

РАДИОАКТИВНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ

1. Основные представления о радиоактивности и ионизирующих излучениях
2. Источники и пути поступления радионуклидов в организм
3. Биологическое действие ионизирующих излучений на человеческий организм
4. Технологические способы снижения радионуклидов в пищевой продукции

1. Основные представления о радиоактивности и ионизирующих излучениях

Немногим более 100 лет назад человечество впервые узнало о существовании ионизирующего излучения и радиоактивности.

1895 г. немецкий физик Вильгельм Конрад Рентген открыл неизвестные ранее Х-лучи, которые впоследствии в его честь были названы рентгеновскими лучами. Не успел еще ученый мир прийти в себя от потрясшего воображение открытия рентгеновского излучения, как последовало новое, захватывающее дух сообщение. Сделал его французский физик Анри Беккерель в 1896г., который, работая с солями урана, первым в истории человечества установил факт его естественной радиоактивности. Уже через год английский физик Эрнст Резерфорд доказал, что излучение урана состоит из α - и β -частиц.

Так, на рубеже двух веков были сделаны открытия, послужившие краеугольным камнем фундамента, на котором выросла новая наука - ядерная физика, благодаря которой XX в. назван Ядерным веком.

Следующим большим шагом вперед были исследования физиков Пьера Кюри и Марии Склодовской-Кюри. Они получили около 1 г нового химического элемента, радиоактивность которого оказалась в миллион раз выше, чем урана. Новый элемент получил название «радий» (от лат. radium — лучистый). За последующие 20 лет различные ученые обнаружили большинство химических элементов, обладающих естественной радиоактивностью.

Позже О. Хан и Ф. Ютрассман обнаружили в 1938 г., что атом урана при бомбардировке его нейтронами распадается на более легкие ядра, а К.А. Петряков и Г.Н. Флеров установили, что процесс деления ядер урана может происходить и самопроизвольно, без внешних воздействий. В дальнейшем эти положения легли в основу создания ядерных реакторов — специальных установок для осуществления цепной реакции деления.

Изучать биологическое действие невидимых радиоактивных излучений стали много позже. Первыми это испытали на себе исследователи, работавшие с радиоактивными веществами, не зная об их разрушительном биологическом действии.

А. Беккерель не только первым установил факт естественной радиоактивности, но и первым ощутил повреждающее действие радиации. Он в течение 6 ч носил в кармане жилета стеклянную пробирку с солями радия, подготовленную для демонстрации его свойств на конференции, а спустя 2 недели у него на коже под карманом образовалась длительно не заживающая язва. Это было первым столкновением человека с действием ионизирующего излучения.

Уже через год после открытия В.К. Рентгена, в 1896г., русский ученый И.П. Тарханов писал: «Х-лучами можно не только фотографировать, но и влиять на ход жизненных функций».

На основе таких открытий возникла еще одна новая наука - радиобиология.

Одним из основоположников радиобиологии по праву считается русский ученый Е. С. Лондон, который уже в 1903 г. описал смертельное действие лучей радия на организм некоторых животных, а впоследствии продемонстрировал высокую чувствительность кроветворных органов и половых желез к этому излучению.

☞ В 1904 г. Г. Петерсом обнаружено повреждение хромосом при облучении делящихся клеток радием, а в 1908 г. А. Бенжамином и А. Слюком установлено угнетение под воздействием ионизирующих излучений защитных сил организма — иммунитета.

История познания человеком радиоактивных свойств материи окрашена в трагические тона. Человечество дорогой ценой заплатило за полученные сведения - ценой здоровья и жизни первых исследователей и первых врачей-рентгенологов. За первые 40 лет развития рентгенологии погибло более 200 врачей и рентгентехников от так называемого рентгеновского рака, вызванного рентгеновским облучением.

☞ Нельзя без глубокого волнения читать трагические истории болезни таких ветеранов рентгенологии, как американец Уолтер Додд, который умер после 46 операций в страшных мучениях от рака, вызванного рентгеном. Человечество чтит память немецкого рентгенолога Альберс-Шенберга, русского ученого С.В. Гольдберга, французского исследователя Ж. Бергонье и многих других, погибших от лучевых воздействий. В 1936 г. в Гамбурге был воздвигнут монумент, на котором высечены имена 110 ученых и инженеров, ставших жертвами первых экспериментов по изучению рентгеновских лучей. В 1959 г. в Германии издана «Книга почета», куда занесены фамилии 360 врачей, физиков, лаборантов и медицинских сестер разных наций, в том числе 13 наших соотечественников, умерших от отдаленных последствий профессионального облучения.

Люди никогда не забудут трагедии Хиросимы, Нагасаки, Чернобыля, не только унесших одновременно жизни сотен тысяч людей, но продолжающие еще и сегодня творить свое черное дело — вызывать у облученных людей лейкозы и злокачественные опухоли.

Радиоактивное излучение и его воздействие на человека стали в последние десятилетия для многих регионов планеты одним из основных токсикантов окружающей среды.

Что же такое ионизирующие излучения?

Электромагнитный спектр излучений, известных в природе, включает волны различной длины — от очень длинных волн, возникающих, например, при работе электрогенераторов, до очень коротких — рентгеновских и космических лучей.

Отрицательное влияние излучений различной природы на здоровье человека зависит от длины волны. Последствия, которые чаще всего имеют в виду, говоря о повреждающих эффектах облучения — радиационное поражение и различные формы рака, — вызываются

более короткими волнами. Эти типы излучений - рентгеновские лучи, у-лучи и космические лучи — известны как ионизирующая радиация. В отличие от этого более длинные волны — от ближнего ультрафиолета (УФ) до радиоволн, микроволн и далее - называют неионизирующим излучением; его влияние на здоровье человека иное.

Неионизирующее излучение усиливает тепловое движение молекул в живой ткани. Это приводит к повышению температуры ткани и может вызвать ожоги и катаракты, а также аномалии развития утробного плода. Не исключена возможность разрушения биологических структур, например клеточных мембран, для нормального функционирования которых необходимо упорядоченное расположение молекул. Возможны последствия и более глубокие, хотя экспериментальных свидетельств этого пока недостаточно.

Известно, что каждый орган человека работает на определенной частоте: сердце - 700...800 Гц, печень - 300...400, мозг в зависимости от степени возбуждения - от 10 до 50 Гц и т.д. Если на область сердца будет воздействовать источник излучения, работающий на аналогичной или кратной частоте, то он может либо увеличить, либо «погасить» частоту, которая является для сердца нормой. Повышение частоты колебаний сердца до 1200 Гц приводит к стенокардии. Аналогичные изменения могут произойти и с другими органами.

Большая часть опытных данных по *неионизирующим излучениям* относится к радиочастотному диапазону. Эти данные показывают, что дозы выше 100 милливатт (мВт) на 1 см² вызывают прямое тепловое повреждение тканей, включая развитие катаракты — помутнение хрусталика глаза. При дозах от 10 до 100 мВт • см⁻² наблюдали термический

стресс, приводящий к врожденным аномалиям у потомков. При $1...10 \text{ мВтсм}^{-2}$ отмечались изменения в иммунной системе и гематоэнцефалическом барьере. При меньших дозах излучения не было достоверно установлено почти никаких последствий. Следует отметить, что рост использования микроволн в мире составляет около 15% в год. Помимо применения в бытовых микроволновых печах они используются в радарх и как средство передачи сигналов в телевидении, в телефонной и телеграфной связи, в компьютерах различных типов. Законы об охране труда рекомендуют, чтобы рабочие не подвергались воздействию выше 10 мВтсм^{-2} . Рентгеновские лучи, γ -лучи и космические лучи обладают достаточной энергией, чтобы высвободить электрон из атома, частью которого он был. В результате образуются ионы, воздействием которых на живые клетки и обусловлены изменения в организме человека.

Некоторые типы частиц, подобные испускаемым радиоактивными материалами, также вызывают образование ионов. Распад ядер нестабильных радиоактивных элементов порождает ионизирующие частицы и ионизирующее излучение.

Это свойство атомов химических веществ самопроизвольно превращаться в другие, испуская при этом или элементарные частицы, или фотоны, получило название радиоактивности. Образующиеся при этом разновидности атомов с иным массовым числом и другим атомным номером называют *нуклидами*.

Различают *естественную радиоактивность*, присущую радионуклидам, встречающимся в природе, например радиоактивность урана, тория и других элементов, и *искусственную*, свойственную радионуклидам, полученным искусственно в результате ядерных реакций.

Вещества, имеющие в своем составе радиоактивные нуклиды, называют *радиоактивными*. Физическая величина, характеризующая число радиоактивных распадов в единицу времени, называется *активностью нуклида*; чем больше радиоактивных превращений происходит в радиоактивном веществе - нуклиде - в единицу времени, тем выше его активность.

В зависимости от характера взаимодействия с веществом все ионизирующие излучения делятся на две группы.

К первой относят излучения, состоящие из заряженных частиц - α - и β -частиц, пучков электронов, протонов, тяжелых ионов и отрицательных пи-мезонов. Эти излучения вызывают ионизацию вещества непосредственно при столкновениях с атомами и молекулами, поэтому их называют иногда *непосредственно ионизирующими излучениями*.

Вторую группу составляют излучения, не имеющие электрических зарядов, — нейтронное, рентгеновское и γ -излучения. Они передают свою энергию в веществе сначала электронам и положительно заряженным ядрам атома, сталкиваясь с ними, а затем уже электроны и ядра атомов производят ионизацию атомов и молекул. Поэтому излучения этой группы называют *косвенно ионизирующими излучениями*.

Радиоактивные вещества обладают радиоактивностью только до тех пор, пока в них происходят ядерные превращения. По истечении определенного времени они становятся нерадиоактивными, превращаясь в стабильные изотопы.

Для оценки продолжительности жизни радионуклида введено понятие — *период полураспада* — время, в течение которого радиоактивность вещества (или число радиоактивных ядер) в среднем уменьшается вдвое. Период полураспада различных радионуклидов колеблется в широких пределах — от долей секунды до многих миллионов лет.

Периоды полураспада некоторых радионуклидов, внесших значительный вклад в облучение населения и загрязнение территории после черновыльсской катастрофы, приведены ниже:

йод-133 - 20,8 ч; йод-131 - 8,05 сут; цезий-144 - 284 сут; рутений-106 - 1 год; цезий-134 - 2,1 года; цезий-137 - 30 лет; стронций-90 - 28 лет; плутоний-239 - 20 000 лет.

Принято считать, что вещество становится нерадиоактивным по истечении 10 периодов полураспада.

Для измерения радиации существуют старые единицы — бэр, рад, кюри и новые — беккерель, грей, зиверт. Однако часто эти единицы используются с приставками — кило- (одна тысяча), мили- (одна тысячная), микро- (одна миллионная) или нано- (одна миллиардная), так как даже новые единицы слишком велики или малы для определения доз радиации, которые с их помощью приходится измерять.

Бэр — биологический эквивалент рентгена. Эта единица служит для измерения степени биологического повреждения, вызываемого ионизирующим излучением. Бэр учитывает относительную биологическую эффективность энергии, поглощенной живой тканью. Один бэр приблизительно равен одному рентгену ($1 \text{ р} = 0,88 \text{ бэр}$) и производит то же биологическое действие.

Рад - (от англ. «*radiation absorbed dose*») служит для измерения излучения, поглощенного организмом. Для β -, γ - и рентгеновского излучения 1 рад равен приблизительно 1 бэр. Для α -излучения 1 рад эквивалентен 10...20 бэр.

Кюри (Ки) — единица непосредственного измерения радиоактивности, то есть активности заданного количества определенного вещества. 1 Ки равен 37 млрд. распадов в секунду. Измеряя активность разных веществ, можно определить, какое из них является радиоактивным. 1 г радия-226 имеет активность, равную 1 Ки, а 1 г прометия-145 - активность, равную 940 Ки.

Беккерель (Бк) — единица радиоактивности, равная одному ядерному превращению (или распаду) в секунду. После аварии на Чернобыльской АЭС органы здравоохранения и радиационного контроля очень часто использовали эти единицы лишь для определения количества (концентрации) радиоактивного вещества в единице массы, объема или на единицу площади. В этих целях употреблялись нанокюри или беккерели на килограмм, литр, квадратный или кубический метр в зависимости от среды, в которой производились измерения радиоактивности вещества. Например, в овощах — Бк/кг, в молоке — Бк/л, в воздухе — Бк/м³ или на поверхности земли — Бк/м².

Грей (Гр) — единица измерения поглощенной дозы излучения, то есть величины энергии, поглощенной единицей массы облучаемого вещества. В соответствии с системой СИ $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг} = 100 \text{ рад}$.

Зиверт (Зв) - единица измерения эквивалентной дозы ионизирующего излучения. Один зиверт равен 100 бэр. Единица зиверт допускается только для измерения ионизирующего излучения в целях радиационной безопасности и при этом лишь для эквивалентных доз, не превышающих 250 Зв. Для характеристики суммарного биологического эффекта облучения единицей зиверт пользоваться нельзя, зато, наоборот, единицей грей в целях определения радиационной безопасности можно пользоваться без ограничений.

При характеристике единиц измерения применяют такие понятия, как «эквивалентная доза», «эффективная эквивалентная доза».

Эквивалентная доза — понятие, посредством которого учитывается неодинаковая биологическая активность различных видов излучения с помощью безразмерных оценочных коэффициентов, характеризующих радиационную биологическую активность, — коэффициентов качества излучения. Эквивалентная доза равна произведению поглощенной дозы на средний коэффициент качества ионизирующего излучения K в данном элементе объема биологической ткани.

При определении эквивалентной дозы ионизирующего излучения используют следующие значения коэффициента качества: рентгеновское и гамма-излучение — 1; бета-излучение — 1; тепловые (медленные) нейтроны - 2; быстрые нейтроны - 10; альфа-излучение -10...20.

Таким образом, эквивалентная доза определяется так:

$$1 \text{ рад} \times K = 1 \text{ бэр}; 1 \text{ Гр} \times K = 1 \text{ Зв}.$$

Для оценки ущерба здоровью человека при неравномерном облучении введено понятие эффективной эквивалентной дозы $H_{\text{эф}}$, применяемой при оценке возможных стохастических эффектов — злокачественных новообразований:

$$H_{\text{эф}} = W_T \cdot H_T,$$

где W_T — взвешенный коэффициент, равный отношению ущерба облучения органа или ткани к ущербу облучения всего тела при одинаковых эквивалентных дозах; H_T — среднее значение эквивалентной дозы в органе или ткани.

Для оценки ущерба от стохастических эффектов воздействия ионизирующих излучений на персонал или население используют *коллективную эквивалентную дозу* S , равную произведению индивидуальных эквивалентных доз на число лиц, подвергшихся облучению. Единица коллективной эквивалентной дозы — человек-зиверт (чел.-Зв).

Летальная доза (ЛД) — доза, определяющая процент смертности после радиационного облучения. Например, $ЛД_{50}$ — доза, после получения, которой погибает 50% облученных. $ЛД_{50}^{30}$ означает, что в результате облучения погибнет 50% в течение 30 сут. Для людей доза $ЛД_{50}^{30}$ находится в пределах 4...5 Зв (400...500 бэр).

2. Источники и пути поступления радионуклидов в организм

До середины XX в. природные источники ионизирующих излучений были единственными в облучении человека, создавая естественный радиационный фон (ЕРФ). В среднем доза облучения от всех естественных источников ионизирующего излучения составляет в год около 200 мР, хотя это значение может колебаться в разных регионах земного шара от 50 до 1000 мР/год и более.

Основным дозообразующим компонентом ЕРФ является земное излучение от естественных радионуклидов, существующих на протяжении всей истории Земли. От этих источников человек подвергается воздействию как *внешнего* (в результате излучения радионуклидов, находящихся в окружающей среде), так и *внутреннего облучения* (за счет радионуклидов, попадающих внутрь организма с воздухом, водой и продуктами питания). Большинство исследователей считают, что наибольшее значение имеют источники внутреннего облучения, которые обуславливают, по данным разных авторов, примерно от 50 до 68% естественного радиационного фона.

Основное значение во внутреннем облучении имеют поступающие с воздухом, водой и продуктами питания радионуклиды семейств урана-238 и тория-232, их многочисленные дочерние продукты, а также изотоп калия — калий-40.

Радон — один из первых открытых человеком радионуклидов. Этот благородный газ образуется при распаде изотопа ^{226}Ra и поступает в организм ингаляционным путем. Человек контактирует с радоном везде, но главным образом в каменных и кирпичных жилых зданиях (особенно в подвальных помещениях и на первых этажах), поскольку главным источником является почва под зданием и строительные материалы. Радиоактивность (мкЗв/год) строительных материалов такова: дерево 0; известняк, песчаник 0—100; кирпич, бетон 100—200; естественный камень, производственный гипс 200—400; шлаковый камень, гранит 400—2000. Высокое содержание радона может быть в подземных водах. Доступным и эффективным способом удаления радона из воды является ее аэрация.

В результате производственной деятельности человека, связанной с добычей полезных ископаемых, сжиганием органического топлива, созданием минеральных удобрений и т. п., произошло обогащение атмосферы естественными радионуклидами, причем естественный радиационный фон постоянно меняется.

Средняя величина эффекта естественными источниками ионизирующих излучений примерно была равна 1 мЗв (100 мбэр). Однако с учетом техногенно усиленного фона, по данным ООН, значение эффективной эквивалентной дозы облучения увеличилось в 2 раза — до 2 мЗв (200 мбэр) в год (1982 г.).

С момента овладения человеком ядерной энергией в биосферу начали поступать радионуклиды, образующиеся на АЭС, при производстве ядерного топлива и испытаниях ядерного оружия. Таким образом, встал вопрос об искусственных радионуклидах и особенностях их влияния на организм человека. Среди радионуклидов искусственного проис-

хождения выделяют 21 наиболее распространенный, 8 из которых составляют основную дозу внутреннего облучения населения: ^{14}C , ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{89}Sr , ^{106}Ru , ^{144}Ce , ^{131}I , ^{95}Zr .

Следует отметить, что в наиболее развитых странах уровень фоновой радиации достигает 3...4 мЗв в год. Кроме того, за 15 лет (с 1971 по 1986 г.) в 14 странах мира на предприятиях атомной промышленности произошло 152 аварии разной степени сложности, с разными последствиями для населения и окружающей среды. Крупные аварии произошли в Великобритании, США и СССР, где самой крупной по масштабам загрязнения окружающей среды явилась авария, которая произошла в 1986 г. на Чернобыльской АЭС. Выбросы в атмосферу при аварии на ЧАЭС имели специфический состав - в первые недели после взрыва основным был радиоактивный йод, затем радиоизотопы цезия-137, цезия-134, стронция-90.

Для случаев возникновения радиационных аварий были разработаны *временно допустимые уровни (ВДУ) и допустимые уровни (ДУ)* поступления радионуклидов внутрь организма с учетом интегральных поглощенных доз за ряд последующих лет. Величину ВДУ активности радиоактивных веществ в продуктах питания в этих условиях рассчитывают, исходя из того, чтобы интегральные дозы облучения тела человека не превысили 0,1 Зв/год, а дозы облучения щитовидной железы — 0,3 Зв/год.

Следует отметить, что допустимый уровень (ДУ) активности радиоактивного цезия в молочных продуктах, принятый в странах Европы, колеблется в пределах от 370 Бк/кг (ФРГ) до 4000 Бк/кг (Великобритания, Франция, Испания). В Японии величина принятого ДУ активности радиоактивного цезия в молочных продуктах наименьшая — 37 Бк/кг.

Комиссия Codex Alimentarius ФАО/ВОЗ приняла, что допустимые уровни радиоактивных веществ в загрязненных пищевых продуктах, реализуемых на международном рынке и предназначенных для всеобщего потребления, составляют: для цезия и йода — 1000 Бк/кг, для стронция — 100 Бк/кг, для плутония и америция — 1 Бк/кг.

Для молока и продуктов детского питания допустимые уровни активности составляют: для цезия - 1000 Бк/кг, для стронция и йода - 100 Бк/кг, для плутония и америция - 1 Бк/кг. По мнению ВОЗ, предлагаемые уровни основаны на критериях, обеспечивающих охрану здоровья и безопасность населения.

Следует, однако, подчеркнуть, что, поскольку у человека в процессе эволюции не выработались специальные защитные механизмы от ионизирующих излучений, с целью предотвращения неблагоприятных последствий для населения, по рекомендации Международной комиссии по радиационной защите ожидаемая эффективная эквивалентная доза не должна превышать 5 мЗв за любой год радиоактивного воздействия.

Пути поступления радионуклидов в организм человека с пищей достаточно сложны и разнообразны. Можно выделить следующие из них: растение - человек; растение - животное - молоко - человек; растение - животное — мясо - человек; атмосфера — осадки - водоемы - рыба - человек; вода - человек; вода - гидробионты - рыба - человек.

Различают *поверхностное* (воздушное) и *структурное* загрязнение пищевых продуктов радионуклидами.

При поверхностном загрязнении радиоактивные вещества, переносимые воздушной средой, оседают на поверхности продуктов, частично проникая внутрь растительной ткани. Более эффективно радиоактивные вещества удерживаются на растениях с ворсистым покровом и с разветвленной наземной частью, в складках листьев и соцветиях. При этом задерживаются не только растворимые формы радиоактивных соединений, но и нерастворимые. Однако поверхностное загрязнение относительно легко удаляется даже через несколько недель.

Структурное загрязнение радионуклидами обусловлено физико-химическими свойствами радиоактивных веществ, составом почвы, физиологическими особенностями растений. Радионуклиды, выпавшие на поверхности почвы, на протяжении многих лет остаются в ее верхнем слое, постоянно мигрируя на несколько сантиметров в год в более глубокие

слои. Это в дальнейшем приводит к их накоплению в большинстве растений с хорошо развитой и глубокой корневой системой.

Большой интерес, на наш взгляд, представляют данные о степени накопления радионуклидов в тканях растений, используемых человеком и животными в пищу.

Растения по степени накопления радиоактивных веществ располагаются в следующем порядке: табак (листья) > свекла (корнеплоды) > картофель (клубнеплоды) > пшеница (зерно) > естественная травяная растительность (листья и стебли). Быстрее всего из почвы в растения поступает стронций-90, стронций-89, йод-131, барий-140 и цезий-137.

Кроме пищевого имеются многие другие пути поступления радионуклидов в организм. К основным путям относят воздушный и кожный. Однако наибольшее значение имеет пищевой (алиментарный) путь. Лишь в период рассеивания радионуклидов после аварии или выброса в атмосферу наиболее опасен воздушный путь из-за большого объема легочной вентиляции и высокого коэффициента захвата и усвоения организмом изотопов из воздуха. В зависимости от природы радионуклида и химических его соединений процент всасывания его в пищеварительном тракте колеблется от нескольких сотых (цирконий, ниобий, редкоземельные элементы, включая лантаниды) до нескольких единиц (висмут, барий, поло-

ний), десятков (железо, кобальт, стронций, радий) и до сотен (третий, натрий, калий) процентов. Всасывание через неповрежденную кожу, как правило, незначительно. Только третий легко всасывается в кровь через кожу. Затем радионуклиды распределяются в организме человека в соответствии с их химическими свойствами.

3. Биологическое действие ионизирующих излучений на человеческий организм

Существуют три пути попадания радиоактивных веществ в организм человека: а) при вдыхании воздуха, загрязненного радиоактивными веществами; б) через желудочно-кишечный тракт — с пищей и водой; в) через кожу.

Для наиболее опасных искусственных радионуклидов, к которым следует отнести долгоживущие ^{90}Sr , ^{137}Cs и короткоживущий ^{131}I , в настоящее время выявлены закономерности всасывания, распределения, накопления и выделения, а также механизмы их связи с различными биологическими структурами. Одной из главных задач по профилактике и снижению степени внутреннего облучения следует считать уменьшение всасывания радиоактивных элементов при их длительном поступлении в организм человека с пищевыми продуктами.

Эффект действия ионизирующих излучений на клетку и организм в целом можно понять, проследив изменения, происходящие на всех этапах следующей цепи: биомолекулы-клеточный компартмент—клетка-ткани—организм, и установив взаимосвязь между ними.

Клетка — это сложенная динамическая система биологически важных макромолекул, которые скомпонованы в компартменты (субклеточные образования), выполняющие определенные физиологические функции.

Наиболее чувствительными к облучению органеллами клеток организма млекопитающих являются ядро и митохондрии. Здесь повреждения проявляются в малые сроки и при малых дозах. Наиболее всего угнетаются процессы окислительного фосфорилирования, изменяются физико-химические свойства нуклеопротеидов, в результате чего происходят количественные и качественные изменения в ДНК, нарушаются процессы транскрипции и трансляции. Кроме этого, угнетаются энергетические процессы, выброс в цитоплазму ионов K^+ и Na^+ , нарушаются функции мембран. Одновременно возможны все виды мутаций: геномные мутации (кратные изменения гаплоидного числа хромосом), хромосомные мутации или хромосомные абберрации (структурные или численные изменения хромосом), генные или точковые мутации (изменения молекулярной структуры генов, в результате чего синтезируются белки, утратившие свою биологическую активность).

В зависимости от распределения в тканях организма различают остеотропные радионуклиды, накапливающиеся преимущественно в костях, — радиоизотопы стронция, кальция, бария, радия, иттрия, циркония, плутония; концентрирующиеся в печени (до 60%) и частично в костях (до 25%) — церий, лантан, прометий; равномерно распределяющиеся в тканях организма — тритий, углерод, железо, полоний; накапливающиеся в мышцах — калий, рубидий, цезий; селезенке и лимфатических узлах — ниобий, рутений. Радиоизотопы йода избирательно накапливаются в щитовидной железе, где их концентрация может быть в 100...200 раз выше, чем в других органах и тканях.

Механизм воздействия ионизирующего излучения на биологические объекты, в том числе и на человека, подразделяют на несколько этапов.

На первом - физико-химическом - этапе, который продолжается тысячные и миллионные доли секунды, в результате поглощения большого количества энергии излучения образуются ионизированные, активные в химическом отношении атомы и молекулы. Возникает множество радиационно-химических реакций, приводящих к разрыву химических связей. Вследствие первичной ионизации в воде образуются свободные радикалы (H^+ , $OH^{\cdot}$, HO_2 , H_2O_2 и др.). Обладая высокой химической активностью, они реагируют с ферментами и тканевыми белками, окисляя или восстанавливая их, что приводит к разрушению молекул белка, изменению ферментных систем, расстройству тканевого дыхания — глубокому нарушению биохимических и обменных процессов в органах и тканях и накоплению токсичных для организма соединений.

Следующий, второй, этап связан с воздействием ионизирующего излучения на клетки организма и продолжается от нескольких секунд до нескольких часов. Поражаются различные структурные элементы ядер клеток, в первую очередь дезоксирибонуклеиновая кислота (ДНК).

Происходит повреждение хромосом, которые являются ответственными за передачу наследственной информации. При этом воз-

никают хромосомные aberrации - поломки, перестройка и фрагментация хромосом, обуславливающие отдаленные онкогенные и генетические последствия.

Третий этап характеризуется воздействием излучения на организм в целом. Его первые проявления могут возникать уже через несколько минут (в зависимости от полученной дозы), усиливаться в течение нескольких месяцев и реализовываться через многие годы.

Чувствительность различных органов и тканей человека к ионизирующему излучению неодинакова. Для одних тканей и клеток характерна большая радиочувствительность, для других, наоборот, большая радиоустойчивость. Наиболее чувствительны к облучению кроветворная ткань, незрелые форменные элементы крови, лимфоциты, железистый аппарат кишок, половые железы, эпителий кожи и хрусталик глаза; менее чувствительны — хрящевая и фиброзная ткани, паренхима внутренних органов, мышцы и нервные клетки.

Радиочувствительность различных клеток варьирует в широких пределах, достигая десятикратных различий между наибольшими и наименьшими значениями повреждающих доз. Молодые клетки соединительной ткани полностью лишаются способности к восстановлению при облучении в дозе около 40 Гр, кроветворные клетки костного мозга полностью погибают уже при дозе 6 Гр.

Поражающее действие ионизирующего излучения зависит от целого ряда факторов. Во-первых, оно носит строго количественный характер, т.е. зависит от дозы. Во-вторых, существенную роль играет и характеристика мощности дозы радиационного воздействия: одно и то же количество энергии излучения, поглощенное клеткой, вызывает тем большее повреждение биологических структур, чем короче срок облучения. Большие дозы воздействия, растянутые во времени, вызывают существенно меньшие повреждения, чем те же дозы, поглощенные за короткий срок.

Таким образом, эффект облучения зависит от величины поглощенной дозы и временного распределения ее в организме. Облучение может вызвать повреждения от не-

значительных, не дающих клинической картины, до смертельных. Однократное острое, а также пролонгированное, дробное или хроническое облучение, увеличивает риск отдаленных эффектов - рака и генетических нарушений (табл. 40).

Оценка риска проявления злокачественных опухолей в значительной мере основана на результатах обследования пострадавших при атомных бомбардировках Хиросимы и Нагасаки и подтверждается результатами обследований, пострадавших от аварии на Чернобыльской АЭС.

Острое облучение в дозе 0,25 Гр еще не приводит к заметным изменениям в организме. При дозе 0,25...0,50 Гр наблюдаются изменения показателей крови и другие незначительные нарушения. Доза 0,5... 1 Гр вызывает более значительные изменения показателей крови — снижение числа лейкоцитов и тромбоцитов, изменение показателей обмена, иммунитета, вегетативные нарушения. Пороговой дозой, вызывающей острую лучевую болезнь, принято считать 1 Гр.

Опасность внутреннего облучения обусловлена попаданием и накоплением радионуклидов в организме через продукты питания. Биологические эффекты воздействия таких радиоактивных веществ аналогичны внешнему облучению.

Длительность внутреннего и внешнего облучения тканей зависит от периода полураспада радионуклида T и периода его полувыведения из организма T_6 . С учетом этих двух показателей вычисляется *эффективный период* $T_{эф}$, в течение которого активность радионуклида уменьшается вдвое:

$$T_{эф} = T \cdot T_6 / T + T_6.$$

У разных радионуклидов $T_{эф}$ колеблется от нескольких часов и суток (например, ^{131}I) до десятков лет (^{90}Sr , ^{137}Cs) и десятков тысяч лет (^{239}Pu).

Биологическое действие радиоактивных веществ различных химических классов избирательно.

Йод. Природный изотоп — ^{127}I . Известны радиоактивные изотопы с массовыми числами от 115 до 126 и от 128 до 141. Применяют йод в физической химии, биологии и особенно широко в медицине для диагностики и лечения (^{131}I и ^{125}I).

В первые недели после аварии на ЧАЭС основным дозообразующим радионуклидом был радиоактивный йод-131.

Радиоактивные изотопы йода могут поступать в организм человека через органы пищеварения, дыхания, кожу, раневые и ожоговые поверхности. Основными цепочками миграции йода являются растение — человек; растение - животное - молоко — человек; растение - животное - мясо — человек; растение — птица — яйцо — человек; вода - гидробионт - человек.

Поступающий в организм радиоактивный йод быстро всасывается в кровь и лимфу. В течение первого часа в верхнем отделе тонкого кишечника всасывается от 80 до 90% йода. Органы и ткани по накоплению йода образуют убывающий ряд: щитовидная железа > почки > печень > мышцы > кости;

Накопление ^{131}I в щитовидной железе протекает быстро: через 2 и 6 ч после поступления в организм содержание радионуклида составляет 5...10 и 15...20% соответственно, через сутки — 25...30% введенного количества. Снижение уровня гормонов в организме под воздействием радиоактивного йода, их неполноценность, а также возрастающая при этом потребность в них приводят к нарушению нейроэндокринных коррелятивных связей в звене гипофиз - щитовидная железа с последующим вовлечением в процесс и других эндокринных органов.

Основным путем выведения йода из организма являются почки. Из организма в целом, щитовидной железы, печени, почек, селезенки, скелета йод выводится с T_6 , равным 138, 138, 7, 7, 7 и 12 сут. соответственно.

Меры профилактики и помощи при поступлении радиоактивного йода в организм заключаются в ежесуточном потреблении солей нерадиоактивного йода — йодида калия

— 0,2 г, йодида натрия — 0,2 г, сайодина — 0,5 г или тереостатиков (мерказолил 0,01 г, 6-метилтиоурацил 0,25 г, перхлорат калия 0,25 г).

Цезий. Природный цезий состоит из одного стабильного изотопа ^{133}Cs , и 23 радиоактивных изотопов с массовыми числами от 123 до 132 и от 134 до 144. Наибольшее значение имеет радиоактивный изотоп ^{137}Cs . Согласно прогнозу, в 2000 г. от АЭС всех стран мира в атмосферу ежегодно будет выбрасываться до 22,2-10⁴ Бк ^{137}Cs .

Cs поступает в организм человека преимущественно с пищевыми продуктами (через органы дыхания попадает примерно 0,25% его количества). ^{137}Cs практически полностью всасывается в пищеварительном тракте. Примерно 80% его откладывается в мышечной ткани, 8% - в костях.

По степени концентрирования ^{137}Cs все ткани и органы распределяются следующим образом: мышцы > почки > печень > кости > мозг > эритроциты > плазма крови. Около 10% ^{137}Cs быстро экскретируется из организма, 90% его выводится более медленными темпами.

Биологический период полувыведения этого радионуклида у взрослых колеблется от 10 до 200 сут, составляя в среднем 100 сут, и поэтому содержание его в организме человека практически полностью определяется его поступлением с пищевыми продуктами в течение года и, следовательно, зависит от степени загрязненности продуктов ^{137}Cs .

В Российской Федерации радиационная безопасность пищевой продукции определяется ее соответствием допустимым уровням удельной активности цезия-137.

При увеличении содержания в пищевом рационе солей калия, натрия, а также воды, пищевых волокон происходит ускорение выведения цезия-137 и замедление его всасывания. Эта особенность обмена позволила разработать высокоэффективные адсорбенты - протекторы, такие как берлинская лазурь, пектиновые вещества и другие, связывающие ^{137}Cs в пищеварительном тракте и тем самым ускоряющие его выделение из организма.

Стронций. Природный стронций, как и другие радионуклиды, состоит из смеси стабильных и нестабильных изотопов. Как аналог кальция стронций активно участвует в обмене веществ у растений. Относительно большое количество радиоактивного изотопа ^{90}Sr накапливают бобовые культуры, корне- и клубнеплоды, злаки.

Радионуклид ^{90}Sr поступает в организм через желудочно-кишечный тракт, легкие и кожу. Уровни всасывания стронция из желудочно-кишечного тракта колеблются от 5 до 100%. Стронций быстро всасывается в кровь и лимфу из легких. Через 5 мин после введения в легкие изотопа стронция в количестве 1,48-10⁴ Бк/г в легких остается 33,3% введенного количества, через сутки - 0,39%.

Важное значение при выведении стронция из желудочно-кишечного тракта имеет диета. Величина его всасывания уменьшается с повышением содержания солей кальция и фосфора в питании, а также при введении высоких доз тироксина.

Независимо от пути поступления в организм растворимые соединения радиоактивного стронция избирательно накапливаются в скелете. В мягких тканях задерживается менее 1%, остальное количество откладывается в костной ткани. Со временем в костях концентрируется большое количество стронция, располагающегося в различных слоях костной ткани, а также в зонах ее роста, что приводит к формированию в организме участков с высокой радиоактивностью. Биологический период полувыведения ^{90}Sr из организма составляет от 90 до 154 сут.

Именно стронций-90 в первую очередь вызывает лейкемию. В организм человека стронций-90 попадает преимущественно с растительной пищей, молочными продуктами и яйцами. Радиационное поражение организма стронцием-90 увеличивается за счет его дочернего продукта иттрия - иттрия-90. Уже через месяц активность иттрия-90 практически достигает равновесного значения и становится равной активности стронция-90 и в дальнейшем определяется периодом полураспада стронция-90. Наличие в организме пары Sr-90/Y-90 может вызвать поражение половых желез, гипофиза и поджелудочной железы.

Допустимые уровни стронция-90 в пищевых продуктах в соответствии с требованиями СанПиН 2.3.2. 560-96.

4. Технологические способы снижения содержания радионуклидов в пищевой продукции

Уменьшение поступления радионуклидов в организм с пищей можно достичь путем снижения их содержания в продуктах при помощи различных технологических или агроотехнических приемов, а также моделирования питания, т.е. использования рационов, содержащих их минимальное количество.

За счет обработки пищевого сырья - тщательного мытья, чистки продуктов, отделения малоценных частей можно удалить от 20 до 60% радионуклидов. Так, перед мытьем некоторых овощей целесообразно удалять верхние наиболее загрязненные листья (капуста, лук репчатый и др.). Картофель и корнеплоды обязательно моют дважды: перед очисткой от кожуры и после.

Наиболее предпочтительным способом кулинарной обработки пищевого сырья в условиях повышенного загрязнения окружающей среды радиоактивными веществами является варка. При отваривании значительная часть радионуклидов переходит в отвар. Использовать отвары в пищу нецелесообразно. Для получения отвара нужно варить продукт в воде 10 мин, а затем слить воду и продолжать варку в новой порции воды. Такой отвар уже можно использовать в пищу, например, он приемлем при приготовлении первых блюд.

Мясо перед приготовлением в течение двух часов следует замочить в холодной воде, порезав его небольшими кусками, затем снова залить холодной водой и варить при слабом кипении в течение 10 мин, слить воду и в новой порции воды варить до готовности. При жарении мяса и рыбы происходит их обезвоживание и на поверхности образуется корочка, препятствующая выведению радионуклидов и других вредных веществ. Поэтому при вероятности загрязнения пищевых продуктов радиоизотопами следует отдавать предпочтение отварным мясным и рыбным блюдам, а также блюдам, приготовленным на пару.

На выведение радионуклидов из продукта в бульон влияют солевой состав и реакция воды. Так, выход ^{90}Sr в бульон из кости составляет (в процентах от активности сырого продукта): при варке в дистиллированной воде — 0,02; в водопроводной — 0,06; в водопроводной с лактатом кальция — 0,18.

Питьевая вода из централизованного водопровода обычно не требует какой-либо дополнительной обработки. Необходимость дополнительной обработки питьевой воды из шахтных колодцев состоит в ее кипячении в течение 15...20 мин. Затем следует ее охладить, отстоять и осторожно, не взмучивая осадка, перелить прозрачный слой в другую посуду.

Существенного снижения содержания радионуклидов в молочных продуктах можно достичь путем получения из молока жировых и белковых концентратов. При переработке молока в сливках остается не более 9% цезия и 5% стронция, в твороге - 21% цезия и около 27% стронция, в сырах — 10% цезия и до 45% стронция. В сливочном масле всего около 2% цезия от его содержания в цельном молоке.

Для выведения уже попавших в организм радионуклидов необходима высокобелковая диета. Употребление белка должно быть увеличено не менее чем на 10% от суточной нормы, для восполнения носителей SH-групп, окисляемых активными радикалаобразующими радионуклидами. Источниками белковых веществ кроме мяса и молочных продуктов являются продукты из семян бобовых растений, морская рыба, а также крабы, креветки и кальмары.