радионуклидов по сравнению с растениями на пахотных землях. Это связано с поглощением травами питательных веществ из дернины и с тем, что дернина задерживает больше радионуклидов. Поэтому при введении полевых кормовых севооборотов поступление радионуклидов по сравнению с использованием естественных пастбищ и лугов сравнительно меньше.

Если в хозяйстве в период корневого поступления РВ продукция животноводства продолжает содержать значительное количество РВ, то хозяйства перепрофилируют: вместо молочного скотоводства развивают откормочное скотоводство или свиноводство, птицеводство. Учитывают то, что отрасли мясного скотоводства, свиноводства и птицеводства меньше используют пастбищные зеленые корма, как источник основного поступления радионуклидов.

Как правило, поля в хозяйствах должны использоваться для возделывания культур кормового и технического назначения (зерновые, рапс, лен, конопля, сахарная свекла, картофель на переработку и др.), ведения семеноводства всех сельскохозяйственных культур. Эти культуры можно дезактивировать обычными технологическими приемами.

Нормирование содержания радионуклидов проводится на основе ВДУ.

Таблица 62 – Временно допустимые уровни содержания ^{90}Sr в пищевых продуктах, Бк/кг (Ки/кг)

| Продукт | Россия (ВДУ-93) | Белоруссия (РДУ-96) |
|----------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Вода питьевая | $0,37 (1 \times 10^{-11})$ | $0,37 (1 \times 10^{-12})$ |
| Молоко и цельномолочные продукты | $37 (1 \times 10^{-9})$ | $3,7 (1 \times 10^{-10})$ |
| Молоко сухое и концентрированное | $200 (6 \times 10^{-9})$ | $74 (2 \times 10^{-10})$ |
| Хлеб и хлебобродуки | $37 (1 \times 10^{-9})$ | $3,7 (1 \times 10^{-10})$ |
| Картофель | $100 (3 \times 10^{-9})$ | $3,7 (1 \times 10^{-10})$ |
| Детское питание | $3,7 (1 \times 10^{-10})$ | $1,86 (5 \times 10^{-11})$ |
| Специи, чай, мед | $1000 (3 \times 10^{-9})$ | $37 (1 \times 10^{-9})$ |
| Прочие продукты | $100 (3 \times 10^{-9})$ | $37 (1 \times 10^{-9})$ |

Примечания. 1. Отдельные республики имеют право устанавливать контрольные уровни содержания радионуклидов в пищевых продуктах и питьевой воде, как для всей республики, так и для отдельных территорий. При этом они не должны превышать численность значений ВДУ-91. Контрольные уровни устанавливаются исходя из реальной радиационной обстановки и экономических возможностей республики в целом или отдельных территорий.

2. Производство детского питания из продуктов, получаемых на загрязненных территориях, не рекомендуется.

3. Соблюдение ВДУ по цезию-137, как правило, обеспечивает соблюдение ВДУ по стронцию-90.

4.1.1.4.2. Зоотехнические мероприятия по снижению содержания радионуклидов в продукции животноводства. В летне-пастбищный период хороший эффект дают перевод животных на стойловое содержание и организация зеленого конвейера. В этом случае исключается возможность поступления радиоактивных веществ с дерниной, на которой находится большая часть радиоактивных веществ. Хорошие результаты дает целенаправленное кормопроизводство при использовании всех агрохимических и агротехнических способов снижения миграции радионуклидов из почвы в растения. Подбирая соответствующие корма, можно снизить поступление радионуклидов в организм животных и переход их в мясо и молоко.

Таблица 63 – Влияние типа рациона на поступление радионуклидов в организм и продукцию животных, %

| Тип рациона | Поступление с рационом | | Содержание ⁹⁰ Sr | | Содержание ¹³⁷ Cs | |
|-----------------------|------------------------|--------|-----------------------------|----------|------------------------------|----------|
| | Sr-90 | Cs-137 | в мышцах | в молоке | в мышцах | в молоке |
| Смешанный | 35 | 44 | 33 | 36 | 43 | 50 |
| Силосно-концентратный | 18 | 48 | 20 | 18 | 50 | 57 |

Очень важно обеспечивать животных полноценным фосфорно-кальциевым питанием. Это позволит снизить содержание радиоактивного стронция в молоке и мясе приблизительно в 2-4 раза, особенно при двукратном превышении рекомендуемых норм содержания кальция и фосфора в рационе животных.

При выращивании и откорме мясных животных на кормах, загрязненных радионуклидами, большое внимание нужно уделять заключительному, предубойному периоду. Для прижизненного очищения мяса и субпродуктов от радионуклидов путем организации кормления животных «чистыми» кормами в последние 1-3 месяца предубойного периода.

4.1.1.5. Прогнозирование поступления радионуклидов в сельскохозяйственную продукцию

В период поверхностного загрязнения почвы и корневого поступления радионуклидов в растения необходимо прогнозирование поступления радионуклидов в растениеводческую и животноводческую продукцию.

4.1.1.5.1. Прогноз загрязнения растениеводческой продукции.

Прогноз загрязнения растениеводческой продукции позволяет заблаговременно планировать набор культур для возделывания на загрязненных радионуклидами угодьях, их размещение по полям севооборотов и отдельным участкам с учетом плотности загрязнения почв и возможности использования получаемой продукции.

Для прогнозирования поступления радионуклидов в корма и продукцию животноводства необходимо прежде всего установить, какими радионуклидами загрязнены воздух и территории сельскохозяйственных угодий и каковы плотность и равномерность этих загрязнений. Другие важнейшие показатели – биологическая доступность и способность радионуклидов мигрировать по пищевым цепочкам.

Содержание радионуклидов в сельскохозяйственной продукции зависит как от плотности загрязнений, так и от типа почв, от их гранулометрического состава и агрохимических свойств. При повышении содержания в почве физической глины от 5 до 30%, гумуса от 1 до 3,5% переход радионуклидов в растения снижается в 1,5-2 раза, по мере содержания в почве подвижных форм калия и фосфора от низкого (K_2O менее 100 мг/кг почвы) до оптимального (200-300 мг/кг) и изменения реакции почвы от кислой (рН 4,5-5,0) к нейтральной (рН 6,5-7,0) – в 2-3 раза (см. приложения).

Еще в большей степени на накопление радионуклидов влияет режим увлажнения почвы. Минимальное накопление ^{137}Cs в многолетних травах обеспечивается при поддержании уровня грунтовых вод на глубине 90-120 см от поверхности осушенных торфяных и торфяно-глеевых почв. На переувлажненных песчаных и торфяных почвах высокая степень загрязнения кормов и молока наблюдается даже при относительно низких плотностях загрязнения ^{137}Cs (2-5 Ки/км²) и ^{90}Sr (0,3-1 Ки/км²). В то же время на окультуренных участках дерново-подзолистых суглинистых почв продукция с допустимым содержанием радионуклидов была получена при плотности загрязнения ^{137}Cs до 20-30 Ки/км², существенно, на переход ^{137}Cs из почвы в растение влияет содержание в ней органического вещества. Поступление этого радионуклида в растения из торфяных почв превышает его поглощение из минеральных почв в несколько раз.

Сортовые различия в накоплении радионуклидов значительно меньше (до 1,5-3 раз).

Для прогноза накопления радионуклидов в продукцию растениеводства используются:

а) коэффициенты перехода из почвы в урожай в расчете на 1 Ки/км², которые дифференцированы в зависимости от типа и гранулометрического состава почв, содержания обменного калия и реакции почвенной среды (см. прил. 7 и 8);

б) результаты агрохимического и радиологического обследований почв.

Определение уровня содержания радионуклидов с использованием коэффициента пропорциональности накопления в растениеводческой продукции. Для прогноза уровня загрязнения конкретной культуры радионуклидами ¹³⁷Cs или ⁹⁰Sr необходимо коэффициенты, рассчитанные для плотности загрязнения почв 1 Ки/км² (37 кБк/м²) умножить на величину плотности фактической загрязненности почвы:

$$A = B \times K \times 37,$$

где А – уровень загрязненности растениеводческой продукции, Бк/кг;

В – плотность загрязнения почвы, Ки/км²;

К – коэффициент пропорциональности (удельная радиоактивность 1 кг продукции при плотности загрязнения почв 1 Ки/км², данные приложения), нКи/кг;

37 – коэффициент для перевода нКи в Бк.

Сопоставляя полученную величину с нормативной величиной, определяем возможность использования корма.

Например: необходимо определить уровень радиоактивной загрязненности сена многолетнего злаково-бобового (по ¹³⁷Cs) на дерново-подзолистой суглинистой почве. Плотность загрязнения почвы по данным радиохимических исследований равна 15 Ки/км² при содержании обменного калия 150 мг/кг почвы.

По данным приложения б коэффициент пропорциональности равен 0,57 нКи/кг.

Решение: $A = 15 \text{ Ки/км}^2 \times 0,57 \times 37 = 316 \text{ Бк/кг}$.

Аналогично делают расчеты для прогноза содержания ⁹⁰Sr в сельскохозяйственных культурах с учетом уровня кислотности почв (приложение).

Метод определения накопления ⁹⁰Sr в растениях с помощью комплексного показателя (КП) В.М. Клечковского. Для определения содержания ⁹⁰Sr в растениях пользуются формулой:

$$A = \text{КП} \times a / c,$$

где А – содержание ⁹⁰Sr в почве, с. ед. (стронциевые единицы);

с – содержание Са на 100 г почвы, мг-экв.;

а – плотность загрязнения почвы радионуклидом ^{90}Sr , мКи/км² или Бк/м²;

КП – комплексный показатель по В.М. Ключковскому (табл. 59).

Таблица 64 – Величина комплексного показателя (КП) для сельскохозяйственной продукции

| Вид продукции | Значение КП | |
|----------------------------|---------------|---------|
| | экстремальные | средние |
| Сено: | | |
| естественных лугов | 30-200 | 60 |
| клевера | 13-16 | 15 |
| люцерны | 11-14 | 12 |
| Силосные культуры и солома | 9-16 | 14 |
| Зерно злаковых и бобовых | 7-11 | 9 |

Одна стронциевая единица – отношение концентрации ^{90}Sr (пКи/кг продукции) к концентрации в нем кальция (г/кг). При поверхностном загрязнении естественных кормовых угодий ^{90}Sr , равном 1 мКи/км² (37 Бк/м²) 1 кг сухого вещества естественных трав содержит 4,9 с.е., сеяных злаковых трав – 1,5 с.е., свеклы – 1,7 с.е., клубней картофеля – 1,56 с.е., а в 1 кг зерна пшеницы – 0,8 с.е. ^{90}Sr .

Например: необходимо дать прогноз концентрации ^{90}Sr в сене клевера, если известно, что содержание ^{90}Sr в почве равно 40 мКи/км² (1480 Бк/м²), а содержание обменного Са – 10 мг-экв./100 г почвы.

Содержание ^{90}Sr в растениях составит:

$$A = 15 \times (40 \text{ мКи/км}^2 : 10 \text{ мг-экв.}) = 60 \text{ с.е.}$$

Этот метод прогноза вполне удовлетворителен на пахотных землях с содержанием обменного Са от 4 до 25 мг-экв/100 г почвы.

Определение содержания ^{90}Sr в растениеводческой продукции методом проростков (по Б.Н. Анненкову и Е.В. Юдинцевой). Берутся образцы почв с глубины пахотного слоя конкретного поля, тщательно перемешивают, затем на таком усредненном образце высевают прорашенные семена. Через 20 дней надземную массу растений срезают на уровне почвы, промывают проточной водой, высушивают и в воздушно-сухом материале определяют содержание радионуклидов радиохимическим методом.

Таблица 65 – Коэффициенты пересчета содержания радионуклидов в 20-дневных растениях для прогноза загрязненности урожая

| ¹³⁷ Cs | | | ⁹⁰ Sr | | |
|-------------------|---------------|---------------|------------------|---------------|---------------|
| Культура | Зерно, клубни | Солома, ботва | Культура | Зерно, клубни | Солома, ботва |
| Овес | 0,20 | 0,45 | Овес | 0,050 | 0,70 |
| Ячмень | 0,20 | 0,50 | Ячмень | 0,035 | 0,50 |
| Яровая пшеница | 0,22 | 0,46 | Озимая пшеница | 0,060 | 0,60 |
| Гречиха | 0,21 | 0,39 | Яровая пшеница | 0,045 | 0,70 |
| Вика | 0,35 | 0,70 | Горох | 0,040 | 1,25 |
| Картофель | 0,56 | 0,70 | Картофель | 0,035 | 0,70 |

Примечание. Коэффициенты пересчета приведены в расчете на воздушно-сухую массу урожая.

4.1.1.5.2. Прогноз поступления радионуклидов в продукцию животноводства. Определяющим фактором для прогноза накопления радионуклидов в продукции животноводства является степень загрязнения кормов.

С практической точки зрения важно, что корма, выращенные на территории с одинаковой плотностью загрязнения, в расчете на 1 кормовую единицу накапливают различное количество радионуклидов (табл. 66).

Большое значение имеют биологическая доступность и способность радионуклидов мигрировать по пищевым цепочкам, она характеризуется коэффициентами их перехода в корма и продукцию животноводства. Накопление радионуклидов в организме животных и получаемой от них продукции зависит также от вида, возраста, физиологического состояния животных, их продуктивности, типа рациона.

Прогноз содержания радионуклидов в продукции животноводства рассчитывается по формуле:

$$A_{\text{прод.}} = A_{\text{рац.}} \times K_{\text{пер.}} : 100,$$

где $A_{\text{прод.}}$ – содержание радионуклидов в продукции, Бк/кг;

$A_{\text{рац.}}$ – активность радионуклидов в суточном рационе;

K – коэффициент перехода радионуклидов из рациона в 1 л (кг) продукции, в % от суточного поступления.

Таблица 66 – Ориентировочные данные о загрязненности кормов РВ
в расчете на 1 к. ед., усл. ед.

| Вид корма | К. ед. | Содержится в 1 к. ед. | |
|-----------------------------|--------|-----------------------|-------------------|
| | | ⁹⁰ Sr | ¹³⁷ Cs |
| Овес: зерно | 1,0 | 1 усл. ед. | 1 усл. ед. |
| солома | 0,31 | 16 | 6,3 |
| Ячмень: зерно | 1,13 | 0,9 | 0,9 |
| солома | 0,33 | 15,0 | 6,0 |
| Пшеница яровая: зерно | 1,18 | 0,6 | 0,8 |
| солома | 0,20 | 18,7 | 10,0 |
| Картофель | 0,31 | 0,8 | 5,4 |
| Свекла кормовая | 0,12 | 6,2 | 20,8 |
| Кукуруза на силос | 0,14 | 21,5 | 4,8 |
| Люцерна | 0,23 | 27,5 | 15,1 |
| Клевер | 0,20 | 41,2 | 16,5 |
| Трава луговая | 0,28 | 19,0 | 47,6 |
| Сено естественных сенокосов | 0,47 | 31,7 | 67,4 |
| Сено с окультуренных лугов | 0,50 | 15,0 | 46,6 |

Таблица 67 – Коэффициенты перехода радионуклидов из суточного
рациона в продукцию животноводства (% на 1 кг продукта)

| Вид продукции | Радионуклиды | |
|-------------------------------|-------------------|------------------|
| | ¹³⁷ Cs | ⁹⁰ Sr |
| Молоко коровье (в ср. за год) | 0,62 | 0,14 |
| стойловый период | 0,48 | 0,14 |
| пастбищный период | 0,74 | 0,14 |
| Говядина | 4 | 0,04 |
| Свинина | 25 | 0,10 |
| Баранина | 15 | 0,10 |
| Мясо кур | 45,0 | 0,20 |
| Яйцо | 3,5 | 3,20 |

С увеличением содержания клетчатки в рационе от 1,3 до 3,1 кг/сут. уменьшается коэффициент перехода ¹³⁷Cs от 0,9 до 0,6. В условиях содержания коров на малопродуктивном естественном пастбище с изреженным травостоем отмечается многократное повышение перехода радиоцезия в молоко.

Переход ^{90}Sr для взрослых жвачных животных из почвы в концентратный рацион в среднем составляет 0,8, то в сеной рацион – 1,5-2,5. Содержание ^{90}Sr в мышцах животных, пользующихся концентратным рационом, в среднем 4 раза меньше, чем у животных, получающих сеной рацион (см. табл. 68).

Таблица 68 – Коэффициент накопления ^{137}Cs в организме животных в зависимости от их возраста и массы тела, % суточного поступления в расчете на 1 кг живой массы

| Крупный рогатый скот | | | Свиньи | | |
|----------------------|-----------|------------------------|---------------|-----------|------------------------|
| возраст, мес. | масса, кг | коэффициент накопления | возраст, мес. | масса, кг | коэффициент накопления |
| 2-3 | 100 | 26,0 | 2 | 15 | 60,0 |
| 6-9 | 200 | 6,5 | 4 | 40 | 25,0 |
| 12-15 | 300 | 3,5 | 5 | 50 | 20,0 |
| 15-16 | 400 | 3,0 | 6 | 70 | 15,0 |
| Взрослые | 500 | 2,5 | 7 | 90 | 12,0 |
| Взрослые | 600 | 2,0 | 8 | 110 | 10,0 |

В Республике Беларусь на территориях, загрязненных радионуклидами в результате аварии на Чернобыльской АЭС, разработаны «Республиканские допустимые уровни загрязнения продуктов, кормов радиоактивными веществами (РДУ-96)», которые предусматривают снижение среднегодовой эффективной дозы внутреннего облучения человека за счет снижения концентрации радионуклидов цезия и стронция до величины, не превышающей 1 мЗв.

На территориях при плотности загрязнения по ^{137}Cs 1-40 Ки/км², а по ^{90}Sr 0,15-3,0 Ки/км² разрешена хозяйственная деятельность. В соответствии с требованиями РДУ, содержание ^{137}Cs в молоке и цельномолочной продукции для пищевых целей должно быть не более 111 Бк/кг, ^{90}Sr – 3,7 Бк/кг, а в суточном рационе дойных коров не должно превышать 11,1 Бк/кг и 2,6 Бк/кг соответственно (табл. 69).

Молоко сырье для промышленной переработки можно получать при плотности загрязнения супесчаных почв ^{90}Sr до 1,2 и 2,8 Ки/км² на естественных и культурных пастбищах. На перерабатывающие предприятия Республики Беларусь допускается прием молока с содержанием ^{137}Cs до 370 Бк/кг и ^{90}Sr – до 18 Бк/л. Для производства такого молока-сырья для переработки содержание ^{137}Cs в суточном рационе не должно превышать 37 кБк, ^{90}Sr – 12,9 кБк. Такой уровень обеспечивается при удельной радиоактивности кормов, представленных в таблице 69.

Таблица 69 – РДУ (Белоруссия) содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в сельскохозяйственном сырье и кормах (Бк/кг), предназначенных для получения молока цельного, молока-сырья, мяса крупного рогатого скота

| Корма | ^{137}Cs | | | ^{90}Sr | |
|--|-------------------|--------------|------------------------------|------------------|--------------|
| | молоко цельное | молоко сырье | мясо (заключительный откорм) | молоко цельное | молоко сырье |
| Сено | 1480 | 1850 | 1480 | 260 | 1300 |
| Солома | 370 | 900 | 900 | 185 | 900 |
| Сенаж | 600 | 900 | 600 | 100 | 500 |
| Силос | 300 | 600 | 300 | 50 | 250 |
| Корнеплоды | 200 | 600 | 370 | 37 | 185 |
| Зерно, фураж | 200 | 600 | 600 | 100 | 500 |
| Зеленая масса | 185 | 600 | 300 | 37 | 185 |
| Хвоя, травяная мука, пивная дробина, жом, патока | 1000 | – | – | – | – |
| Барда | 1000 | – | – | – | – |
| Мезга, молочные продукты (обрат) | 740 | – | – | – | – |
| Дрожжи кормовые | 370 | – | – | – | – |
| Мясокостная мука | 1000 | – | – | – | – |
| Прочие | 1000 | – | – | – | – |

По уровню накопления ^{90}Sr в организме мясопродуктивные животные располагаются в следующем порядке: олени – овцы – крупный рогатый скот – свиньи – куры (в убывающей последовательности).

4.2. ПРЕСНОВОДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ

Бассейны континентов особенно уязвимы в отношении загрязнений антропогенного генезиса, в том числе и радиоактивных, поскольку в них слабо работает фактор разбавления из-за небольшого объема воды. Положение пресноводных водоемов усугубляется еще и тем, что все нечистоты, производимые человеком, попадают в первую очередь в них. Вследствие этих причин крайне важно изучить закономерности миграции радионуклидов, попавших в водные бассейны суши, и воздействие их на гидробионты.

Обычно пресноводные растения и животные обогащены радионуклидами, по сравнению с водой, в которой они обитают. Отношение содержания радионуклида в организме к содержанию его в воде называется *коэффициентом накопления или дискриминации* (КН или КД). Установлено, что последний зависит от химической природы радионуклида, видового состава водных обитателей, концентрации в воде различных солей, рН водной среды, ее температуры, освещенности водного бассейна и других факторов.

4.2.1. Накопление радионуклидов пресноводными растениями

Эксперименты показывают, что наиболее интенсивно накапливаются в водных растениях следующие элементы: фосфор, железо, цинк, кобальт, иттрий, цирконий, ниобий, церий, ртуть. Несколько медленнее концентрируются в растениях сера, хром, кальций, стронций, рубидий, цезий. Особенно сильно накапливают стронций харовые водоросли.

Коэффициенты накопления радионуклидов в растениях можно значительно снизить (на целый порядок), если внести в воду стабильные изотопы, имеющие с радиоизотопами геохимическое родство. Например, КН стронция-90 в пресноводных растениях обратно пропорционален содержанию в воде кальция и магния. В такой же зависимости от калия находится второй важный искусственный радионуклид – цезий-137.

В Институте экологии растений и животных УО РАН проводились исследования влияния рН водной среды, температуры и освещенности водного бассейна на накопление радионуклидов харовыми водорослями (Куликов, Чеботина, 1988; Чеботина, Куликов, 1998). Установлено, что КН радионуклидов водорослями с увеличением рН воды снижается. Это связано с разными причинами. Накопление кобальта и железа снижается в связи с появлением в щелочной среде коллоидных форм этих элементов, плохо усваиваемых растениями. Радиоактивный стронций при рН = 7-9 выпадает в осадок в виде карбоната и не может усваиваться растениями. Однако карбонат стронция осаждается на поверхности растений, что создает ложное впечатление об увеличении его концентрации в пресноводной флоре при подщелачивании водной среды. Накопление цезия не зависит от кислотно-щелочных свойств воды.

В накоплении некоторых радионуклидов большую роль играет свет. Установлено, что КН кобальта, стронция и цезия с увеличением осве-

ценности возрастает. Харовая водоросль на свету накапливает больше этих радионуклидов, чем в темноте. Элодея при повышенной освещенности интенсивнее накапливает лишь стронций (КН увеличивается в 2 раза). Накопление пресноводными растениями железа, иттрия и церия не зависит от освещенности водоема. Количество поглощенных растениями радионуклидов зависит и от температуры воды. Харовая водоросль при повышении температуры до 28 °С предпочтительнее поглощает стронций (КН возрастает в 1,5 раза), а роголистник – цезий. Элодея в теплой воде концентрирует оба эти радионуклида (КН увеличивается в 1,5-3 раза).

Таким образом, свет и температура влияют на поглощение радионуклидов водными растениями, но природа этих химических элементов и индивидуальные особенности растений вносят в это правило свои поправки.

Концентрация химических элементов, в том числе и радиоизотопов, в зимней воде возрастает в несколько раз, по сравнению с летним периодом, что связано с вымораживанием воды зимой. Накопление же радионуклидов водными растениями имеет противоположную тенденцию. Это объясняется неодинаковой степенью биологической активности растений в разное время года.

Известно, что каждый континентальный водоем характеризуется определенным сочетанием физико-химических и биологических показателей. В зависимости от этого пресноводные бассейны подразделяются на *олиготрофные, мезотрофные, эвтрофные и дистрофные*. Исследования показали, что в ряду олиготрофные – дистрофные водоемы КН стронция и цезия в растениях возрастает (Куликов, Чеботина, 1988).

Обогащенные радионуклидами водные растения в конце вегетационного периода отмирают и формируют донные отложения. При этом в самой отмершей органике не происходит значительной концентрации радиоактивных элементов. Однако многие радионуклиды могут мигрировать в илстую фракцию, постепенно накапливаясь в ней. Значительная часть стронция, как наиболее подвижного радионуклида, при разложении растений переходит обратно в водную среду.

4.2.2. Накопление радионуклидов пресноводными животными

Радионуклиды накапливаются не только растениями континентальных водоемов, но и пресноводными животными. Продвижение радионуклидов сопровождается увеличением их концентрации в каждом

звене цепи. Схема пищевых цепочек и коэффициенты накопления в сообществе пресноводного водоема представлены на рисунке 17.

В икре пресноводных рыб КН их может достигать десятков единиц. По степени концентрации в икре ряд искусственных радионуклидов выглядит так: $Y > Ce > Zr > Cs = Sr$. Интересен тот факт, что личинки, выклюнувшиеся из радиоактивной икры, содержат крайне мало радионуклидов, порой их количество даже меньше, чем в окружающей воде. Это свидетельствует о защитной роли оболочек икры, которая поглощает большую часть радионуклидов, заимствованных из водной среды.

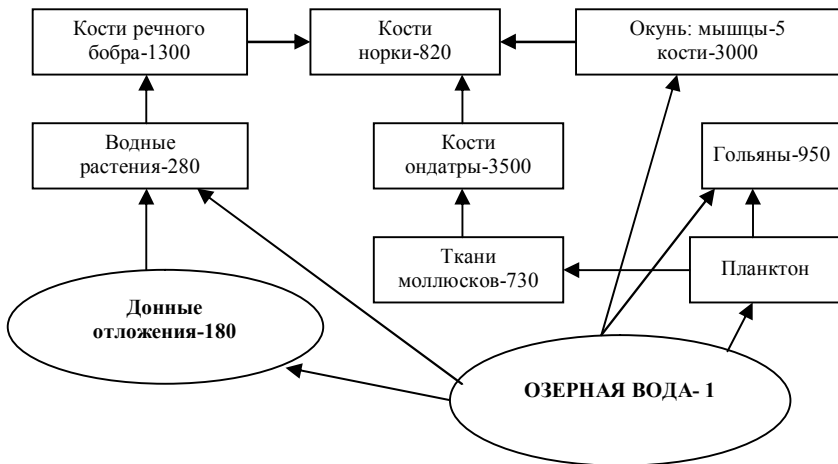


Рис. 17. Пищевые связи и коэффициенты накопления в сообществе пресноводного водоема

Накопление радионуклидов резко возрастает через 6-7 дней, когда личинки переходят к самостоятельному питанию. Причем, хищные рыбы (щука, окунь) накапливают радиоактивный цезий быстрее, чем растительноядные (лещ, карп). Концентрация стронция не подчиняется этой закономерности. Например, КН стронция одинаков у щуки и карпа (табл. 70).

Известно, что радионуклиды неравномерно распределяются в организме рыб. Так, коэффициент накопления стронция в костных тканях и чешуе рыб колеблется от 300 до 900, а в плавниках достигает 2500, тогда как в мягких тканях содержание его на 3 порядка ниже. Для цезия характерно прямо противоположное распределение. Больше всего этого радиоизотопа в мышцах и внутренних органах (табл. 71).

Таблица 70 – Коэффициенты накопления (КН) радионуклидов в организме пресноводных рыб в расчете на сырую массу тушки без внутренностей (Куликов и др., 1988)

| Виды рыб | Коэффициент накопления (КН) | |
|----------|-----------------------------|-------------------|
| | ⁹⁰ Sr | ¹³⁷ Cs |
| Щука | 160 | 920 |
| Окунь | 310 | 1465 |
| Сиг | 240 | 640 |
| Карась | 600 | 520 |
| Линь | 310 | 250 |
| Карп | 155 | 100 |

Таблица 71 – Распределение цезия-137 по органам и тканям рыб (сырая масса, по А.И. Ильенко, Т.П. Крапивко, 1989)

| Органы и ткани | Плотва | | Окунь | | Щука | |
|----------------|---------|------|---------|------|---------|------|
| | мкКи/кг | % | мкКи/кг | % | мкКи/кг | % |
| Скелет | 1,5 | 14,9 | 2,3 | 5,5 | 3,1 | 86 |
| Чешуя | 0,9 | 8,9 | 0,5 | 1,2 | 0,6 | 1,7 |
| Жабры | 0,8 | 7,9 | 2,4 | 5,7 | 1,9 | 5,2 |
| Плавники | 0,3 | 2,9 | 1,2 | 2,9 | 1,5 | 4,1 |
| Печень | 0,8 | 7,9 | 6,3 | 14,9 | 4,5 | 12,4 |
| Селезенка | 1,8 | 17,8 | 5,4 | 12,8 | 4,9 | 13,5 |
| Сердце | 1,7 | 16,9 | 7,2 | 17,0 | 8,1 | 22,3 |
| Мышцы | 1,9 | 18,9 | 9,0 | 21,3 | 4,9 | 13,5 |
| Кишечник | – | – | 5,8 | 15,8 | 4,3 | 12,0 |
| Икра | 0,4 | 3,9 | 2,2 | 5,2 | 2,1 | 5,7 |

Хотя радионуклиды могут проникать в тело рыб через его наружные покровы, все же основным источником поступления радиоизотопов в организм является пища.

4.3. ПОВЕДЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ НА ТЕРРИТОРИИ РАЗЛИЧНЫХ ПРИРОДНЫХ ЗОН РОССИИ

Лесная зона

Радионуклиды, оседающие из атмосферы на лесные ландшафты, не сразу попадают в почву. До 90% радиоактивной пыли первоначально задерживается листьями и хвоей деревьев и кустарников. В зависимости от типа леса и количества выпадающих атмосферных осадков радиоактивные частицы могут находиться в древесном ярусе в течение 2-4 лет, постепенно перемещаясь с помощью дождей и листопада в лесную подстилку. Некоторое время после ядерного инцидента радионуклиды перемещаются в лесном биоценозе по упрощенной схеме, когда радиоактивные вещества попадают непосредственно в организм животных за счет слизывания их с поверхности листьев и запыленной травы. Но уже, начиная с первого года, все большую силу набирает основное звено миграции радионуклидов в сложной системе биогеноценоза: почва – почвенный раствор – растение – травоядные животные – хищники.

Но прежде чем попасть в глубокие горизонты почвы, радионуклиды длительное время задерживаются в лесной подстилке, которая является питательной средой для грибов и мохового комплекса. В лесной подстилке находится грибной мицелий, поэтому радионуклидов (особенно цезия) особенно много накапливается в ножках грибов, где его концентрация может быть в 100 и 1000 раз больше, чем в обычных травяных растениях. Однако, основным фактором накопления радионуклидов в грибах является их природа и видовая принадлежность. Не все грибы одинаково концентрируют радионуклиды. К активным накопителям радиоцезия относятся: моховик, масленок, волнушка, груздь, сыроежка. В меньшей степени концентрируют цезий белый гриб, опенок, подосиновик и дождевик. С увеличением влажности лесной подстилки степень насыщения грибов радионуклидами возрастает.

Благодаря грибам, мхам и травам радионуклиды надолго задерживаются в лесной подстилке и в верхних горизонтах почвенного покрова лесов. Даже через 36 лет после Кыштымской аварии большая часть радионуклидов сохранилась в верхнем слое серых лесных почв в интервале 0-2 см.

Заглублению радионуклидов способствуют дождевые черви, мелкие роющие лесные животные (землеройки, кроты, мыши) и особенно кабаны, перекапывающие значительные площади лесных угодий.

Горизонтальной миграции радионуклидов способствуют позвоночные животные, способные к концентрированию отдельных химических элементов в своем теле. Особенно это касается стронция-90, который прочно закрепляется в костях, где коэффициент накопления этого элемента по отношению к пище животных может достигать 100% и более.

По данным исследований, проведенных в лаборатории «Биоэкос» Марийского государственного технического университета, г. Йошкар-Ола (Е.А. Гончаров, О.В. Малюта, Д.Е. Конаков, С.Г. Васин, Л.В. Александрова) на территории Поволжского «Чернобыльского следа» (в Республике Мордовия, Ульяновской, Пензенской области) уровень загрязнения почвы на этих территориях радионуклидами составляет от 1 до 5 Ки/кг. Радиационный фон в районе исследуемых озер варьировал в пределах от 11-21 мкР/ч, но в среднем не превышал естественный.

Гамма-спектрометрический анализ проб донных отложений и почвы показал наличие радионуклидов цезия, радия, калия.

Таблица 72 – Содержание техногенных и естественных радионуклидов в донных отложениях и почве прибрежных территорий лесных озер

| Радиэкологические параметры | Удельная активность радионуклида, Бк/кг | | | |
|---------------------------------------|---|-------------------|-------------------|-----------------|
| | ¹³⁷ Cs | ²²⁶ Ra | ²³² Th | ⁴⁰ K |
| <i>оз. Юдовое (Инзенский р-н)</i> | | | | |
| Донные отложения | 153,8 | 18,4 | 0 | 51,0 |
| Почва | 341,0 | 20,4 | 0 | 210,0 |
| <i>оз. Меловое (Инзенский р-н)</i> | | | | |
| Донные отложения | 137,0 | 21,6 | 0 | 80,0 |
| Почва | 91,9 | 17,9 | 0 | 220,0 |
| <i>оз. Аксаковское (Майнский р-н)</i> | | | | |
| Донные отложения | 967,0 | 0 | 0 | 40,0 |
| Почва | 338,0 | 44,7 | 0 | 300,0 |

Анализ полученных данных показал, что удельная активность техногенных радионуклидов (Cs-137) варьирует в пределах от 91,9 до 341,0 Бк/кг в почве и от 153,8 до 967,0 Бк/кг в донных отложениях соответственно. В данных условиях гидробиота исследуемых водоемов подвержена влиянию малофонового ионизирующего излучения.

Содержание ¹³⁷Cs в структурных элементах древесных пород приведено в таблице 73.

Таблица 73 – Содержание ^{137}Cs в структурных элементах основных древесных пород

| Порода | Содержание ^{137}Cs (Бк/кг) | | | |
|---|--------------------------------------|------|-----------|---------------|
| | Кора | Луб | Древесина | Листва (хвоя) |
| <i>Республика Мордовия, Чамзинский лесхоз, Наченальское лесничество; национальный парк «Смольный»</i> | | | | |
| Дуб черешчатый (<i>Quercus robur</i> L.) | 129,2 | 14,7 | < 3* | 91 |
| Клен остролистный (<i>Acer platanoides</i> L.) | 25,5 | 17,4 | < 3* | 17,2 |
| Ясень обыкновенный (<i>Fraxinus excelsior</i>) | 38,2 | 22,0 | < 3* | 12,4 |
| Сосна обыкновенная (<i>Pinus silvestris</i>) | 39,5 | 22,5 | 12,1 | 51,3 |
| Береза повислая (<i>Betula pendula</i> Roth.) | 35,4 | 23,8 | 14,5 | 74,5 |
| Осина (<i>Populus tremula</i> L.) | 32,5 | 72,5 | 13,3 | 69,4 |
| Липа мелколистная (<i>Tilia cordata</i> Mill.) | 69,4 | 31,4 | 19,6 | 107,9 |
| Ольха черная (<i>Alnus glutinosa</i> L.) | 81,5 | – | 17,9 | 56,2 |
| <i>Ульяновская область, Инзенский, Карсунский лесхозы</i> | | | | |
| Дуб черешчатый (<i>Quercus robur</i> L.) | 82,7 | 97,8 | 6,3 | 48,1 |
| Сосна обыкновенная (<i>Pinus silvestris</i> L.) | 35,6 | 4,6 | < 3 | 4,0 |
| Осина (<i>Populus tremula</i> L.) | 67,3 | 15,0 | < 3 | 34,9 |
| Береза повислая (<i>Betula pendula</i> Roth.) | 20,9 | 15,2 | < 3 | 18,6 |
| Сосна обыкновенная (<i>Pinus silvestris</i>) | 8,5 | 5,4 | < 3 | 36,0 |

Примечание. < 3* – порог чувствительности прибора (УСК «Гамма-Плюс»).

Исследование различных древесных пород на содержание радионуклидов показало существенную разницу между ними по способности накапливать в себе Cs-137. По уровню концентрации радионуклидов в древесине (при одинаковой плотности загрязнения почвы и в одних и тех же лесорастительных условиях) лесообразующие породы в порядке убывания можно расположить в следующий ряд: широколиственные, мелколиственные и хвойные породы. Максимальное содержание радионуклидов наблюдается у *Quercus robur* L., что объясняется, по-видимому, повышенной требовательностью к калийному питанию (Журбицкий, 1963). Следует заметить, что наибольшее содержание Cs-137 у всех видов обнаружено в коре, особенно в комлевой части ствола.

Сравнение полученных результатов с допустимыми уровнями СП 2.6.1.759-99 (ДУ содержания Cs-137 в лесоматериалах – 1100 Бк/кг; в топливной древесине – 1400 Бк/кг, в коре – 3100 Бк/кг, в бересте –

2200 Бк/кг, в древесной зелени – 600 Бк/кг) позволяет сделать вывод о возможности использования древесины для производственных и хозяйственных целей.

Наибольшее содержание Cs-137 характерно для видов-концентра-торов: мхов (*Pleurozium Schereberi* L., *Dicranum polysetum* S w., *Sphagnum* sp.L., *Polytrichum commune* Hedw.), папоротников (*Pteris aquiline* (L.) Kuhn, *Drypteris filix mas* (L.) Schott) и грибов (*Russula* sp. Fr., *Lactarius rufus* (Scop.: Fr.) Fr., *Suillus luteus* (Fr.) S.F. Gray, *Boletus edulis* Bull.).

Таблица 74 – Содержание ¹³⁷Cs в живом надпочвенном покрове

| Живой надпочвенный покров | Удельная активность Cs-137, Бк/кг |
|---|-----------------------------------|
| <i>Республика Мордовия</i> | |
| Дикран многоножковый (<i>Dicranwn polysetum</i> Sw.) | 683,7 |
| Плевроций Шребера (<i>Pleurozium schereberi</i> (Brid.) Mitt.) | 704,1 |
| Белый гриб (<i>Boletus edulis</i> Bull.) | 7345,6 |
| Лисичка настоящая (<i>Cantharellus cibarius</i> Fr.) | 2365,8 |
| Ландыш майский (<i>Convollaria majalis</i> L.) | 296,5 |
| Щитовник мужской (<i>Drypteris filix mas</i> (L.) Schott) | 817,4 |
| Малина обыкновенная (плоды) (<i>Rubusidaeus</i> L.) | 30,5 |
| Сыроежка (<i>Russula</i> sp. Fr.) | 4939,2 |
| <i>Ульяновская область</i> | |
| Ландыш майский (<i>Convollaria majalis</i> L.) | 95,0 |
| Щитовник мужской (<i>Drypteris filix mas</i> (L.) Schott) | 490,4 |
| Плевроций Шребера (<i>Pleurozium schereberi</i> (Brid.) Mitt.) | 571,0 |
| Сыроежка (<i>Russula</i> sp. Fr.) | 2462,0 |
| <i>Пензенская область</i> | |
| Брусника (кустарн.) (<i>Vaccinium vitis- idaea</i> L.) | 213,0 |
| Черника (кустарн.) (<i>Vaccinum myrtillus</i> L.) | 311,0 |
| Плаун булавовидный (<i>Lycopodium annotinum</i> L.) | 2260,0 |
| Плевроций Шребера (<i>Pleurozium schereberi</i> (Brid.) Mitt.) | 1192,0 |
| Дикран многоножковый (<i>Dicranwn polysetum</i> S w.) | 1001,0 |
| Масленок (<i>Suillus luteus</i> (Fr.) S.F. Gray) | 23360,0 |
| Брусника (кустарн.) (<i>Vaccinium vitis- idaea</i> L.) | 727,0 |
| Ландыш майский (<i>Convollaria majalis</i> L.) | 554,0 |
| Чистотел большой (<i>Chelidonium majus</i> L.) | 1244,0 |

Продолжение табл. 74

| Живой надпочвенный покров | Удельная активность Cs-137, Бк/кг |
|---|-----------------------------------|
| Черника (кустарн.) (<i>Vaccinium myrtillus</i> L.) | 1 209,0 |
| Рябина (плоды) (<i>Sorbus aucuparia</i> L.) | 281,6 |
| Брусника (ягоды) (<i>Vaccinium vitis-idaea</i> L.) | 1 285,0 |
| Черника (ягоды) (<i>Vaccinium myrtillus</i> L.) | 2 247,0 |
| Орляк обыкновенный (<i>Pteris aquilina</i> (L.) Kuhn) | 3 104,0 |
| Щитовник мужской (<i>Dryopteris filix mas</i> (L.) Schott) | 1 095,0 |
| Кукушкин лен (<i>Polytrichum commune</i> Hedw.) | 1 492,0 |
| Сфагнум (<i>Sphagnum</i> sp.L.) | 1 064,0 |
| Горькушка (<i>Lactarius rufus</i> (Scop.: Fr.) Fr.) | 14 070,0 |
| Сыроежка (<i>Russula</i> sp. Fr.) | 17 440,0 |

При сравнении полученных результатов с нормативами СанПиН 2.3.2.1078-01 оказалось, что содержание Cs-137 у значительного числа видов, приведенных в таблице не соответствует санитарным требованиям. Так, при плотности загрязнения почвы Cs-137 1-5 Ки/км² содержание данного радионуклида в маслятах, белых грибах, сыроежках и горькушках может превышать норматив (для сухих грибов 2 500 Бк/кг) в 2-9 раз, в ягодах черники и брусники – в 4-7 раза (норматив 300 Бк/кг), в лекарственном сырье (черничный и брусничный лист, а также листья ландыша майского, стебли и листья плауна булавовидного, корневища щитовника мужского и орляка обыкновенного) – в 1,5 и более раза.

Детальный анализ полученных данных позволил сделать следующий вывод: повышенный переход Cs-137 из почвы в ресурсы побочного лесопользования (грибы, ягоды, лекарственные растения) наблюдается, с одной стороны, в относительно более бедных почвенных условиях, с другой – в условиях повышенного почвенного увлажнения. На переувлажненных бедных почвах (песчаные почвы в понижениях, кромки болот) переход Cs-137 максимален – такие условия характерны для объектов исследования, расположенных в Лопуховском лесничестве Ахунского лесхоза Пензенской области (табл. 74).

Таким образом, анализ степени накопления Cs-137 в лесных биоценозах Среднего Поволжья показал незначительное содержание радионуклидов в древесных породах, особенно в древесине, что делает возможным ее хозяйственное использование. В отношении ресурсов побочного пользования однозначного заключения нет: в определенных

условиях содержание Cs-137 может превышать установленные нормативы и представлять угрозу для здоровья населения.

Радиоэкологическая обстановка в Республике Марий Эл по территории Юринского района исследовалась учеными Марийского государственного университета (Леухин А.В., Ситников Г.А., Сазонов А.Р., Андреев А.М., 2003-2004). Было выявлено, что удельная радиоактивность проб почвы по ^{137}Cs варьировала в пределах от $9,5 \pm 3,7$ Бк/кг до $386 \pm 12,3$ Бк/кг (от 0,037 до $1,5$ Ки/км²), т.е. загрязнение территории носит пятнистый характер. Удельная активность проб почвы по ^{90}Sr составляла от $2,0 \pm 0,5$ Бк/кг до $89,0 \pm 3,7$ Бк/кг (0,008-0,35 Ки/км²). Содержание ^{40}K в пробах почв колебалось от $0,0 \pm 12,9$ Бк/кг до 561 ± 131 Бк/кг, это обуславливается разным уровнем применения калийных удобрений.

Степная зона

Поведение радиоизотопов в степных ландшафтах изучено наиболее полно, в связи с многочисленными испытаниями различных взрывных ядерных устройств на Семипалатинском полигоне в Казахстане. Рассмотрим этот вопрос на примере двух опытных подземных ядерных взрывов с выбросом грунта.

Первый взрыв был произведен 15 января 1965 г. на площадке «Чаган» Семипалатинского ядерного полигона. Ядерное устройство мощностью в 140 килотонн тротилового эквивалента было взорвано в скважине 1004 для создания искусственного водохранилища. Пылевое облако диаметром 5 км поднялось на высоту 750 м и двинулось сначала в северном, а затем в северо-восточном направлениях, образовав радиоактивный след. Через 15 минут экспозиционная доза гамма-излучения в облаке составила 180 Р/ч. Площадь радиоактивного загрязнения на следе составила в июне 1965 г. 140, в 1966 г. – 50, в 1967 г. – 17 км².

В первый год после взрыва наблюдался высокий уровень поверхностного загрязнения растительности и почвы ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{65}Zn , ^{54}Mn , ^{22}Na , ^{60}Co , ^{106}Ru и ^{90}Sr . В последующие годы постепенно возростала доля корневого загрязнения растений в результате проникновения радиоактивных веществ вглубь почвы. Соответственно этому радиоизотопы перемещались внутрь растений через питательные вещества почвы.

Наиболее сильно пострадали от радиации жители пос. Сарапан, расположенного в 13 км от эпицентра взрыва. Жители этого населенного пункта занимаются молочно-мясным скотоводством. Большую часть

года скот держат на пастбищах, что отражалось на степени радиоактивного загрязнения молока, мяса и шерсти животных.

Дополнительным источником поступления радионуклидов в организм людей и домашнего скота являлся снег. Из-за недостатка воды в зимнее время жители этого района готовят ее из снега, который в эти годы был покрыт радиоактивной пылью. В первые годы после взрыва общая концентрация радионуклидов в молоке достигала 5000 Бк/л, а концентрация Cs-137 в конском мясе – 10 800 Бк/кг. Концентрация Sr-90 в костях лошадей достигла максимума через 2 года, а затем постепенно стала приходить в норму. Постепенно радионуклиды уходили в глубокие горизонты почвы и экспозиционная доза на местности в 1967 году приблизилась к фоновой. Однако, начиная с конца 1966 года усилилось загрязнение воды колодцев тритием, откуда последний поступал в организм людей (в первую очередь детей) через молоко и мясо.

4.4. РАДИАЦИОННОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ РЕГИОНОВ РОССИИ

Арктические регионы Европейской части России

Радиационное загрязнение этого сектора обусловлено четырьмя главными факторами: а) испытанием ядерного оружия на полигоне Новая Земля; б) последствиями эксплуатации кораблей Северного флота и гражданских судов с атомными двигателями; в) поступлением радионуклидов из Великобритании через воды северных морей; г) функционированием Кольской АЭС.

Наземные ядерные взрывы на Новой Земле проводились с 1955 по 1963 годы, а затем, вплоть до 1990 года, ядерное и термоядерное оружие испытывалось под землей. В результате в 50-е–60-е годы в атмосферу поступило огромное количество радиоактивного цезия, стронция, плутония и других долгоживущих радионуклидов. Через высокие слои атмосферы и стратосферу радиоактивная пыль перемещалась на большие расстояния и выпадала в виде радиоактивных осадков. Так, летом 1962 г. на следующий день после очередного испытания ядерной бомбы, радиоактивный фон в горах Полярного Урала повысился в 20-30 раз и достиг 600-1200 мкР/ч. В десятки и даже сотни раз повысился фон в Мурманске, Воркуте, Нарьян-Маре, Салехарде и даже в городах, удаленных на тысячу км от полигона – Надыме и Архангельске. В течение нескольких последующих лет радиоактивный фон до 3000 мкР/ч фиксировался геологами в устьях небольших ручьев, стекающих с гор Полярного Урала.

Кроме испытаний атомного оружия в Арктике проводились ядерные взрывы в мирных целях, в основном по заказу Министерства геологии для глубинного сейсмического зондирования, а также для дробления апатитовой руды в естественном массиве (Кольский полуостров).

Через несколько лет после прекращения ядерных испытаний радиационный фон в Арктике восстановился до нормального, за исключением архипелага Новая Земля, где до сих пор имеются локальные участки с радиационным фоном до 2 мР/ч.

Однако значительная часть радионуклидов была усвоена тундровой растительностью и в первую очередь мхами. Содержание стронция в некоторых видах мхов достигало 27 тыс. Бк/кг. Радиоизотопы стронция и цезия двигались по пищевой цепи ягель – олень – человек. В костях оленей концентрация Sr-90 возрастала до 13 тыс. Бк/кг. В результате этого накопление стронция в скелетах оленеводов в 20-40 раз выше, чем у горожан (Якимец, 1992).

Другой фактор радиоактивного загрязнения районов Арктики – ликвидация жидких и твердых ядерных отходов, которую проводят здесь различные ведомства и в первую очередь – Министерство обороны. Кроме того, отслужившие свой срок атомные подводные лодки и другие корабли Северного флота необходимо утилизировать. В течение длительного времени СССР производила утилизацию жидких радиоактивных отходов, контейнеров с РАО, реакторов с невыгруженным ядерным топливом и даже целых отсеков подводных лодок и гражданских судов в Северном Ледовитом океане, преимущественно в глубоководных впадинах Баренцева и Карского морей, вблизи архипелага Новая Земля.

В настоящее время в Мурманской и Архангельской областях скопилось большое количество выведенных из состава ВМФ атомных подводных лодок (АПЛ), подлежащих утилизации. В регионе функционируют 5 предприятий, занимающихся утилизацией АПЛ (здесь скопилось большое количество РАО), а также две береговые технические базы Северного флота, где хранится отработанное ядерное топливо. Многие из АПЛ с невыгруженным отработанным ядерным топливом проржавели и могут затонуть. В настоящее время выведено из состава ВМФ 180 АПЛ, а утилизировано лишь 20. На судах специального назначения, береговых базах Северного флота и судоремонтных заводах скопилось 7000 м³ жидких РАО (в том числе 300 м³ высокоактивных), более 12000 м³ твердых РАО общей активностью 5000 Ки (в том числе 876 м³ высокоактивных).

Поскольку Россия не в состоянии своими силами ускорить темп утилизации списанных АПЛ, частичное финансирование этих работ на безвозмездной основе осуществляют Норвегия и США.

Временные хранилища открытого типа для твердых РАО на Северном флоте не отвечают требованиям радиационной безопасности. Вокруг них происходит загрязнение местности радиоактивными веществами.

Третьим фактором радиоактивного загрязнения Арктики, касающимся, главным образом, акватории Северного Ледовитого океана, является поступление радиоактивных вод с побережья Великобритании, где они сбрасываются с завода по переработке ядерного топлива. Свою лепту в загрязнение северных морей вносят и впадающие в них крупные реки, в первую очередь Обь и Енисей.

Все это создает неблагоприятную радиационную обстановку в Баренцевом и Карском морях. Среднее содержание радионуклидов в воде Северного Ледовитого океана колеблется от 8,5 до 30 Бк/м³, а в донных осадках западной части Карского моря обнаружены аномалии, на порядок превышающие местный фон.

В настоящее время Россия прекратила сброс радиоактивных отходов в северные моря, в результате чего списанные и выведенные из эксплуатации атомные подводные лодки с невыгруженным ядерным горючим переполняют гавани и побережье Арктики, где расположены базы Северного флота, а также судостроительные и судоремонтные заводы. Положение усугубляется тем, что имеющиеся хранилища РАО переполнены, а новые пока не построены. Все это создает чрезвычайно опасную радиационную обстановку в Арктике. Потенциальную опасность представляет собой и функционирующая Кольская АЭС с ее хранилищем РАО.

Наконец, в дополнение ко всему сказанному, повышенной радиоактивностью обладают отходы предприятий по добыче апатитовых руд на Кольском полуострове. Нельзя не упомянуть о шести подземных ядерных взрывах в Арктических районах, которые СССР производил в мирных целях (Мурманская область – 2 взрыва, Архангельская область – 4 взрыва).

Европейская часть России (кроме Арктики)

Радиоэкологическая обстановка в центральных и южных регионах Европейской части России целиком зависит от наличия на их территории потенциально опасных в радиационном отношении промышленных, научных и других сооружений и уста-

новок и от грамотной их эксплуатации. В первую очередь это относится к атомным электростанциям, которые имеются в Ленинградской, Тверской (Калининская АЭС), Калужской (Обнинская АЭС), Смоленской, Курской, Воронежской (Нововоронежская АЭС), Саратовской (Балаковская АЭС) и Ростовской областях.

Картину дополняют исследовательские реакторы и другие ядерные установки, размещенные в крупных научных центрах: Москве и Подмосковье (Институт ядерных исследований в Дубне, Московское высшее техническое училище, НИИ энерготехники, Институт теоретической и экспериментальной физики, Всероссийский институт химической технологии, НИИ радиационной безопасности космических объектов и др.), Обнинске (Физико-Энергетический институт, научно-производственное объединение «Тайфун» и др.), Санкт-Петербурге и Ленинградской области (Научно-исследовательский технологический институт в Сосновом Бору, НИИ ядерной физики в Гатчине), Нижегородской области (НИИ экспериментальной физики в г. Сарове, Научно-исследовательский и конструкторский центр по созданию атомных реакторов в Нижнем Новгороде и др.), Ульяновской области (НИИ атомных реакторов в г. Димитровграде).

На территории субъектов федерации, расположенных в европейской части России, в настоящее время добыча радиоактивных руд не производится. В СССР добычу и переработку урановых руд на территории Ставропольского края (возле г. Лермонтова) производило предприятие «Алмаз». В 1975 году работы были прекращены. В результате на горах Бештау и Бык остались отвалы «пустой» породы на площади более 50 га. На территории бывшего гидрометаллургического завода загрязнена промплощадка, отходы производства накоплены в хвостохранилище. Общая площадь загрязненной территории составляет 167 га. Мощность экспозиционной дозы гамма-излучения достигает здесь 200 мкР/ч. Имеются также заброшенные урановые шахты в Калмыкии.

Особо опасными объектами являются предприятия по переработке уранового сырья. Они расположены в г. Электростали в Подмосковье (производство топлива для АЭС), г. Кирово-Чепецке (химический комбинат по обогащению урановой руды), г. Сарове Нижегородской области (производство ядерных боеприпасов на заводе «Авангард»), г. Глазове в Удмуртии (производство тепловыводящих элементов для атомных реакторов). Это далеко неполный перечень предприятий данного направления.

Значительно осложняют и обостряют радиационную обстановку в европейской части России пункты захоронения радиоактивных отходов

(ПЗРО) в спецкомбинатах «Радон», которые размещаются в Московской, Ленинградской, Саратовской, Ростовской, Волгоградской, Самарской областях и в Татарстане.

В период с 1965 по 1988 годы Советский Союз проводил экспериментальные подземные ядерные взрывы, а также взрывы для решения разных нужд народного хозяйства вне официальных ядерных полигонов. Такие эксперименты в полной мере коснулись и европейских регионов России (Костромская – 1, Калининская – 1, Астраханская область – 32).

Приведенная далеко неполная сводка опасных в радиационном отношении объектов создает весьма напряженную радиационную обстановку в ряде областей России, среди которых особо выделяются Московская, Ленинградская, Нижегородская, Калужская и Ульяновская, где сосредоточено большое количество ядерных объектов.

Радиоэкологические исследования в городах европейской части России выявили несколько тысяч локальных участков, загрязненных радионуклидами. В первую очередь это касается Москвы, Санкт-Петербурга и Нижнего Новгорода. В частности, в Санкт-Петербурге специалистами ПГО «Невскгеология» обнаружено 1345, а в Москве, по данным «Геоэкоцентра», выявлено 655 участков радиоактивного загрязнения.

Однако, самым главным фактором радиационного загрязнения европейской части России оказалась трагедия века – авария на Чернобыльской АЭС 26 апреля 1986 г., которая по объему выброшенной активности и по площади загрязненных территорий является наиболее крупной в истории ядерных катастроф, связанных с атомной энергетикой.

Причиной аварии явились ошибки в управлении реактором во время проведения испытаний турбогенератора. Нарушение регламента эксплуатации реактора при отключенных технических средствах аварийной защиты привело к тепловому взрыву и последующему горению графита. В течение 10 дней горящий реактор выбрасывал в атмосферу большое количество ядерного горючего с продуктами его деления. За это время из активной зоны реактора было выброшено 50 МКг твердых радионуклидов и столько же радиоактивных изотопов благородных газов, что составляло около 3-4% от всего количества радиоизотопов в реакторе.

В первые недели наибольшую интенсивность излучения создавал короткоживущий ^{131}I , а с конца 1986 г. радиоактивные «пятна» представлены долгоживущими радиоизотопами: ^{137}Cs и ^{90}Sr . Кроме радионуклидов йода, цезия и стронция в атмосферу было выброшено 140000 Ки ^{239}Pu , 14000 Ки ^{241}Am , 59000 Ки ^{244}Ci и другие опасные радионуклиды.

Основная часть радиоактивных веществ отложилась в 30-километровой зоне. Однако, большое количество радиоактивной пыли было занесено меняющимся по направлению ветром.

Радиоэкологические исследования показали, что от Чернобыльской катастрофы пострадала большая часть территории Белоруссии, значительная часть территории Украины и минимум 10 областей России: Брянская, Тульская, Калужская, Орловская, Воронежская, Смоленская, Горьковская, Ростовская, Тамбовская и Пензенская. В некоторых районах активность в 10000 раз превышала обычные фоновые уровни. Радиоактивная пыль была зафиксирована во многих странах Западной Европы, а также на Кавказе, в Средней Азии, Сибири, Китае, Японии и даже США.

Непосредственно во время аварии острому радиационному воздействию подверглось свыше 300 человек из персонала АЭС и пожарных, 237 человек были госпитализированы с острой лучевой болезнью, от которой в первые недели умерли 30 человек.

После аварии к работам по ликвидации ее последствий были привлечены сотни тысяч граждан СССР, в том числе около 200000 из России. Значительная часть из них в 1986 г. получила дозу облучения около 250 мЗв. Помимо ликвидаторов последствий аварии радиационному облучению подверглись 16 млн человек.

В Российской Федерации подверглись радиоактивному воздействию 2955000 га сельскохозяйственных угодий, в том числе 171000 га с плотностью загрязнения 15 Ки/км². Урожай был оставлен на корню, а домашний скот переведен на стойловое содержание и чистый привозной корм. Загрязненное молоко коров перерабатывалось на продукты длительного хранения для освобождения их от короткоживущих радиоизотопов (в первую очередь от йода-131).

Особенно сильно пострадали сельскохозяйственные земли Белоруссии, в результате чего даже в 1990 г. в некоторых районах Гомельской области содержание цезия-137 превышало допустимые нормы: в мясе – в 400, молоке – в 700, зерне – в 7000 раз. Концентрация йода-131 в молоке коров в первые дни после аварии достигала 370000 Бк/л.

Радиоактивному загрязнению подверглись 10000 км² лесов, имеющих важное экономическое и экологическое значение. Максимально пострадали биоценозы лесов, находящихся в непосредственной близости от взорвавшегося энергоблока. Радиационная нагрузка на деревья пришлась на период весенних ростовых процессов, когда их радиационная чувствительность повышена. Это обстоятельство обусловило гибель хвойного леса, находящегося в ближней зоне, и образование участков «рыжего леса». Хвойные деревья вырубали и захоронили в бетоне. Погибли все мелкие грызуны хвойного леса.

Была подвержена радиоактивному загрязнению водная среда, в водоем-охладитель ЧАЭС попало огромное количество продуктов деления урана. Его обитатели, получившие дозу в 1 000 бэр, погибли и покрыли дно водоема сплошным слоем биомассы. Выжили лишь простейшие организмы. Для того, чтобы радиоактивная вода из пруда не попала в реки бассейна Днепра, были построены многокилометровые земляные дамбы. Тем не менее, значительное количество радионуклидов вылилось в реку Припять. Некоторая часть их и сейчас находится в захороненном состоянии в донных отложениях этого водотока.

В результате радиоактивного загрязнения озер возросла концентрация цезия-137 в промысловых рыбах до 80 000 Ки/кг. Радионуклиды попали и в подземные водоносные горизонты. В Гомельской области загрязнены радиоактивными веществами 7 000 колодцев.

С первых же дней развернулись работы по радиационному мониторингу территории, загрязненной радионуклидами. На основе аэрогаммасъемки и наземных измерений в кратчайшие сроки были созданы карты загрязнения ^{137}Cs и ^{90}Sr территории площадью 6 млн км².

Одновременно проводились мероприятия по радиационной защите населения. Они заключались в переселении жителей, введении различных ограничений на потребление загрязненных продуктов питания, хозяйственную и другую деятельность. Был ограничен доступ на загрязненную территорию, где интенсивно проводились дезактивационные работы. На начальных этапах эти мероприятия проводились в зоне жесткого контроля, ограниченной изолинией с плотностью загрязнения 15 Ки/км². Расчетная годовая доза облучения населения составляла здесь 100 мЗв. Из 100 000 человек, проживающих в этой зоне, было выселено около половины. Многие жители отказались покинуть свои родные места и остались жить на загрязненной территории.

При проведении дезактивационных работ были захоронены десятки тысяч кубометров радиоактивного грунта. Захоронения производились в специальные траншеи, вырытые на высоких местах с низким уровнем грунтовых вод. Сверху могильники покрывались специальной глиняной подушкой. В этой зоне до настоящего времени осуществляется обязательный контроль за содержанием радионуклидов в сельскохозяйственной продукции, существуют запреты на сбор грибов, ягод, лекарственных трав, заготовку сена в лесах, проводятся специальные агротехнические и агрохимические мероприятия на сельскохозяйственных угодьях (глубокая вспашка, внесение калийных и фосфорных удобрений, известкование почв, внесение в почву органики, подбор сельскохозяйственных

культур с низким коэффициентом накопления радионуклидов), а также мероприятия в животноводстве (в частности, запрещено овцеводство).

Дезактивация территории и система ограничений оказались очень эффективными. Уже в 1989 году у 95% жителей зоны жесткого контроля доза внутреннего облучения была меньше 2,5 мЗв/год, а в 1994 г. она опустилась до 1 мЗв/год. Однако, тщательно проводимый радиационный контроль производимой сельскохозяйственной продукции нередко показывает сверхнормативное загрязнение радионуклидами молока, мяса и корма для скота. Но на большинстве контролируемых территорий установлены темпы стабильного снижения уровней радиоактивного загрязнения, которые составляют около 3% в год. Это происходит за счет естественного распада радионуклидов, заглубления их под действием природных процессов и перераспределения в почвенном слое за счет антропогенных факторов.

На территории, загрязненной радионуклидами в результате Чернобыльской катастрофы, были развернуты научные исследования сотен коллективов, среди которых крупнейшие научные центры России: НИИ радиационной гигиены, Институт биофизики, Медицинский радиологический научный центр РАМН, ВНИИ сельскохозяйственной радиологии и агроэкологии, Институт эволюционной экологии и морфологии животных, РНЦ «Курчатовский институт». На основе выполненных научных исследований выработаны многочисленные рекомендации, используемые при проведении мероприятий по преодолению последствий этой крупнейшей в мировой практике радиационной аварии.

В России осуществляется социальная защита граждан, подвергшихся воздействию радиации вследствие Чернобыльской катастрофы. Она проводится в рамках специальных программ:

- федеральная целевая программа по защите населения Российской Федерации от воздействия последствий Чернобыльской катастрофы;
- программа «Дети Чернобыля»;
- программа «Жилье ликвидаторам».

Кроме того, в 1998 г. была утверждена программа совместной деятельности по преодолению последствий Чернобыльской катастрофы в рамках Союза Белоруссии и России.

Уральский регион

Факторы радиационного загрязнения в этом регионе столь же разнообразны, как и в центральной России. В Уральский регион входят с севера на юг: Республика Коми, Пермская, Свердловская, Челябинская и Оренбургская области, а также Башкирия.

В 60-е–70-е годы в Пермской области произведено 8 подземных ядерных взрывов. Два из них на Осинском нефтяном месторождении для увеличения нефтеотдачи пластов, 5 взрывов в Красновишерском районе с той же целью и один взрыв в районе Печоро-Ильчского заповедника – для создания канала Печора-Кама. В Коми АССР проведено 4 взрыва с целью сейсмического зондирования земной коры и мантии Земли.

Подземные ядерные взрывы проводились в Оренбургской области на границе с Казахстаном. Всего было 5 взрывов с целью создания подземных емкостей. Кроме того, в 1954 году в районе г. Точка проводилось испытание ядерного оружия в атмосфере, сопряженное с военными учениями.

В Башкирии в 1965 году проведено 6 подземных ядерных взрывов, 4 из них – для дополнительного притока нефти на Грачевском месторождении и два взрыва – для захоронения промышленных стоков (недалеко от городов Стерлитамака и Салавата).

В Уральском регионе работает пока одна атомная электростанция – Белоярская, расположенная в 80 км к востоку от г. Екатеринбурга. По заключению экологов (Куликов, Молчанова) она является безопасной для окружающей среды. Однако, загрязненная радионуклидами вода не раз попадала в р. Пышму, которая относится к бассейну р. Оби, а длительный сброс загрязненных вод в Ольховское болото привел к серьезному загрязнению его радиоактивными веществами. Ольховское болото, где местный радиационный фон превышает 1000 мкР/ч, служит теперь экспериментальной площадкой для уральских радиоэкологов.

В Екатеринбурге и Уфе функционируют предприятия «Радон» с собственными ПЗРО, обслуживающие Уральский регион. В годы существования СССР в Свердловской и Челябинской областях Малышевским рудоуправлением производилась добыча урановой руды.

В Свердловской и Челябинской областях дислоцируется значительное количество предприятий ядерного комплекса. В прошлом это закрытые города («почтовые ящики»). Ныне они обрели новые названия. Вот их неполный перечень: г. Озерск (бывший Челябинск-40, где размещается ПО «Маяк»), г. Снежинск (бывший Челябинск-70), г. Новоуральск (бывший Свердловск-44), г. Лесной (бывший Свердловск-45), г. Трехгорный (бывший Златоуст-26).

В Челябинской области с пятидесятих годов XX столетия работает мощный ядерный центр, известный как ПО «Маяк», который явился главным виновником загрязнения радионуклидами территории Среднего и Южного Урала и прилегающих областей Западной Сибири, пос-

кольку на этом предприятии неоднократно случались аварии с крупными выбросами радионуклидов в атмосферу и водные артерии.

В 1949-51 годах ПО «Маяк» сбрасывал в р. Теча высокоактивные отходы, не предупреждая об этом местное население. В результате среди проживающих в береговой зоне этой реки были зафиксированы 940 случаев хронической лучевой болезни. Облучение получили 77000 человек.

В 1957 году на том же предприятии произошел тепловой взрыв в одном из хранилищ высокоактивных ядерных отходов. Этот инцидент известен под названием «Кыштымская авария». Сформировавшееся радиоактивное облако, постепенно перемещалось в северо-восточном направлении. Оно оставило Восточно-Уральский радиоактивный след (ВУРС), в результате которого были загрязнены радионуклидами значительные площади Челябинской, Свердловской, Курганской и Тюменской областей. Облучение получили около 13000 человек, более 1000 из которых были эвакуированы из ближней зоны следа.

С тех пор еще не раз упомянутое предприятие создавало радиэкологические проблемы для прилегающих районов Урала и Западной Сибири. В.И. Булатов (1996) акцентирует внимание на следующих проблемах района, где размещается ПО «Маяк»: в междуречье Теча-Мишеляк сосредоточено более 200 могильников, содержащих около 500 тонн твердых РАО, из которых только небольшая часть остеклована.

В спецхранилищах захоронено 20000 м³ твердых высокоактивных отходов суммарной активностью 150 млн Ки и 900 млн Ки жидких высокоактивных отходов.

Продолжается сброс среднеактивных жидких отходов в бессточные озера Карачай и Старое Болото, где уже накоплены радионуклиды общей активностью более 120 млн Ки. Отсюда с обсыхающих мелководий радиоактивная пыль разносится ветром на расстояние до 75 км.

На территории предприятия «Маяк» ежегодно только от переработки твэлов атомных электростанций и реакторных установок ВМФ образуются РАО суммарной активностью 100 МКи.

Приложения

Приложение 1

Основные физические величины, используемые в радиационной биологии, и их единицы

| Физическая величина | Единица, ее наименование, обозначение (межд., русское) | | Соотношение между единицами | |
|--|--|-------------------------------|---|--------------------------------------|
| | внесистемная | системы СИ | внесистемная и СИ | СИ и внесистемная |
| Активность нуклида в радиоактивном источнике | кюри (Ci, Ки) | беккерель (Bq, Бк) | 1 Ки = = $3,7 \times 10^{10}$ Бк | 1 Бк = = $2,7 \times 10^{-11}$ Ки |
| Экспозиционная доза излучения | рентген (R, P) | кулон на кг (C/kg, Кл/кг) | 1 P = = $2,58 \times 10^{-4}$ Кл/кг | 1 Кл/кг = = 3 876 P |
| Мощность экспозиционной дозы излучения | рентген в секунду (R/s, P/c) | ампер на кг (A/kg, A/кг) | 1 P/c = = $2,58 \times 10^{-4}$ A/кг | 1 A/кг = = 3 876 P/c |
| Поглощенная доза излучения | рад (rad, рад) | грей (Gy, Гр) | 1 рад = 0,01 Гр | 1 Гр = 100 рад |
| Мощность поглощенной дозы излучения | рад в секунду (rad/s, рад/с) | грей в секунду (Gy/s, Гр/с) | 1 рад/с = = 0,01 Гр/с | 1 Гр/с = = 100 рад/с |
| Интегральная доза излучения | рад-грамм (rad × g рад × г) | джоуль (J, Дж) | 1 рад × г = = 10^{-5} Дж | 1 Дж = = 10^5 рад × г |
| Эквивалентная доза излучения | бэр (rem, бэр) | зиверт (Sv, Зв) | 1 бэр = 0,01 Зв | 1 Зв = 100 бэр |
| Мощность эквивалентной дозы излучения | бэр в секунду (rem/s, бэр/с) | зиверт в секунду (Sv/s, Зв/с) | 1 бэр/с = = 0,01 Зв/с | 1 Зв/с = = 100 бэр/с |

Приложение 2

Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц

| Множитель | Приставка | | Множитель | Приставка | |
|-----------|--------------|----------------------------|------------|--------------|----------------------------|
| | наименование | обозначение (межд. и рус.) | | наименование | обозначение (межд. и рус.) |
| 10^{18} | экса | Е/Э | 10^{-1} | деци | d/д |
| 10^{15} | пета | P/П | 10^{-2} | санتي | c/с |
| 10^{12} | тера | T/Т | 10^{-3} | милли | m/м |
| 10^9 | гига | G/Г | 10^{-6} | микро | μ/мк |
| 10^6 | мега | M/М | 10^{-9} | нано | n/н |
| 10^3 | кило | k/к | 10^{-12} | пико | p/п |
| 10^2 | гекто | h/г | 10^{-15} | фемто | f/ф |
| 10^1 | дека | da/да | 10^{-18} | атто | a/а |

Приложение 3

Периоды полураспада радиоизотопов ($T_{\text{физ.}}$)

| Изотоп | Период полураспада ($T_{\text{физ.}}$) | Изотоп | Период полураспада ($T_{\text{физ.}}$) |
|-----------------------------------|--|------------------------------------|--|
| Углерод-14 (^{14}C) | 5730 лет | Цезий-134 (^{134}Cs) | 2 года |
| Натрий-24 (^{24}Na) | 14 часов | Цезий-137 (^{137}Cs) | 30 лет |
| Фосфор-32 (^{32}P) | 14,3 суток | Барий-140 (^{140}Ba) | 13 суток |
| Сера-35 (^{35}S) | 87,4 суток | Церий-143 (^{143}Ce) | 33,4 часа |
| Калий-40 (^{40}K) | $1,42 \times 10^9$ лет | Радий-226 (^{226}Ra) | 1600 лет |
| Калий-42 (^{42}K) | 12,3 часа | Бром-82 (^{82}Br) | 36 часов |
| Кальций-45 (^{45}Ca) | 163 суток | Золото-198 (^{198}Au) | 64 часа |
| Железо-59 (^{59}Fe) | 44,5 суток | Сурьма-124 (^{124}Sb) | 60 суток |
| Кобальт-60 (^{60}Co) | 5,3 года | Теллур-127 (^{127}Te) | 9,3 часа |
| Стронций-89 (^{89}Sr) | 50,5 суток | Полоний-210 (^{210}Po) | 139 суток |
| Стронций-90 (^{90}Sr) | 28,6 года | Уран-235 (^{235}U) | 7×10^8 лет |
| Рутений-106 (^{106}Ru) | 1 год | Иттрий-90 (^{90}Y) | 2,6 суток |
| Йод-125 (^{125}I) | 60 суток | Тритий-3 (^3H) | 12,35 года |
| Йод-131 (^{131}I) | 8,06 суток | Плутоний-238 (^{238}Pu) | 87,74 года |

Временные допустимые уровни содержания радионуклидов ¹³⁷Cs
и в пищевых продуктах и питьевой воде, установленные в связи с аварией
на Чернобыльской АЭС

| Продукт | Удельная активность, Бк/кг | | |
|--|----------------------------|--------|----------------------|
| | ВДУ-88 | ВДУ-93 | РДУ-96 Белоруссия |
| Вода питьевая | 18,5 | 18,5 | 18,5 |
| Молоко, кисломолочные продукты, сметана, творог, сыр, масло сливочное | 370 | 370 | 111 |
| Молоко сгущенное | 1 110 | 1 200 | 740 |
| Молоко сухое | 1 850 | 6 000 | 740 |
| Масло сливочное | 1 110 | 370 | 185 |
| Мясо и продукты из них: | | | |
| говядина | 2 960 | 600 | 600 |
| свинина | 1 850 | 600 | 370 |
| птица | 1 850 | 600 | 370 |
| баранина | 1 850 | 600 | 600 |
| Жиры растительные и животные, маргарин | 370 | 370 | 185 |
| Картофель, корнеплоды, овощи, столовая зелень, садовые фрукты, ягоды, овощи; | 740 | 600 | 100 |
| консервированные продукты из овощей, садовых фруктов и ягод | 740 | 600 | 74 |
| Хлеб и хлебобулочные изделия, крупы, мука, сахар | 370 | 370 | 74 |
| Свежие дикорастущие ягоды и грибы | 1 850 | 600 | 370 |
| Сухофрукты | 11 100 | 6000 | 3 700 |
| Сушеные грибы | 11 100 | 6000 | 3 700 |
| Специализированные продукты детского питания | 370 | 185 | 37 |

**Гигиенические нормативы качества и безопасности
продовольственного сырья и пищевых продуктов
(СанПиН 2.3.2.1078-01)**

| Группа продуктов | Допустимое содержание, не более, Бк/кг | | Примечание |
|--|---|--------------------------|--|
| | Sr-90 | Cs -137 | |
| 1.1. Мясо и мясопродукты, птица, яйца и продукты их переработки | | | |
| 1.1.1. Мясо и субпродукты свежие, охлажденные, замороженные; п/ф мяса всех видов; колбасные изделия; консервы (контроль по сырью) | 50 100 100 200 | 160 320 320 160 | без костей оленина (без костей) диких животных кости (все виды) |
| 1.1.9. Птица всех видов, субпродукты, колбасные изделия, консервы из птицы | 80 | 180 | Контроль по сырью |
| 1.1.15. Яйца и продукты их переработки | 50 | 80 | |
| 1.2. Молоко и молочные продукты | | | |
| 1.2.1. Молоко-сырье, сливки-сырье, кисломолочные продукты | 25 | 100 | |
| 1.2.3. Консервы молочные (молоко сгущенное и концентрированное) | 100 | 300 | |
| 1.2.4. Продукты молочные сухие: молоко и сливки | 200 | 500 | |
| 1.2.6. Сыры (твердые, мягкие, рассольные, плавленые) | 100 | 50 | |
| Масло коровье | 50 | 100 | |
| 1.3. Рыба, нерыбные объекты промысла и продукты, вырабатываемые из них | | | |
| 1.3.1. Рыба живая, замороженная, фарш, филе, мясо морских млекопитающих | 100 | 130 | |
| 1.3.2. Консервы, пресервы рыбные | 100 | 130 | |
| 1.3.3. Рыба сушеная, вяленая, копченая, маринованная; готовая к употреблению | 200 | 260 | |
| 1.3.7. Водоросли морские | 100 | 200 | |

| Группа продуктов | Допустимое содержание, не более, Бк/кг | | Примечание |
|--|--|--------|------------|
| | Sr-90 | Cs-137 | |
| 1.4. Зерно (семена), мукомольно-крупяные и хлебобулочные изделия | | | |
| 1.4.1. Зерно продовольственное (пшеница, рожь, тритикале, овес, ячмень, просо, гречиха, кукуруза, сорго) | 40 | 70 | |
| 1.4.2. Семена зернобобовые (горох, фасоль, маш, чина, чечевица, нут) | 60 | 50 | |
| 1.4.3. Крупа, толокно, хлопья | 30 | 50 | |
| 1.4.4. Мука пшеничная, в т.ч. для макаронных изделий (мука из других культур п. 1.4.1) | 30 | 60 | |
| 1.4.5. Макароны изделия | 30 | 60 | |
| 1.4.6. Отруби пищевые (пшеничные, ржаные) | 30 | 60 | |
| 1.4.8. Бараночные, сухарные изделия, хлебные палочки, соломка и др. | 30 | 50 | |
| 1.5. Сахар и кондитерские изделия | | | |
| 1.5.1. Сахар | 100 | 140 | |
| 1.5.2. Кондитерские изделия сахаристые | 100 | 160 | |
| 1.5.3. Шоколад и изделия из них | 100 | 140 | |
| 1.5.4. Какао-бобы и какао-продукты | 80 | 100 | |
| 1.5.5. Мучные кондитерские изделия | 30 | 50 | |
| 1.5.6. Мед | 80 | 100 | |
| 1.6. Плодовоовощная продукция | | | |
| 1.6.1. Свежие, свежемороженые овощи: | | | |
| картофель | 40 | 120 | |
| овощи, бахчевые | 40 | 120 | |
| фрукты, ягоды | 30 | 40 | |
| грибы | 50 | 500 | |
| ягоды дикорастущие | 60 | 160 | |

Продолжение прил. 5

| Группа продуктов | Допустимое содержание, не более, Бк/кг | | Примечание |
|--|--|--------|------------|
| | Sr-90 | Cs-137 | |
| 1.6.2. Сухие: | | | |
| картофель | 200 | 600 | |
| овощи, бахчевые | 200 | 600 | |
| фрукты, ягоды, виноград | 150 | 200 | |
| грибы | 250 | 2 500 | |
| 1.6.5. Концентраты соков, напитков | 240 | 1 200 | |
| 1.6.6. Джем, варенье, повидло, конфитюры и др. | 70 | 80 | |
| 1.6.8. Специи и пряности сухие | 100 | 200 | |
| 1.6.9. Орехи | 100 | 200 | |
| 1.6.10. Чай (все виды) | 200 | 400 | |
| 1.6.11. Кофе (в зернах, молотый, растворимый) | 100 | 300 | |
| 1.7. Масличное сырье и жировые продукты | | | |
| 1.7.1. Семена масличных культур | 90 | 70 | |
| 1.7.2. Масло растительное (все виды) и жир рыбный | 80 | 60 | |
| 1.7.4. Жир-сырец всех видов, шпик свиной | 50 | 100 | |
| 1.7.6. Масло коровье | 60 | 200 | |
| 1.7.7. Жировые продукты на основе сочетания животных и растительных жиров | 60 | 100 | |
| 1.7.8. Рыбный жир и жир морских млекопитающих для лечебно-профилактических целей | 80 | 60 | |

Примечание. Источник – выписка из – Гигиенические требования к качеству и безопасности продовольственного сырья и пищевых продуктов. Санитарные правила и нормы. СанПиН 2.3.2.1078-01. М.: Минздрав России, 2002.

При обосновании нормативов удельной активности стронция-90 и цезия-137 в продовольственном сырье и пищевых продуктах было принято:

1. Предлагаемые нормативы для конкретных отечественных продуктов должны обеспечивать непревышение предела годовой дозы облучения (1 мЗв), а также пределов годовых поступлений стронция-90 и цезия-137 с пищей соответственно $3,6 \times 10^4$ Бк и $7,7 \times 10^4$ Бк.

2. Указанным пределам годовых поступлений соответствует активность суточного рациона:

100 Бк/сутки для стронция-90 и 210 Бк/сутки для цезия-137.

Расчеты допустимой удельной активности пищевых продуктов произведены учетом доли вклада данного конкретного вида продукта в загрязненность суточного рациона, масса которого равна 1 860 г/сутки и реальной удельной активности стронция-90 и цезия-137 в пищевых продуктах. Для отдельных территорий эти нормативы могут быть изменены в порядке, установленном НРБ-96.

3. Пищевой продукт годен к употреблению, если

$$(A/H) \text{ цезий-137} + (A/H) \text{ стронций-90} \leq 1,$$

где A – удельная активность радионуклидов стронция-90 и цезия-137 в данном пищевом продукте;

H – нормативы по стронцию-90 и цезию-137 (берутся из таблицы).

Если

$$(A/H) \text{ цезий-137} + (A/H) \text{ стронций-90} > 1$$

или когда в пищевых продуктах, пищевом сырье присутствуют другие радионуклиды техногенного происхождения, то следует руководствоваться НРБ-99 п. 7.2.4.

4. Контроль за удельной активностью пищевого продукта проводится на основе действующих ГОСТов, методических указаний, утвержденных Минздравом России.

5. Нормативные документы:

- федеральный закон «О радиационной безопасности населения»;
- нормы радиационной безопасности – НРБ-99;
- Методические рекомендации по санитарному контролю за содержанием радиоактивных веществ в объектах внешней среды / под ред. А.Н. Марья, А.С. Зыковой. М., 1980.

Приложение 6

Краткая медико-биологическая характеристика основных радионуклидов, действующих после аварии на Чернобыльской АЭС

| Радиоизотоп | Период полувыведения ($T_{эфф.}$) |
|-------------------|--|
| ^{131}J | Из щитовидной железы: биологический – 120 сут., эффективный – 7,5 сут. Из остальных тканей: биологический – 12 сут., эффективный – 4, 8 сут. |
| ^{137}Cs | Биологический: для взрослых – от 40 до 200 сут. (в среднем 110 сут.), для детей – от 10 до 50 сут. |
| ^{210}Po | Биологический – 50 сут., эффективный – 36 сут. |
| ^{239}Pu | Биологический: из скелета 100 лет, из печени – 40 лет. Эффективный: из скелета 46 лет, из печени – 27 лет |
| ^{241}Am | Биологический: из скелета – 100 лет, из печени – 40 лет. Эффективный: из скелета – 84 года, из печени – 18 лет |

*Приложение 7*Выписка из федерального закона
«О радиационной безопасности населения»

Статья 1. Радиационная безопасность населения – состояние защищенности настоящего и будущего поколений людей от вредного для их здоровья воздействия ионизирующего излучения.

Статья 22. Граждане Российской Федерации, иностранные граждане и лица без гражданства, проживающие на территории Российской Федерации, имеют право на радиационную безопасность. Это право обеспечивается за счет проведения комплекса мероприятий по предотвращению радиационного воздействия на организм человека ионизирующего излучения выше установленных норм, правил и нормативов, выполнения гражданами и организациями, осуществляющими деятельность с использованием источников ионизирующего излучения, требований к обеспечению радиационной безопасности.

Приложение 8

О «Нормах радиационной безопасности»

Государственный комитет санитарно-эпидемиологического надзора Российской Федерации утвердил «Нормы радиационной безопасности» – НРБ-99 вместо ранее действовавших.

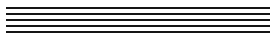
Требования и нормативы, установленные Нормами радиационной безопасности НРБ-99, являются обязательными для всех юридических лиц, независимо от их подчиненности и формы собственности, в результате деятельности которых возможно облучение людей, а также администраций субъектов Российской Федерации, местных органов власти и граждан.

Кроме НРБ-99 на территории Российской Федерации действуют «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99). В них содержатся требования по обеспечению радиационной безопасности персонала учреждений и населения, а также по охране окружающей среды от загрязнения радиоактивными веществами.

*Приложение 9*Перечень других нормативных документов, регламентирующих
обеспечение радиационной безопасности:

1. Гигиенические требования к качеству и безопасности продовольственного сырья и пищевых продуктов. Санитарные правила и нормы. СанПиН 2.3.2.560-96. М., 1997.

2. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды центральных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Санитарные правила и нормы. СанПиН 2.1.4.559-96. М.: Госкомсанэпиднадзор России, 1996.
3. Радиационный контроль. Стронций-90 и цезий-137. Пищевые продукты. Отбор проб, анализ и гигиеническая оценка. Методические указания по методам контроля. МУК 2.6.1.717-98. М.: Минздрав России, 1998.
4. Методические указания по внедрению и применению Санитарных правил и норм. СанПиН 2.1.4.559-96. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. МУ 2.1.4.682-97. М.: Минздрав России, 1998.
5. Допустимые уровни содержания цезия-137 и стронция-90 в продукции лесного хозяйства. Санитарные правила. СП 2.6.759-99. М.: Минздрав России, 1999.
6. ГОСТ Р 50801-95. Древесное сырье, лесоматериалы, полуфабрикаты и изделия из древесных материалов. Допустимая активность радионуклидов, методика отбора проб и методы измерения удельной активности.
7. ГОСТ 30108-94. Материалы и изделия строительные. Определение эффективной активности естественных радионуклидов.
8. Инструктивно-методические указания по радиохимическим методам определения радиоактивности в объектах ветнадзора. М., 1984.
9. Методические указания по отбору проб ветеринарного надзора. М.: ГУ ветеринарии АКП СССР, 1987.
10. Обеспечение радиационной безопасности при обращении с производственными отходами с повышенным содержанием природных радионуклидов на объектах нефтегазового комплекса Российской Федерации. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. СанПин 2.6.6.1169-02. М.: Минздрав России, 2002. 24 с.



D₀ – (произносится Д-ноль) и **D₃₇** – (произносится Д-37) – дозы излучения, вызывающие снижение выживаемости клеток, определяемой по их клоногенной способности, в 1/e раз, до 37% от исходной, на линейном участке кривых доза-эффект, построенных в полулогарифмических координатах.

G₁-период – период клеточного цикла между образованием клетки и началом репликации ДНК.

G₂-период – период клеточного цикла между окончанием синтеза ДНК и вступлением клетки в деление.

S-период – период клеточного цикла, в течение которого происходит синтез ДНК; в каждый момент времени реплицируется только один из участков клеточной ДНК.

Аберрации (хроматидные и хромосомные) – изменение расположения генетического материала, его частичная утеря или приобретение нового, а также увеличение числа его копий.

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

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

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

Аноксия – полное отсутствие кислорода в клетке или ткани.

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

Беккерель – единица радиоактивности в СИ, соответствующая 1 распаду в секунду – эпоним в честь профессора физики Парижского музея естественной

истории Анри Беккереля, открывшего явление естественной радиоактивности солей урана.

Бета (β)-частицы – электроны, вылетающие из ядер при радиоактивном распаде.

Бэр – биологический эквивалент рентгена (рада) – доза излучения, по биологической эффективности равная действию рентгеновского или гамма-излучения в расчете на 1 Р экспозиционной дозы.

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

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

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

Генотип – совокупность всех наследственных факторов, входящих в геном.

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

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

Грей – единица поглощенной дозы в Международной системе единиц (в СИ, системе интернациональной), равная 1 Дж/кг массы; в литературе встречается написание грэй (Гр). Единица поглощенной дозы грэй – эпоним в честь лауреата премии имени Рентгена Луи Гарольда Грэя.

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

Доза поглощенная – количество излучения, поглощенное облученным объектом, в расчете на единицу массы. Единицей поглощенной дозы в Международной системе является грей (Гр), который соответствует поглощению 1 Дж/кг.

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

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

Доза экспозиционная – доза излучения, измеренная в воздухе, единицей экспозиционной дозы является в системе СИ кулон на килограмм (Кл/кг), в технической системе – рентген (Р), эпоним в честь немецкого исследователя Вильгельма Конрада Рентгена.

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

Зиверт (Зв) – единица эквивалентной дозы. Единица названа в честь шведского исследователя в области дозиметрии и радиационной безопасности Рольфа Максимилиана Зиверта (эпоним).

Интерфаза – промежуток времени между двумя последовательными делениями клетки.

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

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

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

Кислородный эффект – увеличение степени радиационного поражения объекта по мере возрастания его концентрации в окружающей клетки среде от нулевых значений pO_2 (аноксии) до 20 мм. рт. ст.

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

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

Клонообразование – способность клетки образовывать колонии.

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

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

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

Критические органы (системы) – жизненно важные органы или системы, выходящие из строя первыми в исследуемом диапазоне доз излучения, что обуславливает гибель организма в определенные сроки после облучения; примеры: система кроветворения, тонкий кишечник, ЦНС.

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

Кюри – внесистемная единица радиоактивности, равная $3,7 \times 10^{10}$ Бк/с (распадов в секунду). Эта единица названа в честь исследователей, лауреатов Нобе-

левской премии по физике Марии Склодовской-Кюри и Пьера Кюри, открывших и выделивших радиоактивные элементы полоний и радий (1898 г.).

ЛД₅₀ – летальная доза 50 – доза излучения, вызывающая гибель 50% особей.

ЛД_{50/30} – доза излучения, вызывающая гибель 50% объектов в течение 30 дней после воздействия (соответствующих завершению гибели мышей от поражения кишечника и костного мозга).

Линейные потери (передачи) энергии (ЛПЭ) – потери энергии на мкм пути, выраженные в эВ.

Лучевая болезнь – клинический синдром, развивающийся вследствие общего облучения.

Лучевая болезнь (острая) – наступившая вследствие однократного облучения.

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

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

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

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

Митоз – деление клетки.

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

Мишени теории (принцип) – высказанное в 30-е годы XX в. представление о неравнозначности поражения различных частей клетки для ее судьбы; догадка о существовании в клетке радиочувствительных структур, поражение которых и приводит к ее гибели; в настоящее время такой структурой является ДНК.

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

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

Нейтрон – нейтральная, не обладающая зарядом ядерная частица с массой, почти равной массе протона; источником нейтронов служат ядерные реакторы, где они возникают при делении ядер урана, или ускорители, в которых нейтро-

ны возникают при взаимодействии ускоренных частиц (например, дейтронов с ядрами атомов мишени, сделанной, например, из бериллия).

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

Облучение – воздействие ионизирующей радиации на биологические объекты.

Облучение внешнее – от наружных источников излучения.

Облучение внутреннее – от инкорпорированных в организм радионуклидов.

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

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

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

Облучение общее (тотальное) – облучение всего тела.

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

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

Облучение хроническое – длительное при низкой мощности дозы.

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

ОБЭ – относительная биологическая эффективность (ионизирующих излучений).

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

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

Пи-минус мезоны (π^-) (отрицательные π -мезоны) – отрицательно заряженные элементарные частицы массой, в 273 раза превышающей массу элек-

трона; π -мезоны создают в месте их захвата большое локальное энерговыделение («микровзрыв»).

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

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

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

Пороговая доза – доза, ниже которой не отмечены проявления данного эффекта облучения.

Принцип попаданий и мишени – формальное объяснение первичных механизмов биологического действия ионизирующих излучений, в том числе явления, называемого **радиобиологическим парадоксом**: принцип попаданий характеризует особенности действующего агента – дискретность поглощения энергии, а принцип мишени учитывает особенность облучаемого объекта – клетки – высокую гетерогенность и значимость ее структур в морфологическом и функциональном отношениях, а следовательно, различие в ответе на одно и то же попадание.

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

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

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

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

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

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

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

Радиационные синдромы – симптомокомплексы (костномозговой, кишечный, церебральный), развивающиеся вследствие поражения соответствующих **критических органов** после облучения в определенном диапазоне доз – 1-10 Гр, > 100 Гр, соответственно.

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

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

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

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

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

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

Радиомодификация – искусственное изменение **радиочувствительности** с помощью **радиомодифицирующих агентов**.

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

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

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

Радиочувствительность – относительная восприимчивость клеток, тканей, органов или организмов к воздействию ионизирующего излучения, мерой кото-

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

Радиочувствительность видовая – радиочувствительность отдельных биологических видов.

Радиочувствительность индивидуальная – варьирование степени радиочувствительности внутри одного вида.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Тяжелые ядерные частицы – протоны, нейтроны, пи-минус мезоны (π^-), ядра тяжелого водорода (дейтерий), α -частицы (ядра гелия) и тяжелые ионы (ядра других элементов).

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

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

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

Эквивалентная доза – поглощенная доза, умноженная на взвешивающий коэффициент, отражающий поражающую способность данного вида излучения; используется в области радиационной безопасности.

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

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

Электронно-позитронная пара – взаимодействие ионизирующего излучения с веществом, при котором γ -квант большой энергии в поле атомного ядра превращается в пару заряженных частиц – **электрон** и **позитрон**.

Эффект детерминированный – эффект, у которого с увеличением дозы облучения возрастает как частота появления, так и тяжесть; обычно возникает после превышения некоего дозового порога; часто рассматривается как ранний эффект облучения, однако как частота, так и тяжесть детерминированного эффекта могут возрастать спустя многие годы после воздействия.

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

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

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

Литература

1. *Александров Ю.А.* Сельскохозяйственная радиобиология / Мар. гос. ун-т; Ю.А. Александров. – Йошкар-Ола, 2005. – 131 с.
2. *Анненков Б.Н.* Основы сельскохозяйственной радиологии / Б.Н. Анненков, Е.В. Юдинцева. – М.: Агропромиздат, 1991. – 287 с.
3. *Белов А.Д.* Ветеринарная радиобиология / А.Д. Белов, В.А. Киршин. – М.: Агропромиздат, 1987. – 287 с.
4. *Бударков В.А.* Краткий радиоэкологический словарь / В.А. Бударков, А.С. Зенкин, В.А. Киршин; под ред. В.А. Бударкова. – Саранск: Изд-во Мордовского ун-та, 1998. – 256 с.
5. *Бутомо Н.В.* Основы медицинской радиобиологии / Н.В. Бутомо, А.Н. Гребенюк, В.И. Легеза; под ред. И.Б. Ушакова. – СПб.: ООО «Изд-во Фолиант», 2004. – 384 с.: ил.
6. Ветеринарные правила обеспечения радиационной безопасности животных и продукции животного происхождения. ВП13.7.13. от 11 мая 1999 г. // Ветеринарная газета. – 1999. – № 20. – 11 окт. – С. 20-26.
7. Ионизирующее излучение. Радиационная безопасность: нормы радиационной безопасности (НРБ-99). СП 2.6.1. 758-99. – М.: Минздрав России, 1999.
8. *Киршин В.А.* Ветеринарная противорадиационная защита / В.А. Киршин, В.А. Бударков. – М.: Агропромиздат, 1990. – 207 с.
9. *Корнеев Н.А.* Основы радиоэкологии сельскохозяйственных животных / Н.А. Корнеев, А.Н. Сироткин. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 156 с.
10. *Кузин А.М.* Прикладная радиобиология / А.М. Кузин, Д.А. Каушанский. – М.: Энергоиздат, 1981. – 306 с.
11. *Леухин А.В.* Исследование содержания радионуклидов в объектах окружающей среды методом гамма- и бета-спектрометрии: вопросы экологии, региональный аспект: матер. пост. действ. Всероссийской междисциплинарной научной конференции с международным участием / А.В. Леухин, Г.А. Ситников, А.Р. Сазонов, А.М. Андреев. – М.; Йошкар-Ола: Изд-во МарГТУ, 2004. – Ч. 2. – С. 139-141.
12. *Лурье А.А.* Сельскохозяйственная радиология и радиоэкология / А.А. Лурье. – М.: МСХА. 1999. – 134 с.
13. *Новоселов Г.Н.* Радиационный мониторинг сырья и строительных материалов на их основе: матер. пост. действ. Всероссийской междисциплинарной научной конференции / Г.Н. Новоселов, А.В. Леухин, Г.А. Ситников. – Йошкар-Ола: Изд-во МарГТУ, 1997. – С. 126-127.
14. Практикум по ветеринарной радиобиологии / А.Д. Белов, А.С. Косенко, В.В. Пак и др. – М.: Агропромиздат, 1988. – 234 с.

15. Радиобиология / А.Д. Белов, В.А. Киршин, Н.П. Лысенко, В.В. Пак и др.; под ред. А.Д. Белова. – М.: Колос, 1999. – 358 с.
16. СанПиН 2.3.2.560-96. Гигиенические требования к качеству и безопасности продовольственного сырья и пищевых продуктов. Санитарные правила и нормы. – М.: Минздрав России, 1996.
17. СанПиН 2.3.2.1078-01. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. СП 2.6.1.759-99. Допустимые уровни содержания цезия-137 и стронция-90 в продукции лесного хозяйства. – М.: Минздрав России, 1996.
18. *Скоробогатко Л.М.* Практикум по радиэкологии / Л.М. Скоробогатко. – Курск: Изд-во Курской ГСХА, 1997. – 150 с.
19. *Старков В.Д.* Радиационная экология / В.Д. Старков, В.И. Мигунов. – Тюмень: ФГУ ИПП «Тюмень», 2003. – 304 с.
20. *Ярмоненко С.П.* Радиобиология человека и животных / С.П. Ярмоненко, А.А. Вайнсон. – М.: Высш. шк., 1988. – 594 с.

Содержание

| | |
|---|----|
| Посвящается 80-летию юбилею Василия Алексеевича Киришина | 3 |
| Введение | 5 |
| Раздел 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ БИОЛОГИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ (ИИ) | |
| 1.1. Строение атома. Понятие радиоактивности | 14 |
| 1.2. Единицы радиоактивности | 16 |
| 1.3. Типы ядерных превращений. Взаимодействие ИИ с веществами. Виды ИИ и их характеристика | 17 |
| 1.3.1. Альфа-распад | 17 |
| 1.3.2. Бета-распад | 18 |
| 1.3.3. К-захват электронов ядром | 20 |
| 1.3.4. Самопроизвольное деление ядер | 20 |
| 1.3.5. Термоядерные реакции | 21 |
| 1.4. Понятие дозиметрии. Поглощенная и экспозиционная дозы излучения | 23 |
| 1.4.1. Экспозиционная доза излучения | 23 |
| 1.4.2. Поглощенная доза излучения | 23 |
| 1.5. Относительная биологическая эффективность ИИ | 24 |
| 1.6. Мощность дозы и единицы ее измерения | 26 |
| 1.7. Закон радиоактивного распада | 27 |
| 1.8. Принципы работы радиометрической аппаратуры | 28 |
| 1.8.1. Ионизационные детекторы | 28 |
| 1.8.2. Полупроводниковые детекторы | 30 |
| 1.8.3. Сцинтилляционные детекторы | 30 |
| Раздел 2. ИСТОЧНИКИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ И ЗАГРЯЗНЕНИЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ РАДИОАКТИВНЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ | |
| 2.1. Классификация источников ИИ. Природный радиационный фон | 32 |
| 2.2. Естественные источники ИИ | 32 |
| 2.2.1. Космическое излучение | 33 |
| 2.2.2. Природные (естественные) радиоактивные вещества | 35 |
| 2.2.2.1. Радиоактивность оболочек Земли | 45 |
| 2.2.2.2. Радиоактивность горных пород | 45 |
| 2.2.2.3. Радиоактивность почв | 47 |
| 2.2.2.4. Радиоактивность природных вод | 49 |
| 2.2.2.5. Радиоактивность атмосферного воздуха | 50 |
| 2.3. Искусственные источники ионизирующих излучений и их характеристика | 52 |
| 2.3.1. Источники ионизирующих излучений, используемые в медицине | 52 |
| 2.3.2. Ядерные и термоядерные взрывы | 53 |
| 2.3.3. Атомная энергетика | 58 |
| 2.3.3.1. Экологические проблемы, возникающие в условиях нештатной (аварийной) работы радиационно-опасных объектов | 66 |

| | |
|--|-----|
| 2.3.3.2. Добыча и переработка радиоактивного минерального сырья | 77 |
| 2.3.4. Добыча и переработка углеводородного сырья | 79 |
| 2.3.5. Полигоны для испытания ядерного оружия | 81 |
| 2.3.6. Ядерные взрывы в мирных целях | 82 |
| 2.3.7. Ядерные реакторы исследовательского типа | 82 |
| 2.3.8. Загрязнение морей атомными кораблями | 82 |
| 2.3.9. Источники ионизирующего излучения в быту | 84 |
| 2.4. Экологическая характеристика искусственных радиоактивных изотопов | 86 |
| 2.5. Радиоактивные отходы и экология | 88 |
| 2.6. Защита от радиационного излучения | 98 |
| 2.6.1. Принципы нормирования в области радиационной безопасности | 100 |
| 2.6.2. Принципы радиозащитного питания | 113 |

Раздел 3. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

| | |
|--|-----|
| 3.1. Физическая стадия | 115 |
| 3.2. Физико-химическая стадия | 116 |
| 3.3. Химическая стадия. Прямое и не прямое действие радиации | 117 |
| 3.4. Молекулярные повреждения, возникающие в клетках | 120 |
| 3.5. Действие ионизирующих излучений на критические системы организма | 124 |
| 3.5.1. Основные механизмы гемо- и иммунопоэза | 124 |
| 3.5.2. Влияние облучения на процесс костномозгового кроветворения | 128 |
| 3.5.3. Постлучевые изменения морфологического состава периферической крови | 133 |
| 3.5.4. Влияние облучения на иммунную систему | 135 |
| 3.5.5. Действие ионизирующей радиации на желудочно-кишечный тракт | 140 |
| 3.5.6. Действие ионизирующей радиации на эмбрион, плод | 144 |
| 3.6. Радиационные поражения человека | 153 |
| 3.6.1. Острая лучевая болезнь от внешнего равномерного облучения | 153 |
| 3.6.1.1. Костномозговая форма острой лучевой болезни | 155 |
| 3.6.1.2. Кишечная форма острой лучевой болезни | 163 |
| 3.6.1.3. Токсемическая форма острой лучевой болезни | 164 |
| 3.6.1.4. Церебральная форма острой лучевой болезни | 165 |
| 3.6.2. Биологическое действие инкорпорированных радионуклидов | 166 |
| 3.6.2.1. Пути поступления радиоактивных веществ в организм | 166 |
| 3.6.2.2. Метаболизм радиоактивных веществ, всосавшихся в кровь | 170 |
| 3.6.2.3. Выведение радиоактивных веществ из организма | 171 |
| 3.6.2.4. Биологическое действие радиоактивных веществ | 172 |
| 3.6.2.5. Особенности действия отдельных биологически значимых радионуклидов | 175 |

Раздел 4. РАДИАЦИОННАЯ ЭКОЛОГИЯ ЭКОСИСТЕМ

| | |
|---|-----|
| 4.1. Наземные экосистемы | 187 |
| 4.1.1. Радионуклиды в искусственных агробиогеоценозах | 192 |
| 4.1.1.1. Особенности ведения сельскохозяйственного производства в ближайший период после выпадения радиоактивных осадков | 199 |
| 4.1.1.2. Ведение сельскохозяйственного производства в период «йодной опасности» | 201 |

| | |
|--|-----|
| 4.1.1.3. Ведение сельскохозяйственного производства в период поверхностного загрязнения почвы радиоактивными веществами | 211 |
| 4.1.1.4. Ведение сельскохозяйственного производства в период корневого поступления РВ в растения | 212 |
| 4.1.1.5. Прогнозирование поступления радионуклидов в сельскохозяйственную продукцию | 218 |
| 4.2. Пресноводные экосистемы | 225 |
| 4.2.1. Накопление радионуклидов пресноводными растениями | 226 |
| 4.2.2. Накопление радионуклидов пресноводными животными | 227 |
| 4.3. Поведение радионуклидов на территории различных природных зон России | 230 |
| 4.4. Радиационное загрязнение регионов России | 236 |
| Приложения | 246 |
| Терминологический словарь | 255 |
| Литература | 264 |

АЛЕКСАНДРОВ Юрий Александрович

ОСНОВЫ РАДИАЦИОННОЙ ЭКОЛОГИИ

Учебное пособие

Литературный редактор *О.А. Егошина*

Компьютерная верстка *С.Н. Бастрасова*

Тем. план 2007 г. № 78.

Подписано в печать 23.10.2007 г. Формат 60×84/16.

Усл.-печ. л. 15,58. Уч.-изд. л. 11,33. Тираж 500. Заказ № 2461.

Оригинал-макет подготовлен к печати в РИО и отпечатан ООП
ГОУВПО «Марийский государственный университет»
424001, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина 1