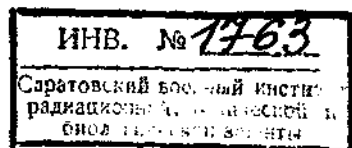


Ю. П. ПИВОВАРОВ, В. П. МИХАЛЕВ

РАДИАЦИОННАЯ ЭКОЛОГИЯ

Рекомендовано

*Учебно-методическим объединением по образованию
в области экологии и устойчивого развития
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по специальности «Экология»*



Москва

ACADEMA
2004

УДК 574(075.8)

ББК 20.1я73

П32

Рецензенты:

зав. лабораторией экологии человека объединения «Родон»,

д-р мед. наук, профессор *В. Ф. Кириллов*;

профессор кафедры рационального природопользования географического факультета МГУ, д-р биол. наук *Е. Н. Голубева*

Пивоваров Ю. П.

П32 Радиационная экология: Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Ю. П. Пивоваров, В. П. Михалев. — М.: Издательский центр «Академия», 2004. — 240 с.

ISBN 5-7695-1466-3

Изложены основы радиационной экологии. Даны представления об источниках и структуре радиационных воздействий, метаболизме основных радионуклидов в экосистемах и их звеньях. Проанализированы вероятные последствия дополнительных радиационных воздействий на уровнях клеток, организмов, экосистем. Описаны методы экологического и санитарного контроля дополнительных техногенных радиационных воздействий, защиты и основ профилактики изменений в метаболизме биосфер, неблагоприятных реакций населения, испытывающих дополнительные радиационные воздействия от аварии на Чернобыльской АЭС.

Для студентов высших профессиональных учебных заведений.

УДК 574(075.8)

ББК 20.1я73

© Ю. П. Пивоваров, В. П. Михалев, 2004

© Образовательно-издательский центр «Академия», 2004

© Оформление. Издательский центр «Академия», 2004

ISBN 5-7695-1466-3

Радиационная обстановка на Земле за последние 60—70 лет подверглась существенным изменениям: к началу Второй мировой войны во всех странах мира имелось около 10—12 г полученного в чистом виде естественного радиоактивного вещества — радия. В наши дни один ядерный реактор средней мощности производит 10 т искусственных радиоактивных веществ, большая часть которых, правда, относится к короткоживущим изотопам, имеющим период полураспада от нескольких долей секунды до нескольких часов или дней. После выработки ядерного топлива реакторами АЭС, подводных и надводных кораблей, научно-исследовательских центров остаются сотни тонн радиоактивных отходов, требующих утилизации. Радиоактивные вещества и источники ионизирующего излучения используются практически во всех отраслях промышленности, в здравоохранении, при проведении самых разнообразных научных исследований. Все это накладывается на изменения в естественной природной среде нашей планеты, возникшие за годы испытаний ядерного оружия.

В течение почти 40 лет ядерных испытаний на Земле происходило накопление радиоактивности. В биосферу было выброшено 12,5 т продуктов деления. Взрывы изменили равновесное содержание в атмосфере углерода-14 на 2,6 %, трития почти в 100 раз. К концу испытаний ядерного оружия в атмосфере радиоактивное загрязнение на поверхности Земли на 2 % превысило естественный фон. Еще больше нарастает уровень радиации в результате аварий, производства и удаления радиоактивных отходов. Так, авария на Чернобыльской АЭС привела к выбросу в биосферу до 15 т радиоактивных веществ, что равно или даже превышает выброс за все годы испытаний атомного оружия в атмосфере. В результате радиоактивная загрязненность отмечена во многих странах, но особенно велика она на ряде территорий Украины, Белоруссии и России.

В результате аварий сегодня на дне Мирового океана находятся шесть атомных подводных лодок с девятью атомными реакторами и 50 ядерными боеголовками. С целью захоронения радиоактивных отходов только США с 1946 по 1970 г. сбросили в океан более 86 тыс. контейнеров суммарной радиоактивностью около 95 кКи. Захоронением радиоактивных отходов в морях занимались и Бельгия, Великобритания, Нидерланды, Швеция, Франция, Ита-

лия, Германия, Швеция, СССР. Все это представляет огромную потенциальную экологическую опасность.

Ядерные и, прежде всего, военные источники энергии, особенно в период наземных ядерных испытаний, ядерно-энергетических аварий (общее число которых ≤ 150), несмотря на меньшую степень опасности вредного воздействия на население по сравнению с химическими факторами загрязнения среды и малую вероятность деформации атмосферы, гидросферы, почв, климата, растительного и животного мира, вызывают серьезную тревогу экологов. Даже при незначительных, по принятым критериям и накопленному опыту оценок (Хиросима—Нагасаки, Три-Майл-Айленд), размерах радиоактивных загрязнений, спектры и энергия излучений от источников ядерного происхождения, характер их метаболизма в почвах, растительности, организмах значительно отличается от метаболизма естественных излучателей этого ряда (от ^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th). Такая биологическая и экосистемная новизна факторов выявляет при длительных хронических воздействиях на экосистемы и ее составляющие, в том числе обширные группы населения, ряд ранее не известных эффектов. Новизна таких открытий ведет порой к паническим заключениям, резко усиленным «чернобыльским синдромом» страха радиационных аварий. Размеры вреда, наносимого радиационным фактором ядерно-энергетического происхождения, превосходят, по мнению авторов, последствия всей суммы техногенных дорадиационных воздействий среды.

Искусственная выемка таких радиогенных реакций из всего спектра экосистемных взаимодействий, неучтенность степени «чистоты» радиационного фактора, отсутствие сравнительного анализа последствий воздействия факторов радиационных и нерадиационных технологий могут привести к крайне необъективным оценкам.

Решение этих крайне актуальных проблем и возложено на один из новейших разделов радиационной медицины и биологии — радиационную экологию — науку, исследующую взаимодействия радиационных факторов среды с отдельными составляющими экосистем (популяциями, сообществами, биоценозами) и экосистемами в целом, с целью выявления их закономерностей, про-



Основоположник радиационной экологии Николай Владимирович Тимофеев-Ресовский (1900—1981)

Связь между некоторыми системными (СИ) и внесистемными единицами

Характеристика излучения	Единица СИ	Внесистемная единица	Связь между единицами
Активность	Беккерель (Бк) – = 1 распад/с	Кюри (Ки)	1 Ки = $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк
Доза: экспозиционная	Кулон на килограмм (Кл/кг)	Рентген (Р)	1 Р = $2,58 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг
поглощенная	Грей (Гр) – = 0,01 Дж/кг	рад	1 рад = 0,01 Гр
эквивалентная	Зиверт (Зв)	бэр	1 бэр = 0,01 Зв

гнозирования и разработки мер профилактики патологических реакций экосистемного уровня.

Основателем радиационной экологии как науки следует признать российского ученого Н. В. Тимофеева-Ресовского, который в 1955 г. впервые выявил воздействие радиационных факторов на расслоение эволюционно согласованных внутрибиоценозных межвидовых взаимодействий.

Однако возникновению этой науки предшествовал ряд других открытий и явлений, способствовавших возникновению и развитию ядерной физики — фундаментальной науки, и радиационной гигиены — прикладной, направленной на защиту прежде всего населения от неблагоприятного воздействия радиационных факторов (см. прил. 1).

За более чем 100 лет изучения радиоактивных веществ и источников ионизирующих излучений и их влияния на живые организмы, включая человека, претерпели изменения отдельные принципы, подходы, исключались ранее используемые и вводились новые единицы измерения радиоактивности и доз излучения (см. гл. 5). Вместе с тем указанные изменения затрудняют сопоставление ранее полученных и современных данных по изучаемым вопросам, прежде всего, из-за выражения их в разных единицах. В табл. В.1 приведена связь между системными (СИ) и внесистемными единицами.

РАДИАЦИОННО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕСТЕСТВЕННЫХ И ИСКУССТВЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ФОНОВЫХ РАДИАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ (РАДИАЦИОННЫЙ ФОН ЗЕМЛИ)

Естественные и искусственные радиоактивные вещества достаточно равномерно распределены в окружающей среде (за исключением аномальных геологических и антропогенных районов повышенной радиоактивности) и являются ее активными метаболитами. Началом такого метаболизма служат реакции испускаемых радиоактивными веществами ионизирующих излучений, протекающие по типу фотоэффекта: *возбуждение* электронных оболочек атомов при незначительной доле ионизации облучаемого вещества. Такие эффекты инициируют в органической (биологической) среде резко повышенную химическую активность микроэлементов, металлов — активных центров большинства ферментов. Для возбуждения электронных оболочек крайне незначительной доли облучаемого биологического вещества, железа, меди, кобальта, никеля, магния требуется энергия излучений в десятки раз меньшая по сравнению с энергией активации основного пластического материала органической среды, водорода, углерода, азота. Такие взаимодействия указывают на очевидную ферментативную функцию диффузно распределенных (фоновых) излучателей, осуществляемую в совокупности с видоизмененным проникающим в вещества космическим излучением и не проникающими в вещество видимым и ультрафиолетовым участками спектров, акцепторами которых является магний — хлорофилло-вая поверхностная оболочка биосферы планеты.

Ионизация — обязательная составляющая взаимодействия с веществом всех видов частиц и фотонов (в том числе видимого — ультрафиолетового спектров излучений) ведет к кратковременным изменениям структуры валентных оболочек атомов, высвобождению и выходу в межмолекулярную среду «энергетической валюты обмена» свободных электронов, что, кроме активации процессов, инициирует случайную сшивку молекул и является фактором формирования новых биологических структур (эволюции биологического вещества, мутации генов). Доля таких взаимодействий в процессе передачи энергии фотонов (частиц) ве-

шеству растет с ростом энергии излучений, характерных для начального периода становления биосферы, а в настоящее время — для ряда антропогенных излучателей среды.

1.1. Естественный радиационный фон Земли

Он складывается из излучений от рассеянных в почве, воле, воздухе радионуклидов, возраст которых совпадает с возрастом планеты. К таким радионуклидам относятся калий-40 (^{40}K), уран-238 (^{238}U), торий-232 (^{232}Th) и продукты распада тория и урана, радона ($^{219-282}\text{Rn}$), радия (^{226}Ra). Второе место в формировании радиационного фона занимают космические излучения, третье — короткоживущие радионуклиды, образующиеся в верхних слоях атмосферы при взаимодействии газов стратосферы с потоком ядерных частиц высоких энергий, из разных областей Вселенной.

Первичным геологическим источником большинства радионуклидов фона являются верхние слои литосферы (граниты, сланцы, песчаники и др.), постоянное преобразование которых под воздействием сапрофитной микрофлоры почв, воды, воздуха, перепадов температур ведет к миграции излучателей в почву, растительность, животный мир (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Первичные источники основных радионуклидов естественного радиационного фона

Порода литосферы и тип почвы	Концентрация, пКи/г (Бк/г), радионуклидов		
	^{40}K	^{238}U	^{232}Th
Граниты	27 (0,999)	1,6 (0,054)	2,2 (0,00081)
Сланцы	19 (0,703)	1,2 (0,00044)	1,2 (0,000044)
Песчаники	10 (0,57)	0,5 (0,00002)	0,3 (0,00001)
Известняки	2,4 (0,888)	0,75 (0,0028)	0,19 (0,000019)
Сероземы	18 (0,66)	0,85 (0,031)	1,3 (0,048)
Черноземы	11 (0,41)	0,58 (0,021)	0,97 (0,036)
Серые лесные	10 (0,37)	0,48 (0,017)	0,72 (0,027)
Подзолистые	4,0 (0,15)	0,24 (0,009)	0,33 (0,012)
Усредненные данные по литосфере	10 (0,37)	0,7 (0,026)	0,7 (0,026)
Типичный диапазон колебаний	3—20 (0,01—0,74)	0,3—1,4 (0,007—0,054)	0,2—1,3 (0,007—0,054)

Очевидно, что ведущим радионуклидом фона, определяющим радиоактивность растений и животных, уже по содержанию в исходном «депо» его миграции в экосистемах, является Калий-40 (^{40}K) — серебристо-белый металл, быстро реагирующий с кислородом, водой. Содержание радиоактивного калия в природной смеси изотопов (^{39}K , ^{40}K , ^{41}K) постоянно, независимо от звеньев миграции и составляет 0,0118 мас. %.

Соотношение содержаний $^{40}\text{K}/^{39}\text{K} = 1/85\,000$. Удельная активность природного калия $8 \cdot 10^{-10}$ Ки/г, или 29,6 Бк/г. В земной коре содержание радионуклидов достигает 3 мас. % (до 27 пКи/г); в вулканических известковых породах — 5,1; в почвах — 3,1 мас. %. В рационе питания человека содержание калия колеблется от 1,5 до 4,5 г/сут (от 0,12 до 3,6 нКи), в зависимости от состава питания. Наибольшее содержание ^{40}K регистрируется в бобовых культурах, до 370 Бк/г; наименьшее — в зерновых, до 70—75 Бк/г. Содержания ^{40}K и ^{226}Ra в основных пищевых продуктах приведено в табл. 1.2, калия в организме человека — в табл. 1.3.

Например, 1 г ^{40}K испускает 26,2 β -частиц с максимальной энергией 1,3 МэВ (средние величины характеристик распада даны в табл. 1.11) и 3,4 γ -кванта в секунду, взаимодействующих с веществом по типу фотоэффекта. Наибольшее биологическое значение природного калия в его смеси с излучателем заключается в обеспечении функций мембран клеток (калий-натриевый ионный на-

Таблица 1.2

Содержание ^{40}K и ^{226}Ra в основных пищевых продуктах

Продукт	^{40}K , пКи/г (Бк/кг)	^{226}Ra , пКи/г (Бк/кг)
Хлеб:		
черный	1,8 (66,6)	2,6 (0,096)
белый	0,8 (29,6)	2,5 (0,092)
Картофель	2,9 (107,3)	9,6 (0,35)
Капуста	2,2 (81,4)	1,7 (0,06)
Молоко	1,2 (44,4)	0,3 (0,01)
Говядина	2,7 (99,9)	0,1 (0,03)
Свинина	2,0 (74,0)	1,5 (0,05)
Сельдь	2,1 (77,7)	3,4 (0,12)
Треска	2,8 (103,6)	4,0 (0,15)
Яйца, 10 шт.	— (—)	1,5 (0,05)
Масло	0,1 (3,7)	0,3 (0,01)

сос, передача нервного импульса, возбудимость нервных клеток). Поступая с продуктами питания и водой, элемент всасывается практически полностью.

Основными накопителями ^{40}K в организме являются, в убывающем порядке, эритроциты, нервная ткань (головной мозг), мышечная ткань, печень, легкие, кости (см. табл. 1.3). Изотоп ^{40}K не накапливается: время двукратного снижения его активности в организме от момента поступления за счет процессов распада и выведения $T_{\text{эф}} = 58$ сут. Из организма взрослого человека ^{40}K выводится в три раза медленнее, чем вода. Средняя мощность поглощенной дозы ^{40}K составляет 170—190 мкГр (17—19 мрад/год).

Вторым, широко распространенным в земной коре, почве и дальнейших звеньях миграции радионуклидом фона является ^{239}U (в смеси с незначительным количеством ^{235}U и ^{234}U) — кальций-подобный белый серебристый металл, реагирующий с воздухом, водяными парами, кислотами, но не щелочами. В среде, как и кальций, встречается в минералах, с наибольшим содержанием в уранитах, кариотитах. Энергия распада невелика (1—1360 эВ), общее содержание урана в верхних (подпочвенных) слоях земной коры составляет примерно 10^{15} т ($2,4 \cdot 10^{-4}\%$), в морской воде — 10^{10} т ($3,13 \cdot 10^{-7}\%$). Фоновая удельная радиоактивность урана в среде составляет 0,33 мКи вещества.

Суточное поступление урана в организм человека колеблется в среднем от 1 до 10 мкг, достигая 300 мкг. Содержание урана в мягких тканях человека на территориях с нормальным радиационным фоном Земли чрезвычайно незначительно и составляет

Таблица 1.3

Средняя концентрация, г/кг (числитель), и активность, Бк/кг (знаменатель), ^{40}K в организме человека

Объект исследования	Показатель	Объект исследования	Показатель
Тимус*	0,6/18	Сердце	2,1/63
Кожа	0,8/24	Печень	2,5/75
Щитовидная железа	1,2/36	ЦНС	2,9/87
Кишечник	1,2/36	Головной мозг	3,0/90
Тонкий кишечник	1,3/39	Мышцы скелетные	3,0/90
Кровь	1,6/48	Эритроциты	3,4/102
Легкие	1,9/57	Селезенка	3,1/93
Семенники	2,0/60	Красный костный мозг	4,0/121

* Вилочковая (зобная) железа, центральный орган иммунной системы.

0,33—0,99 фКи/г в мягких тканях и 0,7—8,9 фКи/г в костях. Дозы излучений, поглощенные тканями равны в среднем, 8,0 мкГр (0,03—0,8 мрад)/год.

Значительно большую роль в формировании фоновых лучевых нагрузок выполняет дочерний продукт распада ^{238}U — радий, отличающийся от урана большей химической активностью и соответственно большей подвижностью в звеньях миграции в среде. В отличие от ^{239}U дочерний продукт распада находится вне кристаллической решетки исходных минералов и легко переходит в воду. Наибольшее количество естественного излучателя характерно для воды с высоким природным содержанием в ней «родственных» элементов: кальция, стронция, бария.

Радий (Ra) — блестящий серебристый металл, быстро реагирующий с воздухом (кислородом), водой. Образует растворимые хлориды, бромиды, сульфиды, иодиды, а также ряд нерастворимых соединений (карбонатов, сульфидов, оксалатов). Все изотопы радия радиоактивны. Наиболее распространен долгоживущий изотоп с периодом полураспада 1620 лет. Соль чистого радия является α -излучателем. При накоплении в ней продуктов распада — радона (Rn), актиния (Ac) становится источником β -, γ -излучений. Энергия α -частиц велика: 4,6—4,7 МэВ. Энергия β -частиц значительно ниже (см. табл. 1.12). Равновесная соль радия является мощным постоянным источником γ -излучения с энергией фотонов ~0,188 МэВ.

Радиоактивность радия в осадочных и вулканических породах подпочвенных слоев земной коры колеблется от 0,5 до 1,3 пКи/г (при максимальных регистрируемых значениях 60 пКи/г). Удельная активность большинства почв 1 пКи/г ($1 \cdot 10^{-10}$ мас. %), питьевой воды — 0,01—6 пКи/г, воды океана — 0,007 пКи/г. Наибольшие содержания радия, поступающие в организм человека с продуктами питания, пКи/год: с куриными яйцами — до 91, с картофелем — до 110, с мясом домашней птицы — до 15.

Поведение радия в организме сходно с миграцией и накоплением кальция. В целом на долю радия приходится < 0,1 % суммарной активности находящихся в организме радиоактивных веществ. Наибольшее количество радионуклида регистрируется в костях (~0,2 Бк/г), в 30—70 раз меньшее количество фиксируется в паренхиматозных органах (печени и почках) и почти в 1000 раз меньшее — в мышечной ткани.

Радиоактивный торий (^{227}Th , ^{228}Th , ^{232}Th), как и предшествовавшие α -излучатели, — серебристый металл, активно взаимодействующий с кислородом, водяным паром и плохо — с кислотами. Широко распространен в горных породах (торианите, торите) и, как следствие естественного разрушения кристаллических решеток, — в почвах. Вследствие плохой растворимости в воде в растения поступает в незначительных количествах. Все изотопы являются мощными (~5 МэВ) α -излучателями (см. табл. 1.12). Длина

пробега α -частиц в воздухе достигает 5 см. Соединения радионуклида в организм поступают в незначительных количествах, плохо всасываются желудочно-кишечным трактом, преимущественно откладываются в костях (1,8 Бк/г) и — на порядок в меньших количествах — в других органах и тканях.

Радон (^{222}Rn) и *торон* (^{220}Tn) — бесцветные, не имеющие вкуса и запаха газы — короткоживущие звенья естественных радиоактивных распадов радия, тория. В описаниях они чаще объединены под общим названием радон, в воздушную среду эмануруют (попадают) из минералов, содержащих ураниты, карнотиты, ториты.

Эмануруя, эти газы вследствие высокой удельной массы (в 7,5 раз тяжелее воздуха) «стекают» по поверхности материалов, накапливаясь в ложбинах, погребах, подвалах, ванных комнатах, первых этажах домов; в реакции обмена среды (биологические цепочки) вследствие химической инертности (отнесены к разряду ксенона) не вступают; в растительных и животных тканях отсутствуют; в воздухоносные пути, легкие проникают с воздухом, предварительно сорбируясь на мелкодисперсных частицах бытовой пыли (75 % на аэрозолях диаметром от 5 до 25 нм).

Газы являются мощными α -излучателями (до 5 МэВ), формирующими лучевые нагрузки на эпителий слизистых носоглотки, трахеи, бронхов, альвеол. Незначительная часть сорбированных излучателей проникает в желудочно-кишечный тракт с продуктами питания, водой. Размеры поступления изотопов в организм чрезвычайно варьируют в зависимости от географии места жительства, его высоты относительно нулевых значений рельефа местности, этажности дома, характера строительных материалов.

Максимальные лучевые нагрузки (на легкие) формируются в странах с длительным холодным периодом и вынужденным резким снижением вентиляции помещений. Внутри помещений максимальные концентрации газов накапливаются в ванных комнатах (вследствие водо-, газонепроницаемости пола, стен), в 40—50 раз превышая средние значения, приведенные в табл. 1.4 и 1.5, кухне (сжигание газа, содержащего, как правило, изотопы), комнатах квартир первых этажей (в 15—20 раз выше средних значений). Превышение средних значений фоновой радиоактивности газов (от 1 до 10 кБк/м³) регистрируется в домах, построенных без предварительного радиационного контроля материалов (преимущественно шлакобетонов, ряда сортов красного кирпича, панелей). Доля такого радиационно опасного жилья, по данным МКРЗ, достигает 0,1 %, преимущественно в странах Севера.

Распад радиоактивных инертных газов завершается образованием твердых радиоактивных дочерних продуктов в виде частиц очень малых размеров (~ 100 гм) ^{210}Po и ^{210}Pb . Средняя концентрация ^{210}Pb в приземных слоях атмосферы Северного полушария составляет 0,5 мБк/м³. Соотношение радиоактивностей ^{210}Pb и ^{210}Po

Таблица 1.4

Концентрации радона в воздушной среде, Бк/м³

Страна	Приземный слой открытого воздуха	Воздух квартир*	Накапливаемая доза, мкЗв
Франция	$22,1 \cdot 10^{-2}$	4,8—13	300,0
Россия	$0,2 \cdot 10^{-2}$	6—17	400—1000
США	$0,1 \cdot 10^{-2}$	17	Нет сведений
Аляска	$0,01 \cdot 10^{-2}$	Нет сведений	400
Швеция	Нет сведений	То же	3700

* Кроме 1-го этажа, где радиоактивность превышает приведенные значения в 15—20 раз.

Таблица 1.5

Концентрации радона в воде, кБк/м³

Источник	Страна	Район	Концентрация
Моря и океаны	—	—	10^{-3}
Реки	—	—	7,4—11,1
Питьевая вода	Австрия	Зальцбург	1,5—7
		Бадстайн	3700
	Финляндия	Хельсинки	1200
		Другие районы	280—45 000
	Италия	—	80
	Швеция	—	19—150
	США	Штат Мэн	660—5800
		Штат Северная Каролина	100—1700
	Великобритания	Нет сведений	7,4—481
Источники и буровые скважины	Франция	То же	≤ 3700
	Япония	»	≤ 25 900
	США	»	≤ 11 100

равно 0,2. Концентрация аэрозолей в воздухе помещений увеличивается в той же кратности, что и концентрации радона, торона. В организм в отличие от инертных излучателей изотопы поступают как с аэрозолями воздуха, так и с продуктами питания, от 1 до 10 пКи/сут. В теле человека содержится от 100 до 400 пКи (от 0,37 до 1,48 Бк) ^{210}Po и столько же либо несколько больше свинца-210. В организм курильщика с дымом табака дополнительно поступает до 80 мКи изотопов в год.

Незначительный вклад в метаболизм среды вносят *радионуклиды*, образующиеся в верхних слоях атмосферы под воздействием потока нейтронов космического происхождения. Скорость образования — 0,2 ат./($\text{см}^3 \cdot \text{с}$) — и последующее содержание в среде наиболее велики для *третия* (^3H) и *углерода* (^{14}C) — 2,5 ат./($\text{см}^3 \cdot \text{с}$). Общее расчетное количество трития в биосфере (бесцветного газа, включенного в те же звенья метаболизма, что и водород) составляет $(92,5 - 185,0) \cdot 10^{16}$ Бк, из которых 65 % содержатся в океане, остальные — в почве и последующих звеньях миграции. Содержание естественного трития в продуктах питания крайне невелико (порядка 14—26 Бк/кг).

Содержание ^{14}C в среде несколько выше. Расчетное суммарное количество его в биосфере составляет 8,5 ЭБк (Экса = $1 \cdot 10^{18}$), при этом в атмосфере содержится 1,6 %, в почвах — 4, в верхних слоях океана 2,2, в глубинных 92, в донных отложениях 0,2 %. Углерод является наиболее активным метаболитом среды, всасывается в растения непосредственно из воздуха в составе углекислого газа. В организм человека поступает с пищей, водой (99 %), воздухом (≤ 1 %). Коэффициент усвояемости углерода равен 1. Средняя удельная активность органических структур (в том числе и продуктов питания) составляет 230 Бк/кг.

Оба радионуклида - - мягкие β -излучатели с родственными звеньями метаболизма равномерно распределены в тканях при несколько большей тропности к жировым структурам (см. табл. 1.12).

Показателем биологической эффективности метаболизма естественных радионуклидов являются результирующие величины конечных эффектов взаимодействия испускаемых излучений с веществом — дозы ионизирующих излучений от радионуклидов, их распределение и последующие реакции на облучение органов и систем (табл. 1.6).

Наибольшие размеры фотон-электронных потоков (поглощенных доз) получают клетки тканей от равномерно распределенных в организме «мягких» β -излучателей (радиоактивных водорода, углерода, калия). Некоторые преимущества в формировании доз имеют клетки с максимальной функциональной активностью — скоростью обмена веществ.

Радионуклиды уранового, ториевого рядов отличаются меньшей тропностью к биологическим тканям. Проникая тем не менее

Естественные среднегодовые лучевые нагрузки от природных источников в условиях нормального радиационного фона средних географических широт

Источник излучения	Внешнее проникающее облучение, мкГр (мрад)	Внутреннее облучение, мкГр (мрад)			Суммарная эквивалентная доза	
		гонада (половых желез, матки, зародышевой ткани)	костной и непосредственно прилегающих тканей (мозга, эндокринных желез, кровеносных тканей)	мягких тканей (мышечных, эпителиальных, соединительных)	мБэр (округленно)	вклад, %
Равномерно распределяющиеся излучатели						
^1H	Нет	0,01 (0,001)	0,01 (0,001)	0,01 (0,001)	32	14
^{14}C	Нет	5 (0,5)	20 (2,0)	6 (0,6)		
^{40}K	120 (12)	150 (15)	270 (27,0)	170 (17)		
Σ	120 (12)	155 (15,5)	290 (29,0)	176 (17,6)		
Остеотропные излучатели						
^{238}U	90 (9)	0,4 (0,04)	3 (0,3)	0,4 (0,04)	124	55
^{226}Ra	90 (9)	8,9 (0,89)	54 (5,4)	8,9 (0,89)		
^{232}Th и дочерние продукты распада	140 (14)	0,16 (0,016)	10 (1,0)	0,16 (0,016)	38	

Σ	230 (23)	9,5 (0,95)	67 (6,7)	9,5 (0,95)	162	17
Инертные газы: ^{222}Rn и ^{220}Th	—	0,002 ($2 \cdot 10^{-3}$)	0,003 ($3 \cdot 10^{-3}$)	0,002 (0,02); ≤ 400 (40) — на легкие	≤ 40 — на легкие	—
<i>Космическое излучение</i>						
Фотонное излучение	300 (30)	300 (30)	300 (30)	300 (30)	300	13
Нейтронный компонент	3,5 (0,35)	3,5 (0,35)	3,5 (0,35)	3,5 (0,35)	4,37 (1,75 — 7)	1
Вклад изменений с ОБЭ	0,1 %	1,6 %	8,5 %	1,8 %	12 %	—
Всего	≈ 650 (65)	≈ 468 (47)	≈ 660 (66)	≈ 492 (49)	≈ 225	—

в организм по эволюционно отработанной цепочке, эта группа излучателей фиксируется в костных структурах. Большие энергия (~5 МэВ) и плотность потока испускаемых α -частиц, взаимодействие с которыми завершается реакциями, протекающими по типу фотоэффектов (возбуждение при незначительной доле ионизации электронных оболочек), ведет к локальной эффективной (ОБЭ = 20) активации обменных процессов, о чем свидетельствует эволюционно сформировавшаяся локализация и функции «избирательно захватывающих» изотопы систем: нейро-эндокринная регуляция обмена, кроветворение.

Внешние радиационные воздействия, дополняющие стабильный спектр внутреннего облучения, складываются из излучений космических, фотонных и корпускулярных (преимущественно нейтронных), а также от естественных радиоактивных γ -излучателей вне организма (стены жилья, скопившиеся инертные газы, почва).

Космические излучения, благодаря уникальной, сложившейся за миллионы лет структуре атмосферы, являются видоизмененными первичным галактическим (93 %) и солнечным потоками частиц высоких энергий. Энергия потока частиц галактического происхождения, преимущественно протонов, составляет в среднем 100 МэВ, достигая 10^{14} МэВ, солнечного — 20 МэВ. Помимо протонов, большая часть которых огibt Землю благодаря ее магнитным полям (защитная функция которых зависит от широты, снижаясь к полюсам и возрастая к экватору), в состав первичного космического излучения входят протонно-нейтронные обломки ядер с атомными номерами 3—5, 10—19, 20. Интенсивность первичного космического излучения периодически меняется вследствие 11-летнего цикла солнечной активности, возрастая в период всплеска солнечной активности в два-три раза и более.

Помимо магнитных полей, потоки космических излучений резко снижают радиационные протонные пояса планеты — относительно узкий экваториальный (расположенный на расстоянии 1,2—8,0 земных радиусов от поверхности Земли) и более обширный, простирающийся от экватора до широт 30—60 град. Окончательное изменение спектра первичного потока космической радиации происходит при взаимодействии его с озоновым слоем на высоте 20 км над уровнем моря. Первичное космическое излучение здесь полностью преобразуется в фотонное, но при сохранении потока нейтронов, возрастающего как с подъемом на высоту, так и с перемещением к Северу или к Югу от экватора. В связи со снижением мощности гравитационных полей и радиационных поясов планеты суммарная эквивалентная доза космического излучения меняется соответственно от 35 мбэр на экваторе до 140—800 мбэр на полюсах.

Данные о мощности радиоактивного воздействия космического происхождения (без учета его резкого снижения при экраниро-

вании потока крышами и стенами жилищ, транспорта и др.) приведены ниже:

Высота над уровнем моря, км	0	3	5	10
Мощность космического излучения, мбэр/год, на широте:				
0 град (экватор)	34	170	400	1400
30 град	40	220	580	2300
50 град	50	300	800	4500

Очевиден резкий рост радиационного фактора с подъемом на высоту, в том числе и на высоту обитаемых адаптированных райо-

Таблица 1.7

Удельная активность ^{226}Ra и ^{232}Th в строительных материалах и внешние лучевые нагрузки внутри жилья (по А. М. Кузину)

Вид строительного материала	Удельная активность, Бк/кг		Внешняя лучевая нагрузка, мбэр/год
	^{226}Ra	^{232}Th	
Шлакобетон на основе квасцовых глинистых сланцев	320—2620	24—115	93—170
Фосфогипс	24—555	3—22	—
Летучая зола	110—610	74—320	—
Цемент	9—168	4—81	—
Легкий заполнитель	36—195	37—182	—
Наполнитель бетона (гравий, галька, щебень)	4—167	4—463	—
Кирпич	33—152	21—178	37—100
Шлаковый заполнитель	84—151	32—182	—
Газобетон на основе песка	7—130	4—155	—
Черепица	63—91	32—64	—
Бетон	11—80	9—105	—
Известковый кирпич	6—25	4—29	—
Изоляционный материал (каменный или стеклянный войлок)	13—15	4,6—15	—
Штукатурка из природного гипса	1—13	1—12	—
Дерево	0,3—0,5	0,2—1,2	21—50

нов планеты. Существенный вклад в дозу внешнего облучения вносят строительные материалы жилищ, стены и крыши которых являются эффективными экранами космического излучения (табл. 1.7). Вместе с тем в помещениях вследствие усложнения геометрии излучателей (стен, пола, потолка) и роста мощности потока фотонного излучения от современных строительных материалов дозы могут резко возрастать, превышая естественный фон в два — шесть раз.

1.2. Антропогенный радиационный фон

Антропогенные вмешательства в состав естественного радиационного фона:

искусственная (глобальная) концентрация и перераспределение естественных радионуклидов;

загрязнение среды экологически новейшими радиоактивными метаболитами ядерно-энергетического происхождения;

производство и использование искусственных радионуклидов и других источников ионизирующих излучений в науке, медицине, промышленности.

Искусственная (глобальная) концентрация фоновых радионуклидов при добыче и сжигании топлив, переработке руд, производстве и использовании строительных материалов резко меняет фоновое геопопуляционное распределение радиоактивности среды. Наиболее массивны загрязнения такого типа калием (^{40}K), ураном (^{238}U), торием (^{232}Th) от тепловых электростанций: сжигание многозольного угля сопровождается последующим выбросом сконцентрированных радионуклидов в атмосферу.

Официальное содержание радионуклидов (НКДАР) в угле принято равным 50, 20 и 10 Бк/кг соответственно для калия (^{40}K), урана (^{238}U), тория (^{232}Th). В реальных топливах концентрация излучателей достигает 320 – 520 Бк/кг (по урану). На планете ежегодно сжигается 3700 Мт угля, что вносит около 0,02 % в естественные лучевые нагрузки на население планеты в целом при преимущественном облучении жителей городов средних и северных широт. Сжигание жидких (углеводородных) топлив в двигателях внутреннего сгорания значительно дополняет аэрозольный состав воздуха городов ^{14}C , ^{40}K . Ниже приведены суммарные популяционные дозы на население (произведение средней индивидуальной дозы на число облучаемых) от воздействий этого ряда (А), дополняемые видоизмененными естественными лучевыми нагрузками от фосфатных удобрений (Б).

Воздействия	А	Б
Головая эквивалентная доза:		
индивидуальная, мбэр.....	0,02	0,04
популяционная, Зв · чел	2000	1950

Состав излучателей, входящих в фосфатные удобрения (ежегодное использование которых дополняет 13 Мт) и участвующих в формировании дополнительных лучевых нагрузок на все звенья экосистем, приведены в табл. 1.8.

Наиболее велика здесь радиационная агрессивность нитрофоса, фосфата аммония, фосфоритной муки, активность которых превышает 50 Бк/кг при максимальном участии в формировании доз от α -излучателей, радионуклидов с максимальной биологической эффективностью.

Близкая по составу и спектру видоизмененных воздействий радиоактивность формируется при сжигании угля (табл. 1.9). Максимальное содержание наиболее агрессивных (по принятым ОБЭ)

Таблица 1.8

Содержание естественных радионуклидов в фосфатных удобрениях,
Ки/г (Бк/г)

Удобрение	^{238}U	^{226}Ra	^{210}Pb	^{210}Po	^{232}Th	^{40}K	Всего
Апатитная мука	—	0,8 (0,03)	0,7 (0,026)	0,8 (0,03)	1,5 (0,045)	2,6 (0,096)	0,023
Фосфоритная мука	—	10,6 (0,39)	10,2 (0,38)	13,1 (0,48)	0,7 (0,026)	6,2 (0,23)	0,17
Томасофосфат	< 1,0 (0,037)	0,2 (0,0074)	—	—	< 0,1	0,1 (0,0037)	0,005
Суперфосфат	14 (0,52)	14,1 (0,52)	—	—	0,4 (0,014)	3,7 (0,137)	0,18
Обычный суперфосфат	—	25 (0,92)	—	—	—	—	0,09
Фосфат аммония	63 (2,34)	5,7 (0,2)	—	—	0,4 (0,014)	—	0,25
Нитрофос	—	23 (0,85)	23 (0,85)	25 (0,92)	—	—	0,26
Нитроаммофос	—	—	0,4 (0,014)	0,4 (0,014)	—	—	0,002
НРК	—	0,2 (0,0074)	0,4 (0,014)	0,5 (0,018)	1,4 (0,052)	33 (1,22)	0,13
Обогащенный концентрат	—	11,5 (0,42)	10,6 (0,39)	7,9 (0,29)	0,6 (0,02)	2,0 (0,074)	0,12
Обесфторенный фосфат	—	0,9 (0,033)	—	—	—	0,9 (0,033)	0,007

Содержание радионуклидов в угле и продуктах его сгорания, пКи/г (Бк/г)

Страна	^{238}U	^{226}Ra	^{210}Pb	^{232}Th	^{230}Th	^{228}Ra	^{40}K
<i>Уголь</i>							
Россия	—	0,5—0,9	0,2—1,4	0,3—2,0	—	—	—
Польша	—	0,001—1,3 (0,00037—0,048)	—	—	—	—	—
Чехия и Словакия	—	0,7 (0,026)	0,6 (0,022)	—	—	—	—
США	0,49 (0,018)	0,3 (0,011)	—	0,57 (0,02)	—	0,11—0,35 (0,004—0,013)	25 (0,092)
<i>Угольная зола</i>							
Россия	—	5,0 (0,185)	—	2,3—8,7 (0,085—0,322)	—	3,3 (0,122)	—
США	—	3,8 (0,14)	—	2,6 (0,096)	—	2,4 (0,089)	—
<i>Шлак</i>							
Польша	—	4,3 (0,159)	—	—	1,2 (0,044)	—	—
США	4,9 (0,18)	0,55—4,5 (0,02—0,166)	1,0 (0,037)	1,5 (0,055)	0,5 (0,018)	—	26 (0,96)
<i>Летучая зола</i>							
Польша	0,6—6,7 (0,022—0,248)	1,0—6,4 (0,037—0,237)	—	0,18—0,2 (0,006—0,0074)	1,0 (0,037)	—	22,5 (0,832)
США	10 (0,37)	0,4—3,1 (0,015—0,11)	17,3 (0,64)	2,6 (0,096)	0,4 (0,015)	—	11,5 (0,41)

радионуклидов регистрируется в угольной золе (аэрозолях сжигания) России.

В данных табл. 1.9 не учтены лучевые нагрузки этого ряда на лиц, занятых непосредственно в производстве, а также на население, проживающее в непосредственной близости от предприятий (электростанций), вблизи крупных автомагистралей. Лучевые нагрузки на население здесь могут удваивать естественный радиационный фон.

Помимо глобальных видоизмененных радиационных воздействий определенный вклад в дополнительные экосистемные лучевые нагрузки вносят металлургические предприятия, расположенные практически во всех крупных индустриальных городах страны (табл. 1.10).

В состав шлаков, аэрозолей здесь, как и при сжигании топлив, входят в основном α -излучатели, которые, частично сконцентрированные в мелкодисперсных частицах, участвуют в формировании лучевых нагрузок на население вместе с радоном, выбрасываемым в атмосферу с последующим «стеканием» в приземные слои атмосферы и формированием лучевых нагрузок на системы дыхания населения прилегающих районов.

К *собственно антропогенным* экологически новейшим излучателям от начальных почвенных каналов экосистемной миграции, клеточных мембран до популяционного распределения доз, меняющим энергетические спектры и распределение радиационного фактора, относятся радионуклиды ядерно-энергетического происхождения. Основными источниками равномерного (фоновое) включения искусственной радиоактивности в состав среды, завершившими переход фактора лабораторной случайности в раз-

Таблица 1.10

Годовой выброс радиоактивных веществ в воздух
гидрометаллургическим заводом* с хвостохранилищем

Нуклид	Выброс радионуклидов, Ки (Бк)	Нуклид	Выброс радионуклидов, Ки (Бк)
^{238}U	0,09 ($0,3 \cdot 10^{10}$)	^{210}Pb	0,009 ($0,3 \cdot 10^{-9}$)
^{234}U	0,09 ($0,3 \cdot 10^{10}$)	^{210}Bi	0,009 ($0,3 \cdot 10^{-9}$)
^{234}Th	0,01 ($0,037 \cdot 10^{10}$)	^{210}Po	0,009 ($0,3 \cdot 10^{-9}$)
^{230}Th	0,01 ($0,037 \cdot 10^{10}$)	^{222}Rn	1400 ($5,18 \cdot 10^{13}$)
^{226}Ra	0,009 ($0,3 \cdot 10^{-9}$)		

* При производительности завода 664 кт руды/год. Предполагается, что содержание урана в руде составляет 0,2 %, а потребление его в год водоодеяным реактором мощностью 1 млн кВт — 160 т.

ряд современных экосистемных воздействий, явились испытания ядерного оружия, послужившие причиной относительно равномерного рассеивания радионуклидов (радиоактивных осадков) в Северном полушарии планеты (рис. 1.1). В период с 1945 по 1991 г. общее число ядерных взрывов на нашей планете составило 2059, в том числе 508 в атмосфере. Наибольшее количество таких взрывов, соответственно 1085 и 205, произведено в США. На втором месте Россия (СССР) — 715 и 215. Франция осуществила 182 взрыва (45 в атмосфере). Великобритания и Китай — соответственно 42 и 35 (21 и 22 в атмосфере).

После принятия моратория на проведение испытаний ядерного оружия отдельные взрывы были осуществлены в Индии и Пакистане — странах, не присоединившихся к мораторию.

Второе место занимают ядерные реакторы энергетического (АЭС) назначения, вырабатывающие до 30 % электроэнергии мира, и исследовательские реакторы, относительно равномерно рассредоточенные в странах Северной Америки, Азии, Европы. В настоящее время в мире функционируют более 500 ядерно-энер-

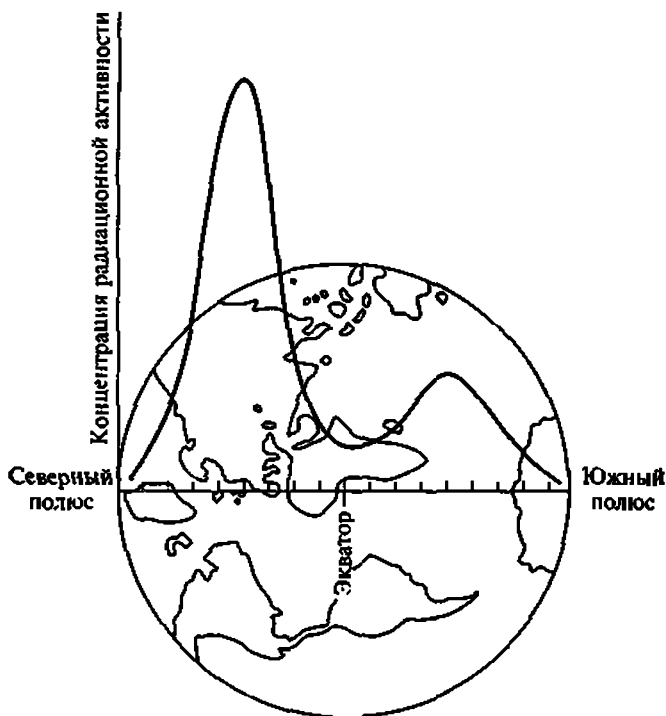


Рис. 1.1. Рассеивание радионуклидов в Северном полушарии планеты

гетических блоков АЭС, из которых 163 — в странах Западной Европы, 121 — в США и 45 — в России.

Общее число исследовательских и производственных неэнергетических реакторов в России близится к 30 (девять из них расположены в Москве); число реакторов АПЛ и надводных кораблей (по зарубежным материалам) равно 32 (60 % мирового количества). Примерно то же число реакторов исследовательского и технического ряда — в США и странах Европы.

Расчеты (Л. Гофман, 1994) показывают, что суммарная активность среды от АЭС, равномерно распределенная на Евразийском и Американских континентах, при нормальном 10-летнем режиме работ действующих ядерных энергетических установок будет равна относительно локальному загрязнению среды от Чернобыльской АЭС. Газо-аэрозольные выбросы дополняются жидкими и твердыми отходами энергетических циклов АЭС, требующими последующего захоронения. Суммарное накопленное количество таких отходов в России достигает 200 тыс. м³. Захоронение таких излучателей без риска последующего включения в состав и метаболизм экосистем представляет серьезную, не решенную окончательно проблему.

Основными долгоживущими радионуклидами, входящими в состав наиболее массивных радиоактивных загрязнений среды ядерно-энергетического происхождения, независимо от разновидностей источников, являются цезий (¹³⁷Cs), стронций (⁹⁰Sr), с крайне незначительным вкладом плутония (²³⁹Pu и ²⁴⁰Pu). Скорость распада этих радионуклидов значительно ниже скорости их накопления в среде, что при современных системах защиты и нормах выброса радионуклидов в среду ведет к накоплению излучателей в экосистемах.

Уровни накопления ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs, мКи/км² (Бк/м²), в почве Северного полушария вследствие выпадений из атмосферы:

Год	1958	1963	1968	1973
⁹⁰ Sr.....	6,67 (250)	29,5 (1100)	37,2 (1400)	35,2 (1200)
¹³⁷ Cs....	10,7 (396)	47,2 (1750)	56,3 (2100)	56,3 (2100)

Некоторый вклад (ведущий к формированию тиреотропных лучевых нагрузок при авариях) в фоновые радиационные воздействия современной среды вносит короткоживущий изотоп йода (¹³¹I). Ряд других (преимущественно короткоживущих) составляющих выброса существенных вкладов в цепи миграции, распределение и накопление дополнительных лучевых нагрузок на население и экосистемы в целом не вносят.

Цезий (¹³⁷Cs) — блестящий золотистый мягкий металл, бурно взаимодействующий, взрываясь, с кислородом и водой, по химическим свойствам близкий к калию. Содержание стабильного изотопа (¹³³Cs) в среде крайне незначительно ($3 \cdot 10^{-6}$ % в земной

коре, костной ткани человека и животных и $3 \cdot 10^{-8} \%$ в морской воде). В среде до становления ядерной энергетики радиоактивный изотоп отсутствовал полностью. Естественных биологических функций не несет.

Наибольшее радиационно-экологическое значение имеет ^{137}Cs , суммарный выброс которого от АЭС мира в 2000 г. составлял $22,2 \cdot 10^{19}$ Бк ($6,0 \cdot 10^9$ Ки) в год (во время аварии на ЧАЭС выброс этого изотопа составил $22,9 \cdot 10^2$ Ки); образуется при делении ядер урана, плутония в ядерных реакторах, при ядерных взрывах; используется (выделяясь из осколочных продуктов АЭС) как γ -излучатель в медицине, металлургии, сельском хозяйстве; в настоящее время (в незначительных количествах) обнаруживается во всех объектах внешней среды.

Изотопы цезия при любом поступлении в организм полностью (коэффициент резорбции 100 %) включаются в метаболизм, конкурируя с калием, в том числе и ^{40}K . Скорость миграции в организме в 25 раз меньшая (см. табл. 1.12), что при более жестком γ -излучении изотопа ведет к формированию больших (по сравнению с ^{40}K) микролокальных (мембранных) лучевых нагрузок, при несколько ином (смещенном в сторону ионизации) характере поглощения энергии. В организме в отличие от естественного аналога миграции накапливается до предела насыщения, превышающего величину ежедневного поступления в 30 раз. Содержание в организме жителей с современной фоновой загрязненностью среды составляет (по расчетам) 0,4—0,5 Бк/кг, но при стотысячекратном росте в группах населения территорий, прилегающих к АЭС, пострадавших от радиационных аварий.

Стронций (^{90}Sr) — серебристый кальциеподобный металл, покрытый оксидной оболочкой, плохо вступает в реакции, включаясь в метаболизм экосистем по мере формирования сложных $\text{Ca} - \text{Fe} - \text{Al} - \text{Sr}$ -комплексов. Естественное содержание стабильного изотопа в почве, костных тканях, среде достигает $3,7 \cdot 10^{-2} \%$, в морской воде, мышечных тканях $7,6 \cdot 10^{-4} \%$. Биологические функции не выявлены; нетоксичен, может замещать кальций. Радиоактивный изотоп в среде отсутствует. Радиационные характеристики стронция приведены в табл. 1.12. Источники поступления в среду те же, что и цезия. Содержание радионуклида от ядерно-энергетических источников в почвах и последующих звеньях миграции соответствуют содержанию ^{137}Cs .

Поступление стронция в организм зависит от степени и характера включенности метаболита в почвенные органические структуры, продукты питания и колеблется от 5 до 30 %, при большем проникновении в детский организм. Независимо от пути поступления излучатель накапливается в скелете (в мягких тканях задерживается не более 1 %). Выводится крайне плохо (см. табл. 1.12), что ведет к постоянному накоплению дозы при хроническом по-

ступлении в организм. В отличие от естественных α -активных аналогов (урана, тория и др.) стронций является эффективным β -излучателем, что меняет спектр радиационных воздействий, в том числе и на гонады, эндокринные железы, красный костный и головной мозг. Накапливаемые дозы (фон) колеблются в тех же пределах, что и от поступления цезия (до $0,2 \cdot 10^{-6}$ мкКи/г в костях при дозах порядка $4,5 \cdot 10^{-2}$ мЗв/год).

Плутоний ($^{239}_{(240)}\text{Pu}$) — серебристый белый металл, образующий твердые нерастворимые оксиды; относится к редкоземельным элементам; в нативный состав среды не входит. Характер миграции в среде не исследован, но, по всей вероятности, сходен с миграцией естественного (редкоземельного) аналога — актинида тория. Как и торий, является α -, β -, γ -излучателем с энергетическими характеристиками спектра, близкими к естественному аналогу (см. табл. 1.12). Используется как компактный источник энергии, ядерное топливо, в производстве ядерных вооружений. На долю плутония от содержащихся в среде радионуклидов ядерного происхождения приходится не более 1 %. До 10 % плутония может переходить в водорастворимые формы, мигрируя в последующем по биологическим цепочкам. Характер миграции, накопления и распределения в организме тот же, что и тория.

Близки по спектру излучений, физическим характеристикам радионуклиды **нептуний** ($^{212-235}\text{Np}$), **америций** ($^{237-242}\text{Am}$), **кюри** ($^{238-250}\text{Cm}$) — белые серебристые металлы, в природе не встречаются, относятся к разряду трансурановых элементов актиноидов; подвержены воздействию воздуха, воды, но не щелочей; благодаря образованию оксидных пленок на воздухе устойчивы; стабильных изотопов их в составе среды не обнаружено; являются α -, β -, γ -излучателями при средней энергии α -излучения порядка 5 МэВ/(Бк·с). Изотопы получают в ядерном реакторе как побочные продукты образования (и получения) плутония. Выход в среду при загрязнении от аварий на АЭС крайне незначителен.

В организм из желудочно-кишечного тракта всасывается крайне плохо. Характер миграции в среде не исследован. Местом депонирования является скелет. При накоплении в организме наиболее вероятно повреждение красного костного мозга, печени, почек. В отличие от нептуния и кюрия америций хорошо растворим и более подвижен в экосистемах, организме.

Йод ($^{131}_{(129)}\text{I}$) — неметалл черного с блеском цвета. Легко возгоняется (летуч). По последним данным, ^{129}I образуется в литосфере при спонтанном делении урана. Расчетная концентрация его составляет 10^{-14} г на 1 г стабильного йода (^{127}I). Содержание (по стабильному йоду) составляет $0,14 \cdot 10^{-4}$ % в почве и $0,049 \cdot 10^{-4}$ в океане. Биологически активен, является обязательным микроэлементом, необходимым для синтеза гормонов щитовидной железы. Необходимое поступление с пищей $0,1 - 0,2$ мг ($0,1 - 0,2 \cdot 10^{-6}$ мг/Ки

естественного радиоактивного иода). Основным антропогенным изотопом является ^{131}I , образующийся при ядерных взрывах, эксплуатации (авариях) АЭС, авариях реакторов. Активно включается в экологические цепочки миграции. Суммарные накопленные дозы, сформировавшиеся после проведения открытых ядерных испытаний, составляют $480 \cdot 10^2$ мкГр. Выброс в среду при нормальной эксплуатации АЭС колеблется в пределах 5—400 Бк/(Вт · год). При поступлении радионуклида в организм через желудочно-кишечный тракт (основной путь) всасывается 100 % изотопа с последующим скоплением его в щитовидной железе, особенно у детей, превышая дозы на щитовидную железу взрослого в 2—10 раз. Продолжительность радиоактивности среды (организма) после однократного загрязнения (проникновения в организм) составляет не более 1,5 мес.

Экосистемные радиационные воздействия на население дополняются *искусственными лучевыми* нагрузками, не связанными с радиоактивным загрязнением среды. Ведущий вклад в суммарную дозу таких лучевых нагрузок на современного жителя вносит облучение в медицинских диагностических и лечебных целях. Частота таких радиационных воздействий составляет 200—500 процедур на 1000 чел. в год (в США, Германии — до 600). Дозы облучения «среднего жителя» России достигают 0,17—0,13 мрад (радиологические исследования с использованием «меченых» изотопов формируют аналогичные дозы, но на значительно меньшее число

Таблица 1.11

Искусственные лучевые нагрузки на население

Источник	Число облучаемых в России	Доза, мкГр (мрад)		
Рентгенография	50 % населения	5,8—70 (0,5—7,0)	14,9—2,7 (0,5—2,3)	35,3—131,0 (3,5—13,1)
Телевизионные экраны и дисплеи компьютеров (3—5 ч/сут)	90—95 % населения	36—54 (3,8—5,4)	15—7 (1,5—0,7)	0,9—2,6 (9—26)*
Космическое излучение при пассажирских полетах	От 5 до 20 % при длительности полета от 1 до 8 ч	27—46 (2,7—4,6)	27—46 (2,7—4,6)	27—46 (2,7—4,6)
Светящиеся циферблаты	1 % населения	—	12—33 (1,2—3,3)	—
Всего		≤ 17 мбэр	≤ 11,6 бэр	≤ 20 мбэр

* На щитовидную железу.

Характеристики основных естественных и антропогенных (ядерно-энергетических) радионуклидов

Радионуклид	Период полураспада	Всасыва- емость, %	Место наибольшего накопления в организме	Время двукратного снижения активности в организме	Средняя энергия излучателей, МэВ			Среднегодовая фооновая нагрузка, сЗв (мбэр)
					α	β	γ	
Калий (^{40}K)	$1,3 \cdot 10^9$ лет	100	Все тело, голов- ной мозг, эритро- циты	58 сут	—	0,5	0,16	≤ 20 в год во всем теле
Углерод (^{14}C)	5730	100	Жировая, костная ткань	Не накоп- ливается	—	$4,9 \cdot 10^{-2}$	—	1,02 во всем теле, 4,2 в жировой ткани
Радон (^{222}Rn)	3,8 сут	Не всасы- ваются	Не накапливают- ся. Облучают верхние дыхатель- ные пути, легкие по типу внешнего излучателя	То же	5,5	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	0,002, (≤ 50 на легкие)
Торон-220	54,5 сут							
Радий (^{226}Ra)	1620 лет	0,5—1	До 80 % в скелете	17 лет	4,7	$3,6 \cdot 10^{-3}$	$6,7 \cdot 10^{-3}$	≤ 14
Торий (^{232}Th)	$1,4 \cdot 10^{10}$ лет	1	Костные ткани, печень	22 года	4,07	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-1}$	0,007—0,7
Полоний (^{209}Po) (дочер- ний продукт радона)	103 года	43	Костная ткань, красный костный мозг, легкие	50 сут	$5,75 \cdot 10^3$	5,8	1,55	0,001 (до 0,002 на легкие)

Радионуклид	Период полураспада	Всасыва- емость, %	Место наибольшего накопления в организме	Время двукратного снижения активности в организме	Средняя энергия излучателей, МэВ			Среднегодовая фоновая нагрузка, сЗв (мбэр)
					α	β	γ	
Стронций (^{90}Sr), иттрий (^{90}Y)	29,1 года	5	Все тело, скелет	5700 сут	—	0,2—0,9 (1,1 в кост- ной ткани)		Фоновое содер- жание в среде 0,045 Ки/км ²
Йод (^{131}I)	8,06 сут	100	Щитовидная железа	7 сут	—	0,2	0,4	—
Йод (^{129}I)	$1,57 \cdot 10^7$ лет					$6,4 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	
Цезий (^{137}Cs)	30 лет	76	Все тело, почки, печень	138 сут	—	0,2	0,6	Фоновое содер- жание в среде 0,08 Ки/км ²
Цезий (^{134}Cs)	2,06 года					0,2	1,6	
Плутоний ($^{238(239)}\text{Pu}$)	$8,9 \cdot 10^6$ сут	0,35	Легкие (аэрозольное попадание), почки, печень	$3,2 \cdot 10^4$ сут	5,5	$1 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-4}$	Фоновое содер- жание в среде 0,005 Ки/км ²
					(0,5—270 в костной ткани)			

жителей). Мощными излучателями являются экраны телевизоров, дисплеи компьютеров. Внешним многоспектральным радиационным воздействием, вносящим значительный вклад в суммарную дозу на современных жителей, является космическое излучение, резко меняющее свой состав при подъеме на высоту во время рейсовых пассажирских перелетов. В целом вся совокупность радиационных воздействий удваивает величину среднего естественного радиационного фона (табл. 1.11).

Таким образом, радиационная нагрузка на природную среду нашей планеты, и в том числе на человеческий организм, может быть обусловлена рядом как естественных природных факторов, так и антропогенных изменений среды обитания в результате деятельности человеческой популяции.

В заключение приведем характеристики естественных и антропогенных (ядерно-энергетических) радионуклидов (табл. 1.12).

Вопросы для самоконтроля

1. Назовите геологические функции естественного радиационного фона Земли.

2. Перечислите радионуклиды естественного радиационного фона. Расскажите об их происхождении, метаболических и радиационных характеристиках.

3. Что такое космическое излучение? Назовите радионуклиды, образующиеся при взаимодействии первичного космического излучения с веществом атмосферы.

4. Как в зависимости от географического расположения изменяются естественные фоновые излучения?

5. Какие антропогенные излучатели включены в состав современной среды? Перечислите их источники.

АНОМАЛЬНЫЕ ЕСТЕСТВЕННЫЕ И АНТРОПОГЕННЫЕ ТЕРРИТОРИИ ПОВЫШЕННОЙ РАДИОАКТИВНОСТИ

Около 1—1,2 млрд лет назад в первичной биосфере Земли, сформировавшейся и существовавшей в естественной бескислородной среде 2—2,5 млрд лет, происходит первая экологическая катастрофа: в состав устоявшихся обменных процессов живого, построенных на реакциях восстановления, включаются более конкурентные энергетические звенья обмена экосистем, использующие и генерирующие кислород. Последовавшее глобальное «отравление» среды (докембрийский период) вызвало резкий эволюционный скачок, в том числе и благодаря формированию современной, меняющей спектр космического излучения кислородсодержащей атмосферы, ее озонового слоя, формированию наземной флоры, фауны, почв, экранирующих и перераспределяющих первичный радитонуклидный состав литосферы.

Вместе с тем и в настоящее время существуют обитаемые территории (расположенные на высоте 3—5 тыс. м над уровнем моря), спектр и дозы внешнего космического излучения в которых на все живое, в том числе на человека, близки к докембрийскому. Конвекционные течения мантии Земли, столкновения плит земной коры, вулканические процессы, протекающие с определенной цикличностью, привели к формированию заселенных ныне территорий, радиоактивность которых резко превышает фон (табл. 2.1).

Таблица 2.1

**Эпохи усиленного уранонакопления и повышения радиоактивности
мантии Земли (по А. М. Кузину)**

Время, млн лет назад	Геологический период	Эпоха усиленного уранонакопления
100	Неоген	—
	Палеоген	—
	Мел	Ранний мел — Поздний мел

Время, млн лет назад	Геологический период	Эпоха усиленного ураноаккумуляции
200	Юра	Поздняя юра
	Триас	Поздняя пермь
	Пермь	Контакт пермских и триасовых пород
300	Карбон	Поздний девон —
	Девон	ранний карбон
400	Верхний селур	—
	Нижний селур	—
500	Кембрий	—
600	Криптозойский	Венд
700	Эон	—
800	То же	—
900	»	—
1000	»	—
1200	»	—
1400	Рифей	Граница нижнего и среднего рифея
1600	То же	—
1800	Протерозой	Граница среднего и верхнего протерозоя
2000	То же	Граница нижнего и среднего протерозоя

Со второй половины XX в. в процесс радиоактивной реорганизации среды включается человек, формирующий территории с резко повышенной радиоактивной загрязненностью среды. Окончательного ответа на вопрос об опасности таких воздействий не существует. Определенный вклад в решение этой проблемы вносят материалы настоящей главы.

2.1. Аномальные территории повышенной естественной радиоактивности среды

С подъемом на высоту снижаются парциальные давления кислорода и углекислоты — основных акцепторов энергий квантов и частиц, что ведет к росту плотности потока наиболее агрессивных компонентов фона, нейтронного излучения, вторгающихся в атмосферу из космоса (табл. 2.2).

Тормозные (экранирующие) функции атмосферы снижаются и в направлениях к Северу, Югу от экватора. Мощность магнитосферы Земли (геомагнитных полей, замыкающихся на полюсах), экранирующих радиационных поясов снижается с удалением от экватора, что позволяет тяжелым заряженным частицам (сверхбыстрым протонам, нейтронам, осколкам ядер высоких энергий) достигать здесь поверхности планеты и взаимодействовать с составляющими биосферы, растительностью, животным миром, населением. Данные, иллюстрирующие функциональную связь изменений мощности дозы и состава космических излучений с высотой (3,5 км — знаменатель) над уровнем моря (числитель) и удаленностью от экватора (территории максимальной геомагнитной и экранирующей защиты), показывают, что мощность радиационного фактора может превышать естественную норму средних широт в десятки и более раз:

Широта, град.....	10--20	30—40	50—60	80--90
Суммарная эквивалентная доза естественных космических излучений, мбэр/год	20,7/243	40/470	50/400	142/803

Тем не менее в большинстве случаев такие районы не только обжиты, но и считаются более здоровыми по сравнению с равнинными территориями средних широт. В высокогорьях Памира, например, проводятся тренировки определенных групп профессиональных спортсменов с последующим формированием высокой стайерской выносливости. Территории Альпийского пояса. Карпат являются зонами оздоровительного отдыха и отличаются, помимо характерных экосистемных норм, более высокой дето-

Таблица 2.2

Изменение мощности потока космической радиации с высотой

Высота над уровнем моря, км	Образование пар ионов, см ³ /с	Поток нейтронов, см ² /с
0—0,1 (прибрежная зона)	1,9—2,6	$8 \cdot 10^{-3}$
0,1—0,5 (равнины)	2,6—3,0	$8 \cdot 10^{-3}$
0,5—1,5 (предгорья)	3,0—5,6	$1,7 \cdot 10^{-2}$
1,5—2,5 (альпийские луга)	5,6—6,5	$6,4 \cdot 10^{-2}$
2,5—4 (обитание птиц и растений)	6,5—14,6	$1,8 \cdot 10^{-1}$
≤ 10 (скопление микроорганизмов; полеты человека)	162	1,4

родной функцией коренных популяций. Прирост населения здесь, как правило, высок, резко отличаясь от аналогичных (отрицательных) характеристик здоровья населения западноевропейских стран.

Известно несколько территорий с повышенным фоном естественного космического излучения (табл. 2.3).

На нашей планете существуют также территории с повышенной радиоактивностью, обусловленной аномальной структурой земной коры, имеющей особенности строения горных пород из компонентов, содержащих большие количества естественных радиоактивных веществ, проникших в верхние слои литосферы, в том числе в почвенные покровы. Таковыми породами могут быть монацитовые и богатые торием пески, гранитные, сланцевые породы и ряд других. Территориями с повышенной радиоактив-

Таблица 2.3

Территории с повышенным космическим излучением

Территория; высота над уровнем моря, м	Суммарная эквивалентная доза мбэр/год (% от естественной нормы)	Экологическая характеристика среды	Численность и репродуктивная способность населения (1990—2000 гг.); средний расчетный показатель, ‰
Западное Закавказье, Карпаты; 1428—3724	220—360 (550—900)	Хвойные, буковые леса, луга, субтропический климат	4 млн чел.; + 13,5
Альпийский пояс; 2200—3000 м. Летние пастбища (курорты); 3600—5100	220—580 (550—1450)	Хвойные, кустарник (альпийские ковровые луга, рододендрон, черника)	Несколько млн чел.; + 0,25
Памир (Китай, Монголия, Таджикистан, Афганистан); 3500—4000	360—470 (900—1175)	Степи, леса в долинах рек	Несколько млн чел.; + 17,1
Гималаи, Индийско-Гангская долина 33 тыс. км ² ; 4000—5000	310—490 (775—1225)	Равнины, тропический климат	Несколько тыс чел.; + 10,5
Северные широты, Заполярье (Норвегия, Дания, Исландия и др.)	142—472 (355—1180)	Заполярный климат	Несколько млн чел.; + 7,9

ностью являются монашительные районы штатов Керала и Малера (Индия), где доза облучения населения достигает 3924 мбэр/год, что в 30 раз выше дозы, получаемой населением средних широт, принятой за норму; ряд районов Бразилии (штаты Рио-де-Жанейро, Минад-Энейрас, поселок Гуарапари) и остров Ниуэ (Тихий океан) с годовыми дозами облучения населения, достигающими 1150—1800 мбэр/год, что в 8,5—13 раз выше нормы. На указанных территориях проживают в общей сложности около 500 тыс. человек.

К территориям повышенного радиоактивного фона в нашей стране следует отнести все горно-складчатые периферические области: Урал, Магнитогорск, Нижний Тагил, Красноярск и др. (около 1—1,5 млн человек). Источники излучений здесь не только формируют повышенные лучевые нагрузки, но и включены в метаболизм всех звеньев экосистем, накапливаясь в организме проживающих здесь жителей. В отличие от районов средних широт с умеренным радиоактивным фоном лучевые нагрузки на население здесь превышают естественный фон в 10—15 (порой в 30) раз. Не менее 30 % излучателей здесь представлены α -активными радионуклидами группы урана-тория, формирующими преимущественные лучевые нагрузки на гонады, кроветворные ткани, мозг. Вместе с тем это не меняет, а порой улучшает состояние здоровья местных жителей. В эволюционном плане именно эти территории явились местами эффективного (конкурентного) видообразования современных сельскохозяйственных растений, животных, человека (рис. 2.1).

Помимо территорий аномальных, но постоянных естественных радиационных воздействий, по всей вероятности, определенную роль выполняют связанные с ростом солнечной активности периодические глобальные повышения мощности корпускулярных и жестких фотонных излучений, достигающих поверхности Земли в нормальных районах. В 1920-х гг. А. Л. Чижевский проследил причинную связь между активностью на Солнце и земной жизнью по летописям, монастырским хроникам, дневникам путешественников, запискам астрономов, данным статистики, медицины, ботаники и др. Столь разнообразные источники помогли ему выявить удивительные закономерности: чума, холера, дифтерия и другие инфекционные болезни активизируются в периоды максимальной солнечной активности. С колебаниями солнечной активности связаны также циклические изменения количества лейкоцитов в крови, содержания в ней сахара, солей кальция и калия, свертываемость крови, сдвиги электрического потенциала кожи людей, периодические колебания плодовитости диких и сельскохозяйственных животных. Даже толщина колец на срезах деревьев, характеризующая скорость нарастания их живой массы, обнаруживает 11-летнюю периодичность.

Активность Солнца, регулярно повторяющаяся через 11 лет, сопровождается появлением черных пятен, протуберанцев в его короне, выбросом в межпланетное пространство потоков электронов, протонов, тяжелых ионов, с суммарной мощностью которых (до 10^{25} Дж) атмосфера, радиационные пояса, геомагнитные поля планеты не справляются. Потоки протонов, начальная энергия которых превышает 500 МэВ, регистрируются (с 1942 г.) на поверхности Земли с некоторым опозданием после пика солнечной активности. Плотность потоков нейтронов во время солнечных вспышек большой интенсивности превышает нормальный корпускулярный поток в тысячи (регистрация 23.02.1956), в период малых возрастных активностей — в десятки и сотни раз. Мишенью частиц высоких энергий при малой плотности потока являются преимущественно *нейроны*, с повреждением которых на макропопуляционном уровне и связаны, по всей вероятности, возрастающие в этот период агрессивность хищников, частота транспортных аварий, обострений хронических нервно-психических и сердечно-сосудистых заболеваний и др. (В. А. Барабой, 1976).

2.2. Территории повышенной радиоактивной загрязненности среды от проведения ядерных взрывов

К концу 1942 г. на территории Чикагского университета, в помещении зала для игры в мяч под трибунами университетского стадиона, началась подготовка к пуску первого в мире ядерного реактора. Установка массой в несколько тонн оказалась способной генерировать энергию, мощность которой превзошла все теоретические расчеты. Хиросима (6 августа 1945 г.) и, несколько позднее, Нагасаки стали первыми и, скорее всего, единственными мишенями для ядерного оружия. Наиболее загрязняющие среду испытания атомных зарядов в Америке велись в штате Невада (Запад США, население 799 тыс. чел.), на атолле Бикини (Маршалловы острова в Тихом океане, общая площадь 5 км²); в России (СССР) — на Семипалатинском полигоне (население прилегающих территорий 803 тыс. чел.), на Новой Земле, в Северном Ледовитом океане (общая площадь 83 тыс. км², арктическая пустыня, тундра). Незначительный вклад в формирование аномальных радиационных территорий внесли Франция (о. Муруроа), Китай (высокогорье Лобнор на западе Китая, 780 м над уровнем моря).

США было проведено наибольшее в мире число ядерных взрывов (1085), в том числе и с официально зарегистрированными радиоактивными загрязнениями среды в 270 мКи (против принятой в стране нормы 100 мКи), в том числе и в прилегающих

к территории испытаний штатах Вермонт, Массачусетс, Нью-Мехико.

В нашей стране осуществлено 715 взрывов, в том числе самое большое количество испытаний в атмосфере (215). Большинство этих взрывов проведено на Семипалатинском полигоне, а также на Новой Земле, где были проведены взрывы (особенно водородной бомбы в 1961 г.) самой большой мощности в мире. Совокупный тротильный эквивалент проведенных здесь испытаний был эквивалентен 90 МВт. Радиоактивными цезием, стронцием, плутонием загрязнена тундра побережья Баренцева и Карского морей, крайний Север Западной Сибири. Полигон и прилегающие к островам прибрежные воды и заливы используются и как могильник отработавших реакторов, в том числе первого в мире атомного ледокола «Ленин»).

В целом загрязненность прилегающей к полигонам среды редко заселенных территорий России, Казахстана составляет $\leq 0,07$ Ки/км² по цезию-137. Максимальная активность радиоактивных выпадений регистрировалась в Андерме (Ненецкий округ), превышая фон в 11 тыс. раз. Величина радиоактивности в цепочке на территориях севернее 60° с.ш., «миграция радионуклидов — лишайник — северный олень — человек», превышает фоновую в 10 и более раз.

Помимо ядерных испытаний, в нашей стране и США проводились георазведочные и промышленные ядерные взрывы (по договору от 28.05.1976) при условии полной экологической безопасности.

В США, после подписания договора 1976 г. было проведено 27 подземных ядерных взрывов преимущественно с целью выявления глубоких газонефтяных месторождений в штатах Невада, Нью-Мехико. Только один из них оказался результативным — месторождение газа в Нью-Мехико. Нерентабельность заставила отказаться от ядерной георазведки.

В СССР в мирных целях было проведено 115 подземных ядерных взрывов, в том числе 89 в России (16 в Западной Сибири, 15 в Астраханской области, 10 в Пермской области и от 2 до 5 в Башкирии, на Северном Кавказе, Мурманской и других областях) (рис. 2.2).

Основой экологической безопасности здесь служила температура в точке взрыва $\sim 10^6$ °С, ведущая к выплавлению радиоактивных продуктов деления в состав литосферы. Взрывы велись в малообитаемых районах страны. Риску повышенного загрязнения подвергалось незначительное число близлежащих поселков, городов (несколько сотен человек).

Основная часть радионуклидов деления выплавлялась в породу, формируя газонепроницаемую емкость. Однако под действием подземных вод, перепадов температур в последующем возможна

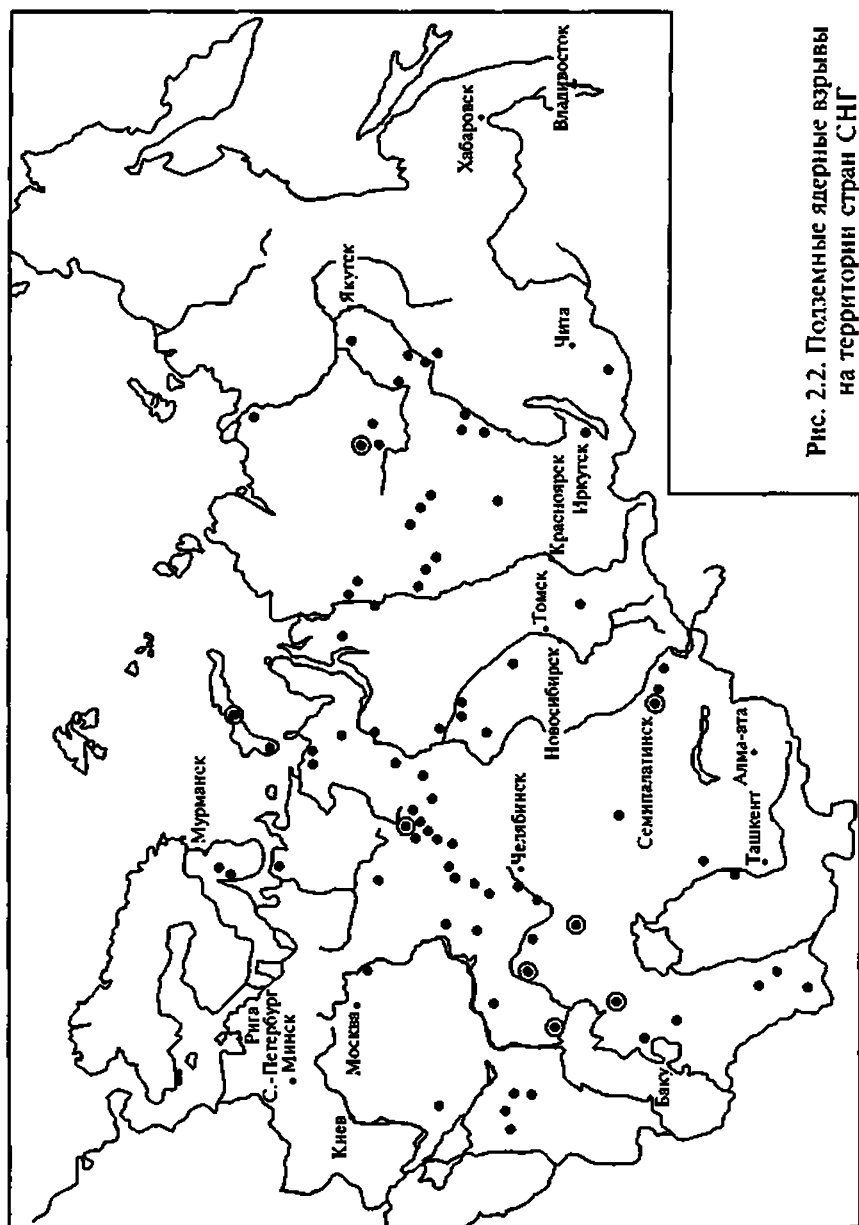


Рис. 2.2. Подземные ядерные взрывы на территории стран СНГ

разгерметизация локальной радиоактивности и ее труднопрогнозируемая миграция. Как и в США, подобные взрывы признаны нерентабельными, наносящими труднопрогнозируемый ущерб окружающей среде, и в настоящее время не проводятся.

2.3. Аварийное радиоактивное загрязнение среды

Потенциальными источниками формирования аномальных антропогенных радиоактивных загрязнений среды являются атомные электростанции мира. Первый на Евразийском континенте реактор (пущенный 25 декабря 1946 г. на окраине Москвы) и первая в мире атомная электростанция (1954 г., Обнинск) строились и эксплуатировались с чрезвычайной предосторожностью. По теоретическим прогнозам тех лет — расчетам американских физиков в 1958 г., авария на обычной АЭС могла бы привести к гибели 3400 чел. и переоблучению 43 тыс. чел. на территории в 385 тыс. км². В последующем, на основании анализа эксплуатации АЭС, осторожность резко снизилась, что привело к сокращению зон отчуждения вокруг АЭС (территорий запрета на строительство жилья).

За 1956—1990 гг. в нашей стране было построено 12 АЭС с 37 реакторами и 20 исследовательских реакторов (табл. 2.4).

Отечественные реакторы по системе защиты были признаны (Лондон, 1960) наиболее безопасными, и до аварии на Чернобыльской АЭС инцидентов на них не происходило. Тем не менее типовые загрязнения среды даже при нормальном режиме работ неизбежны. Поэтому территории, непосредственно прилегающие к АЭС, реакторам, пунктам захоронений радиоактивных отходов, следует отнести к разряду с повышенной радиоактивностью среды (рис. 2.3).

В последующем это подтвердилось рядом аварий на АЭС в США и Англии (20 аварий за 20 лет), а затем в нашей стране и в Японии.

Состав радиоактивного загрязнения среды на прилегающих к АЭС и исследовательским реакторам территориях тот же, что и при ядерных взрывах, авариях, но при значениях, в сотни раз меньших по сравнению с загрязнениями от испытаний ядерного оружия.

Нередко радиоактивность среды связана с халатностью работников исследовательских радиационных лабораторий разного профиля. Ярким примером этому может служить радиоактивная загрязненность Москвы. На территории города в ходе скрупулезных обследований, выполненных после чернобыльских событий, обнаружено до 80 мест нерегистрированных «захоронений» использованных радионуклидов. В целом за 10 лет ликвидировано до 600 «могильников» такого рода (рис. 2.4).

ЭС и исследовательские реакторы России

АЭС (годы ввода в эксплуатацию)	Число реакторов	Месторасположение и численность населения
Балаковская (1985)	3	город-порт Балаково на Волге, 180 тыс. жителей
Белоярская (1980)	1	пос. Заречный Свердловской обл., несколько сотен жителей
Билибинская (1974 — 1976)	4	пос. Билибино Чукотского автономного округа (горнорудная промышленность), несколько сотен жителей
Калининская (1976)	2	ж-д станция «Удомля». Деревообрабатывающий завод, несколько сотен жителей
Кольская (1974)	4	пос. Полярные Зори Мурманской обл., Горнорудная промышленность, несколько сотен жителей
Курская (1974 - 1975)	4	пос. Курчатова Курской обл. на реке Сейм, несколько сотен жителей
Ленинградская (1973 — 1985)	4	г. Сосновый Бор Ленинградской обл., Машиностроительный завод, 53 тыс. жителей
Нововоронежская (1971 — 1980)	3	г. Нововоронеж Воронежской обл., несколько сотен жителей
Смоленская (1985 — 1990)	3	пос. Десногорск Смоленской обл., несколько сотен жителей
Обнинская (1956)	1	г. Обнинск Калужской обл., 91 тыс. жителей
Томская	5	Томск-7, Томская обл., 107 тыс. жителей
Красноярская	3	Красноярск-26, Красноярская обл., около 90 тыс. жителей
Исследовательские реакторы	9	Москва (Химки, Севастопольский, Сокольнический р-ны)
	3	Санкт-Петербург, г. Сосновый бор Ленинградской обл.
	1	Обнинск (учебный центр по ядерной энергетике)
	7	г. Димитровград Ульяновской обл., НИИ атомных реакторов, 116 тыс. жителей

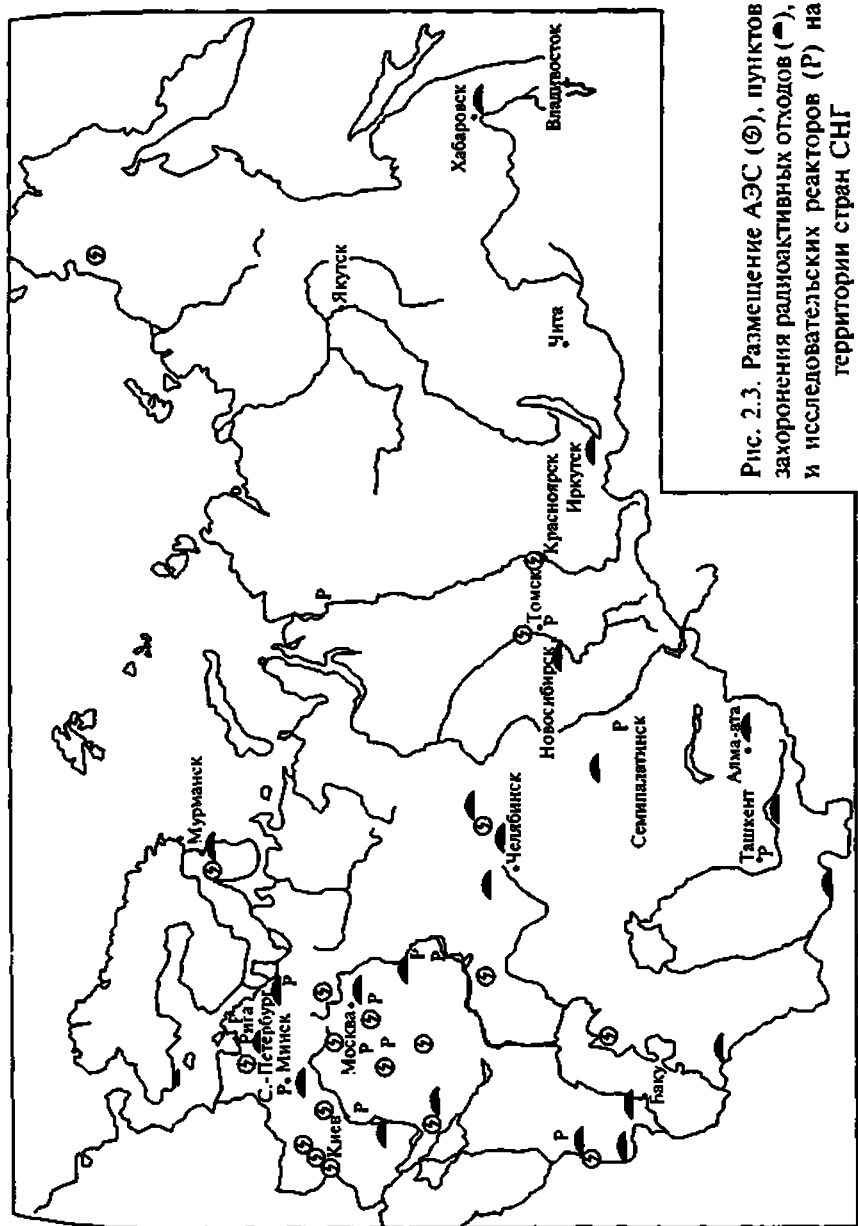


Рис. 2.3. Размещение АЭС (⊙), пунктов захоронения радиоактивных отходов (⊖), и исследовательских реакторов (Р) на территории стран СНГ

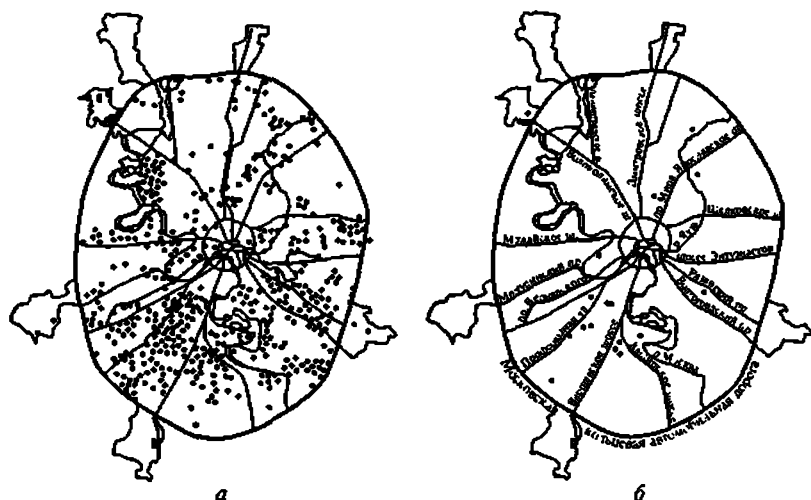


Рис. 2.4. Источники радиоактивного загрязнения в Москве:

а — схема находок источников загрязнения; *б* — очаги загрязнения после проведения работ по их ликвидации

Радиоактивное загрязнение среды в крупных масштабах произошло в результате аварии на военном ядерном центре «Челябинск-40» (или «Маяк») в 1957 г. вследствие теплового взрыва одного из ядерных хранилищ. Радиоактивный выброс (облако) охватил значительную часть Челябинской области (с населением 3548 тыс. чел.) и прилегающие районы Тюменской, Курганской, Свердловской областей. Максимальная длина образовавшегося Восточно-Уральского радиационного следа составила 300 км. Загрязнение среды активностью свыше 0.1 Ки/км^2 (по стронцию-90, основному радионуклиду взрыва) охватило 23 тыс. км^2 , 217 населенных пунктов с общей численностью населения 270 тыс. чел. Территория с плотностью загрязнения более 2 Ки/км^2 составила 1000 км^2 с населением 2,1 тыс. чел. С территорий, загрязненность которых превышала 2 Ки/км^2 (принятый предел), были переселены 10,2 тыс. чел.

Помимо аварийной загрязненности, на территории района площадью 30—40 км^2 (санитарно защитная зона междуречья Теча—Мишеляк) было сосредоточено более 200 могильников: с радиоактивностью 4 млн Ки — вплавлены в стекло; с 150 млн Ки — в спецхранилищах и емкостях; с ~200 млн Ки — сброшены в озеро Карачай, Старое Болото, пойму реки Течи (отделенной к настоящему времени от реки дамбой).

К локальным, менее значительным территориальным загрязнителям следует отнести ремонтные заводы и базы атомных кораблей, хранилища ядерного оружия и другие объекты. На таких

объектах (побережье Северного Ледовитого океана, Мурманская, Архангельская, Ленинградская, Московская, Пермская, Новосибирская, Читинская области и Дальний Восток) были зафиксированы случаи повышения радиоактивности внутри объектов или выявлены участки локального повышения радиоактивности. Однако последствий локальных загрязнений зарегистрировано не было.

Всего на военно-морских базах США, России, Франции, Китая базируется свыше 420 атомных подводных лодок. Несмотря на четко отработанные системы радиационной безопасности, методы обслуживания, соблюдения допустимых величин радиационного фактора, локальность и отдаленность от населения, потенциальная опасность аварий здесь довольно высока. Атомные подводные лодки, особенно России и США, постоянно следя за «партнерами» по мирному сосуществованию, нередко сталкиваются и одна с другой, и с судами. Авария реактора на первой АПЛ США «Наутилус» стала причиной гибели нескольких членов экипажа еще до спуска на воду. Пожар на АПЛ «Сарго» (США) стал причиной ее затопления у пирса базы с последующим подъемом и ремонтом. В 1963 г. в Атлантике затонула АПЛ США «Трешер» со 129 моряками на борту. В 1968 г. у Азорских островов исчез «Скорпион» (99 чел.), найденный в последующем на большой глубине. По одной из версий лодка погибла от собственной аварийной торпеды. В том же году в районе Гавайских островов погибла наша дизельная лодка с ядерными боеприпасами на борту (97 чел.), в 1986 г. «К-219» (в Бермудском треугольнике), в апреле 1989 г. — «Комсомолец», в 2000 г. — «Курск».

Авария на Чернобыльской АЭС, приостановившая развитие ядерной энергетики мира, вследствие «радиационного страха», произошла 26 апреля 1986 г. в ходе эксперимента с недозволенным отключением систем блокировки. Два взрыва вынесли в среду радиоактивность ядерного топлива реактора и продуктов его деления на высоту 600—1200 м. Первичный выброс в виде газов и аэрозолей ^{137}Cs (^{134}Cs) составил $2 \cdot 10^6$ Ки, ^{131}I — $2 \cdot 10^7$ Ки при незначительной доле других радионуклидов. Активность основных радионуклидов, выброшенных и деформировавших среду, приведена в табл. 2.5.

Оставшаяся активность сочилась в течение последующих 10 сут, загрязняя среду. Население об этом не оповещалось (сообщалось об управляемости аварией), должные меры защиты приняты не были.

На АЭС в момент взрыва работало 200 чел. и 900 чел. (ночная смена) находились на расстоянии 5 км от аварийного реактора, на строительстве 5-го и 6-го блоков АЭС. В момент взрыва погибли два человека. В течение первых трех дней 399 чел. были отправлены в Москву и Киев с подозрением на острую лучевую болезнь.

**Суммарная активность некоторых радионуклидов, выброшенных
в атмосферу ЧАЭС (по литературным данным)**

Нуклид	Период полураспада	Суммарная активность выброса, Ки	Доля, % от	
			количества в реакторе	суммарной активности выпадения к 1993 г.
^{127}Cs	30 лет	2,3	31	89,4
^{134}Cs	2 года	1,4	31	4,4
^{131}I	8 суток	1798	55	—
^{90}Sr	29 лет	0,46	4	1,9

Территориальное распределение радиоактивного загрязнения шло неравномерно. Радиоактивным выпадениям, повысившим радиационный фон не более чем в 5 — 10 раз за счет короткоживущих изотопов, подверглись территории Польши, Германии (ГДР), Италии, Швейцарии, Франции, Бельгии, Нидерландов. К началу мая аналогичные выпадения регистрировались в Великобритании, Греции, Израиле, Кувейте, Турции. Но наиболее массивным загрязнением были подвержены 13 областей России, Белоруссии, Украины: Минская, Брестская, Ровненская, Могилевская, Гомельская, Житомирская, Киевская, Черкасская, Черниговская, Брянская, Калужская, Орловская, Тульская. Суммарная площадь районов с загрязнением $> 40 \text{ Ки/км}^2$, потребовавших срочной эвакуации свыше 130 тыс. чел., составила 7000 км^2 (2000 км^2 в России). Для дезактивации территорий было снято около 200 тыс. м^3 грунта, заасфальтировано 2500 км дорог, снесены и захоронены несколько деревень.

Меры тем не менее оказались крайне неэффективными, и обратное заселение (особенно в Белоруссии) было разрешено в некоторые населенные пункты.

Распределение радиоактивной загрязненности чрезвычайно мозаично. Общая площадь цезийстронцийплутониевой и короткоживущей подной радиоактивной загрязненности в России составила 147 тыс. км^2 с 4270 населенными пунктами и общей численностью населения $\sim 3 \text{ млн чел.}$ (табл. 2.6); треть населения территорий с резко изменившимся составом среды (783 тыс.) — дети.

Наиболее сильно в России пострадали Брянская, Калужская, Тульская области, а также ряд районов Воронежской и Липецкой областей (табл. 2.7).

Критическими радионуклидами загрязнений являются цезий (79,3 % от суммарной радиоактивности среды); стронций (19,8 %) и микровкрапления плутония (0,9 %).

Области России с загрязнением более 1 Ки/км²

Область	Число населенных пунктов	% загрязненных почв области
Белгородская	37	8
Брянская	1177	34
Воронежская	21	1,5
Калужская	338	17
Курская	171	4,4
Ленинградская	44	1
Липецкая	85	8
Орловская	525	40
Рязанская	378	15
Смоленская	47	0,5
Тульская	1447	47

Примечание. Средний уровень современного (глобального) фонового загрязнения среды по ¹³⁷Cs составляет 0,08 Ки/км², по Sr — 0,045; плутонию — 0,005 Ки/км².

В Белоруссии доля территорий, радиоактивность которых превышала (по данным Международной программы по последствиям чернобыльской аварии) 1 Ки/км², составила 22 % (20 % населения). Общая площадь загрязненности — 80 %. Из зон отселения и отчуждения было срочно эвакуировано 24,7 тыс. чел., 33 лечебно-профилактических учреждения осуществляли экстренное медицинское обслуживание эвакуированных.

На Украине загрязнению подверглось около 30 % территорий. Наиболее пострадавшим, потребовавшим экстренной медицинской помощи, оказалось Полесье. Радиоактивность Овручинского, Ивановского, Полесского районов достигала здесь 40 Ки/км², накапливаемые эквивалентные дозы — 4,86 бэр/год. Общая численность населения республики, получившего повышенные лучевые нагрузки (по данным 1991 г.), составила 1,53 млн чел.

На территориях естественных аномальных радиационных воздействий, превышающих внешние лучевые нагрузки фона в пять—десять раз, проживают на протяжении тысячелетий несколько десятков миллионов человек; на территориях резко повышенных внутренних и смешанных естественных лучевых воздействий от излучений почв, минералов, радионуклидов, проникающих в организм, — примерно столько же.

Распределение радиоактивности на территориях, максимально пострадавших от аварии на Чернобыльской АЭС

Область, административный район	Радиоактивность, Ки/км ²		Число населен- ных пунктов	Площадь районов, км ²	Числен- ность насе- ления, тыс. жителей
	средняя	в локальных точках			
Брянская обл. Дятьковский Клинцовский Стародубский	1 — 5	3 — 20	6750	5900	701
Новozyбковский Красногорский Климовский Гордеевский	5 — 15	20 — 150	260	2622	150
Красногорский Гордеевский	15 — 40 и выше	60 — 200	175	244	82,7
Калужская обл. Жиздринский Ульяновский Хвастовичский	1 — 5	5 — 30	235	6700	171,2
Тульская обл. Белевский Богородицкий и др. (всего 18) Арсеньевский Киреевский Плавский и др.	5 — 15	До 40	63	4200	5,0
Тульская обл. Белевский Богородицкий и др. (всего 18) Арсеньевский Киреевский Плавский и др.	1 — 5	1,5 — 15	> 1000	13140	1400
Воронежская обл. Липецкая обл.	5 — 15	7 — 30	274	3000	113
Воронежская обл. Липецкая обл.	1 — 5	113	11 000	Нет св.	Нет св.

К настоящему времени в связи с резкими изменениями радиационного состава среды преимущественно вследствие аварий и радиационных воздействий, превышающих фон в той же, что и в естественных аномальных районах, кратности, численность облучаемого населения примерно удвоилась.

Очевидно тем не менее, что реакции на новейшие антропогенные воздействия радиации отличаются от реакций на аномальные естественные. Такие различия требуют расшифровки сложного противоречивого процесса. Ф. Содди (1979), один из теоретиков ядерных реакций, писал о возможных биокаталитических влияниях новых видов излучений, оказавшихся в распоряжении человечества: «на высоких плато встречается большее разнообразие растительности, чем на уровне моря. После атомного взрыва в

Хиросиме цветущая растительность заполнила все выжженное пространство». Его коллега, Грейб, эксперт по вопросам риска атомной энергетики, противопоставляя этому гибель лесов вблизи АЭС Безнау (близ Нью-Йорка), задается вопросом: «В чем причина таких различий в реакциях? Какова здесь роль радиоактивности среды, собственно радиационного фактора и его принятых интегративных величин — доз радиационных воздействий?» Ключ к ответу, по-видимому, в особенностях поведения долгоживущих радионуклидов в экосистемах и ее звеньях.

Вопросы для самоконтроля

1. Что относится к территориям с резко повышенным внешним (космическим) радиационным фоном?
2. Что включают в себя территории с резко повышенной радиоактивностью верхних слоев атмосферы, почв, составляющих биосеносов?
3. Каков вклад ядерных взрывов в радиоактивную загрязненность среды?
4. Назовите радиационно-экологические последствия работы атомных электростанций в нормальном и аварийном режимах.
5. Как происходит загрязнение среды от военных источников?
6. Расскажите о радиоактивном загрязнении среды от аварии на Чернобыльской АЭС.

ПОВЕДЕНИЕ ДОЛГОЖИВУЩИХ РАДИОНУКЛИДОВ ЯДЕРНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ В ЭКОСИСТЕМАХ

Радиоактивность, как показано в гл. 2, не является новейшим (чужеродным) компонентом среды. Современная мощность ее антропогенных воздействий изменяется в пределах не только геологического прошлого (первичных космических и земных излучений), но и современных естественных колебаний радиоактивности, связанных со структурами плит земной коры, высотой над уровнем моря, близостью к полюсам, периодами солнечной и геологической активности. Включение новейших по своим химическим свойствам и спектру излучений радионуклидов в состав среды меняет сформировавшиеся соотношения (баланс) поглощаемой радиации и ее спектров во всех звеньях экосистем, — от молекулярных до геопланетарных. Радионуклиды, продолжающие (по В. И. Вернадскому) «космические функции инициации жизни», избирательно накапливаются в активных звеньях экосистем в нехарактерных для устоявшихся на протяжении миллионов лет количествах. Такое перераспределение спектра и эффектов радиационных воздействий при резких различиях радиочувствительности взаимозависимых звеньев экосистем (сапрофитной микрофлоры — простейших — растительности — млекопитающих) может, по достижении труднопредсказуемого предела, привести к резким нарушениям экосистемного гомеостаза с последующим ростом патологических реакций, при отсутствии прямой связи с радиоактивностью среды. Вероятность таких реакций, разработка мер их профилактики и коррекции требуют знаний характера поведения радионуклидов ядерно-энергетического происхождения в среде.

3.1. Поведение долгоживущих радионуклидов ядерно-энергетического происхождения в атмосфере

Атмосфера является мощным акцептором техногенных, в том числе и ядерно-энергетических, радиоактивных газоаэрозольных

выбросов. Их последующее включение в токи воздушных масс, рассеяние, медленная механическая (гравитационная) седиментация ведут к относительно равномерному (глобальному) распределению цезий-стронциевых фоновых загрязнений среды. Наиболее загрязняют атмосферу наземные испытания ядерного оружия. Поступление и последующее распределение радиоактивности подчиняется здесь ряду закономерностей, предполагающих длительное присутствие фактора в составе среды.

При взрыве ядерных устройств суммарная цепная реакция деления в критической массе ядерного топлива происходит за 0,1 мкс. Процесс сопровождается выделением громадной энергии, ведущей к разрушению не только молекулярных (химических), но и ядерных связей вещества, образованию чрезвычайно активного шарообразного скопления плазмы (оголенных ядер), быстро расширяющегося в атмосфере. В процесс вовлекаются газы и аэрозоли воздушной среды, образующие радиоактивные аэрозоли с частицами разных диаметров, поднимающиеся в виде гриба.

Объем образовавшегося облака составляет примерно 100 км^3 при взрыве мощностью 20 кт тротилового эквивалента и 5000 км^3 при 1 Мт тротилового эквивалента. От 20 (при минимальной мощности взрыва) до 90 % (при максимальной) радиоактивных осколков деления попадает в стратосферу, остальное — в тропосферу.

При попадании радиоактивных аэрозолей в тропосферу происходит их глобальное «размывание» и перемещение током воздушных масс с большой скоростью, преимущественно по географическим параллелям от мест взрыва. Так, продукты ядерных испытаний 07.03.1955 в штате Невада (США) в значительных количествах выпали 12.03.1955 в Ленинградской области. После взрыва в Сахаре 13.02.1966 продукты деления были обнаружены 17.02.1966 в Крыму. Аналогично распространялись радионуклиды после чернобыльской аварии.

Основная часть загрязнений тропосферы выпадает с осадками в ближайшие дни-недели от момента взрыва в результате вовлечения аэрозолей в процессы формирования облаков. Незначительная часть радионуклидов сорбируется аэрозолями воздуха, коагулируется с последующим «сухим» выпадением частиц. Скорость очищения тропосферы подчиняется экспоненциальному закону с периодом полуочистки 20—40 сут.

Гравитационное оседание частиц, ушедших в стратосферу, происходит крайне медленно, на протяжении десятилетий. Облако, ушедшее в «резервуар» антропогенных радионуклидов, захватывается стратосферными воздушными течениями по параллелям со скоростью $\sim 100 \text{ км/ч}$ и, постепенно вытягиваясь, формирует антропогенные радиоактивные кольца планеты. Гравитационное оседание аэрозолей протекает здесь медленно вслед-

ствии постоянных турбулентных токов плотных подлежащих слоев атмосферы при незначительных, порядка $0,1 - 10$ мкм, размерах радиоактивных частиц. Формирующееся равновесие с некоторым (незначительным) преобладанием седиментационных процессов ведет к длительному, равномерному малоинтенсивному загрязнению среды преимущественно северного полушария планеты (см. рис. 1.1).

Состав радионуклидов ядерного происхождения за время циркуляции в стратосфере меняется. Короткоживущие радионуклиды (наибольшая часть взрыва) распадаются, оставляя место цезий-стронциевым источникам глобального малоинтенсивного загрязнения среды. Переход стратосферных радионуклидов в тропосферу с последующим осаждением (механизмы невыяснены) происходит преимущественно на широте $25 - 30$ град в обоих полушариях с максимумом в Северном (рис. 3.1).

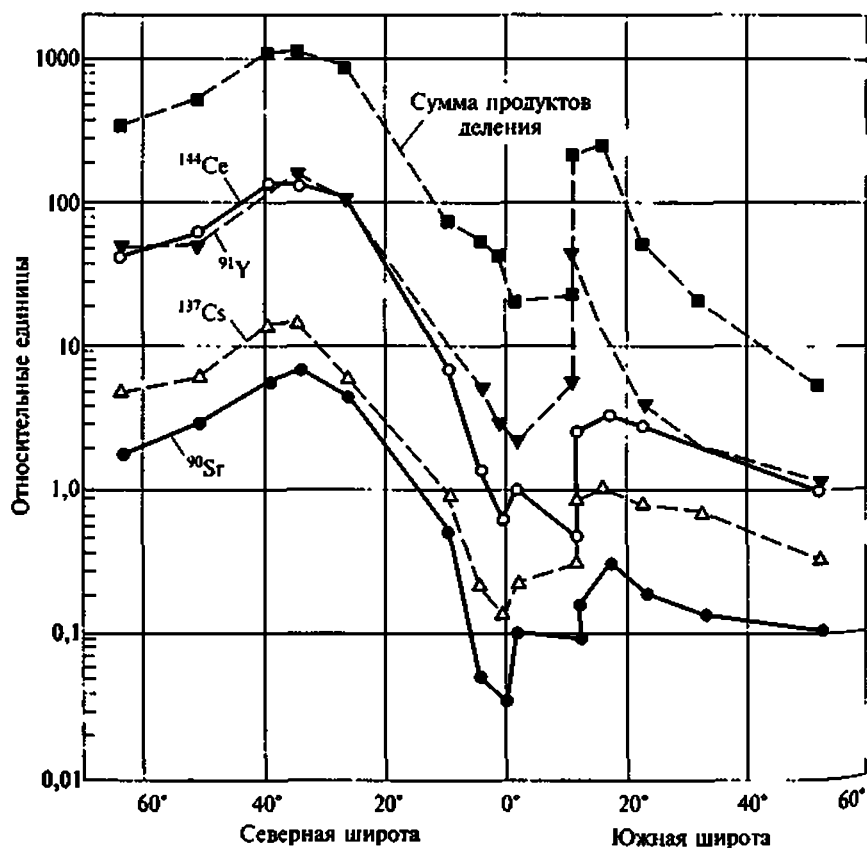


Рис. 3.1. Распределение концентраций продуктов деления ядерных взрывов в воздухе планеты на разных широтах

Наибольшая часть выпадений (стратосфера — тропосфера — земная поверхность) смещается на широту 40—50 град. Динамика глобальных выпадений меняется в течение года, при максимуме, приходящемся на весну и начало лета (I и II кварталы — в северном и IV — в южном полушариях). В изменения собственно функций и структуры атмосферы радиационные загрязнения этого ряда существенного вклада не вносят.

Безаварийные выбросы атомными электростанциями являются незначительными, но постоянными источниками поступления радионуклидов в атмосферу. Большая часть атмосферных загрязнений, выпадающих на поверхность Земли, при нормальном режиме работы АЭС крайне незначительна. В состав аэрозолей, выбрасываемых в атмосферу вследствие аварийной утечки теплоносителя первого контура реактора, входит сложный комплекс радионуклидов, в том числе ^{88}Kr , ^{134}Cs , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{54}Mn , ^{140}Ba , ^{140}Za , ^{89}Sr , ^{131}I . Количество радиоактивных веществ, поступающих с выбросами реакторов в атмосферу, невелико. Коллективная ожидаемая доза облучения населения, проживающего в радиусе 100 км от реактора при плотности 100 чел./км², рассчитанная из среднего выброса и соответствующих дозовых коэффициентов, может колебаться от $3 \cdot 10^{-7}$ до $1 \cdot 10^{-4}$ чел./Гр/год.

Наибольшую опасность как потенциальные источники загрязнения атмосферы представляют предприятия по переработке ядерного топлива. Отходы (тепловыделяющие элементы — ТВЭЛы) этих предприятий содержат значительное количество долгоживущих радиоактивных веществ, в том числе радионуклиды, которые могут беспрепятственно поступать во внешнюю среду вследствие отсутствия разработок методов, позволяющих связывать или механически задерживать их. К таким радионуклидам относятся, в частности, тритий (^3H) и криптон (^{85}Kr), образующиеся при обработке ТВЭЛов. Отработавшие ТВЭЛы, поступающие на радиохимические заводы по переработке ядерных отходов, хранят под водой, которая одновременно служит охлаждающей средой и защитой (экраном) от ионизирующих излучений. Из хранилища ТВЭЛы направляют в камеру предварительной обработки, где их демонтируют, а стержни подвергают механической обработке для извлечения остатков топлива, которые выщелачивают азотной кислотой, а затем разделяют уран, плутоний, продукты деления и активации. Такая обработка ТВЭЛов сопровождается выделением газообразных и летучих продуктов деления. Опыт эксплуатации заводов по переработке ядерного топлива показал, что с выбросами этих предприятий в атмосферу поступают ^3H , ^{14}C , ^{85}Kr , ^{129}I , ^{131}I , ^{106}Ru , ^{134}Cs , ^{137}Cs , радиоактивные актиноиды.

Особого внимания в плане загрязнения атмосферы заслуживает радиоактивный криптон. На заводах по переработке ядерного топлива образуется около 400 Ки ^{85}Kr ($14,8 \cdot 10^{12}$ Бк) на 1 МВт (эл.)

в год. Доза на гонады от ^{85}Kt на расстоянии 1—100 км от завода крайне незначительна и составляет $2 \cdot 10^{-6}$ чел. рад ($2 \cdot 10^{-8}$ чел. Гр) на 1 Ки ($3,7 \cdot 10^{10}$ Бк), или 0,0007 чел. рад ($7 \cdot 10^{-6}$ чел. Гр) на 1 МВт (эл.) в год.

Вместе с тем именно эта химически инертная и безопасная в радиационном отношении составляющая выбросов является агрессивной по отношению к физическим экосистемным функциям атмосферы вследствие ее мощного вклада в ионизацию воздушной среды и трансформации нормального распределения этого процесса в разных слоях атмосферы.

Ионизация верхних слоев атмосферы под действием жесткого ультрафиолетового и ионизирующего излучений ведет к фотодиссоциации кислорода и образованию атмосферного озонового слоя планеты, выполняющего одну из важнейших экосистемных функций — экранирования и фильтрации космических излучений.

Второй, аналогичный, приземный слой атмосферы формируется благодаря реакциям ионообразования в непосредственной близости от поверхности Земли под действием радиации от естественных радионуклидов, преимущественно радона. При взаимодействии с этим газом над морем образуется до $12 \cdot 10^3$ пар ионов в 1 м^3 воздуха в секунду и до $5 \cdot 10^6$ пар ионов — над сушей. Образование ионов в приземных слоях играет, очевидно, существенную антибактериальную (противоэпидемическую) функцию в биоценозах.

Распределение антропогенного источника ионизации атмосферы резко отличается от естественного. Практически весь образующийся ^{85}Kt выбрасывается в атмосферу в северном полушарии. Это приводит к некоторой неравномерности его распределения в атмосфере земного шара. Концентрация ^{85}Kt в южном полушарии в 1,3—1,4 раза ниже, чем в северном. По высоте ^{85}Kt распределяется практически равномерно вплоть до 20—25 км над уровнем моря. В настоящее время концентрация ^{85}Kt в атмосфере составляет $\sim 3 \text{ нКи/м}^3$ воздуха независимо от высоты над уровнем моря. Равномерное (по высоте) распределение криптона (β -активного излучателя с энергией β -частиц 0,25 МэВ и энергией γ -квантов 0,514 МэВ, периодом полураспада 10,75 лет) в атмосфере может привести к неблагоприятным экологическим последствиям.

Ионы воздуха являются ядрами конденсации и соответственно образования и роста водяных капель, сорбирующих основные сульфатные и нитратные токсические загрязнители атмосферы. Повышенная конденсация, как следствие повышенного диффузного ионообразования, в сочетании с массивным токсическим техногенным загрязнением среды является одним из факторов образования кислых туманов и дождей, закисления почв и ухудшения их репродуктивных функций, ведет к снижению иммунитета и, как следствие, к росту респираторных заболеваний. Массивное (диф-

фузное) увеличение числа ядер конденсации может привести к формированию стратосферного сульфато-нитратного слоя, нарушению радиационного баланса Земли и к последующим трудно-предсказуемым (нестабильным) изменениям климата.

Другим критическим радионуклидом, удаляемым в атмосферу в основном с выбросами заводов по переработке ядерного топлива, является тритий. Около 75 % трития, содержащегося в ядерном топливе, выбрасывается в атмосферный воздух, что соответствует 19 Ки ($70,3 \cdot 10^{10}$ Бк) ^3H в год на 1 МВт электроэнергии. При этом 1,2 Ки ($4,4 \cdot 10^{10}$ Бк) поступает с выбросами из реакторов, а 16 Ки ($59,2 \cdot 10^{10}$ Бк) — от заводов по переработке твэлов. Расчетная коллективная доза облучения населения крайне невелика и составляет $2 \cdot 10^{-2}$ чел. Зв на 1 МВт (эл.) в год. Явные экологические изменения от присутствия трития в среде не прогнозируются.

3.2. Поведение долгоживущих радионуклидов ядерно-энергетического происхождения в почве

Почва является начальным (пусковым) звеном обмена экосистем. Ее функциональное состояние определяет эффективность преобразования радиационной (солнечной и радиоактивной) энергии в биологические структуры. Действующим началом пусковых преобразований в почвах является ее сапрофитная микрофлора первичного синтеза (продуценты) и первичного потребления (консументы), разрушающая отмершие биологические субстраты до органических мономеров, легко вступающих в повторные циклы синтеза биологического вещества.

Синтез происходит с использованием воды, диоксида углерода, кислорода, азота, фосфора, энергоемких макроэлементов (Si, Al, K, Na, Ca, P, S), микроэлементов (Cu, Mo, I, B, F, Pb и др.), радионуклидов фона, с постепенным вовлечением в обмен минералов горных пород. Процесс чрезвычайно многосложен, взаимосбалансирован, «отработан» на протяжении миллионов лет и имеет крайне незначительные резервы устойчивости: почвенный слой 1,5—2 см формируется не менее 100 лет при нормальном состоянии среды. В разрыхлении почв, формировании капилляроподобных каналов тока ее активного компонента, водного почвенного раствора (осуществляющего перенос химических, в том числе и радиоактивных веществ), почвенных пор, заполненных воздухом, богатым углекислотой и радоном, участвует корневая система растительности, черви, насекомые. Уровни организации, а следовательно, и радиочувствительности активных биологических начал почв чрезвычайно различны. Поэтому внесение в почвенный обмен дополнительного радиационного фактора может

проявиться в резких нарушениях почвенной экосистемной организации. Помимо вероятных нарушений процессов почвенного обмена, загрязнение почв дополнительным аварийным радиоактивным веществом является исходным началом его дальнейшего транспорта по биологическим цепям с неизбежной конечной кумуляцией в организме человека.

Радионуклиды, отложившиеся на поверхности почв, под действием разных факторов могут перемещаться в любом направлении. Причиной «горизонтального» перемещения свежевыпавших радионуклидов может быть поверхностный сток после сильного дождя, отложившихся в снегу за зиму — смыв талыми водами. Установлено, что ^{90}Sr , мигрирующий с талыми водами, почти полностью (82—100 %) находится в катионной форме.

«Вертикальная миграция» радионуклидов по профилю почвы может быть следствием механического переноса частиц, на которых сорбированы радионуклиды, а также собственного перемещения в виде свободных ионов. На обрабатываемых сельскохозяйственных почвах радионуклиды сравнительно равномерно распределяются в пределах пахотного слоя. Некоторый механический перенос их с поверхности в глубь почвы возможен вследствие разрыхления ее дождевыми червями и землероющими животными.

Вертикальная миграция продуктов деления в целинной почве идет очень медленно. Установлено, что преобладающая часть осколочных радионуклидов прочно фиксируется в тонком слое верхнего горизонта почвы, и их вертикальное перемещение не превышает нескольких миллиметров в год. В целом можно считать, что ^{90}Sr и ^{137}Cs являются основными излучателями, формирующими почвенную радиоактивность, величина и характер которой зависят от *радиационной емкости почв*. Последняя складывается из ее физической сорбционной способности (зависящей от пористости, количества почвенного раствора в порах и его катионного состава); химической поглотительной способности (образования плохорастворимых соединений с элементами почв и горных пород); биологической поглотительной способности (включение в состав микрофлоры и дальнейших звеньев обмена на правах естественных фоновых аналогов, стабильных элементов).

Суммарная радиационная (сорбционная) емкость почвы колеблется от одного до нескольких десятков миллиграмм-эквивалентов радия на 100 г почвы, что в сотни тысяч раз превосходит реальные сформировавшиеся величины активности почв радиоактивных территорий, максимально загрязненных от аварий на ЧАЭС, ПО «Маяк». Сравнительная оценка сорбционной радиационной емкости почв (проводимая по соотношению содержания радионуклида в твердой фазе почв — нерастворимой фракции) к содержанию в почвенном растворе дана в табл. 3.1.

Сравнение сорбционных емкостей почв по соотношению активности радионуклидов в твердой фазе почв — нерастворенной фракции и в почвенном растворе (по А. Н. Марей и др.)

Почва	Соотношение активности твердой и жидкой фаз почв (Кр)	
	^{90}Sr	^{137}Cs
Тундры (Архангельская обл.)	$29,5 \pm 2,8$	1433 ± 199
Серая лесная: Орловская обл.	$71,9 \pm 5,2$	6140 ± 993
Томская обл.	$93,5 \pm 8$	5800 ± 1760
Среднеподзолистая (Московская обл.)	$50,0 \pm 2,6$	2237 ± 127
Чернозем (Воронежская обл.)	291 – 430	В растворе не обнаруживается

Приведенные данные указывают на большую сорбционную емкость (способность к захвату растворенных в осадках радионуклидов) почв чернозема, лесной подстилки, более выраженную по отношению к калиевому аналогу почвенного метаболизма — ^{137}Cs .

Функционально связаны с сорбционными процессами почв скорость проникновения радионуклидов в прикорневую глубину и последующее включение в экосистемные цепи миграции. Скорость процесса (после загрязнения среды) определяется прочностью связи излучателей с твердой фазой почв, скоростью диссоциации и последующего ионного перемещения радионуклида, зависящей от химических свойств излучателя и его соединений.

В миграцию существенные коррективы вносит рельеф местности (горизонтальное перемещение с талыми и дождевыми водами с последующим большим накоплением в низинах), а также механическая (глубокая вспашка) переработка почв, ведущая к ускоренному перемещению радионуклидов в подкорневую глубину и исключению фактора радиационной опасности из активной миграции в экосистемах. Долгосрочное сохранение радионуклидов в прикорневой глубине, на необрабатываемых землях (луга, лесная подстилка), включение в почвенный метаболизм ведут к их накоплению через концентрацию в травах, листе, с последующим неоднократным повторным включением (через гниение опада) в почвенные процессы. Так, при максимальном накоплении радионуклидов на глубине 5–10 см (до 135 Бк/кг для ^{90}Sr и 158 Бк/кг для ^{137}Cs в почвах Якутии) радиоактивность наземного опада составляет 149 и 244 Бк/кг соответственно. Радиоактивность верхних слоев почв при этом незначительна, порядка 20–30 Бк/кг

(Л. Н. Михайловская и др., 1995). Такой растягивающийся на десятилетия процесс вертикальной миграции дополняется горизонтальным перемещением и распространением радионуклидов на более обширные и менее контрастные по радиоактивности среды (в отличие от первичной загрязненности) территории. В процессе участвуют сообщества живых организмов почв (педоценозы), грызуны, травоядные. Перераспределения являются здесь следствием активной и пассивной мобильности представителей фауны, распространения продуктов их метаболизма, сложных пищевых цепей миграции радионуклидов. Скорость таких процессов зависит от химических свойств загрязнителей и соответственно функций, выполняемых их нерадиоактивными аналогами в экологических цепях обмена (табл. 3.2).

Все животные и растения обладают способностью избирательно и интенсивно накапливать рассеянные в экосистемах в ничтожных концентрациях микроэлементы, к конкурентам которых (в том числе и по характеру биологических функций) относятся долгоживущие радиоактивные загрязнители среды. Коэффициенты накопления их (отношение радиоактивности радионуклида в составе среды к его радиоактивности в организме) колеблются от нескольких до десятков тысяч. Высокие коэффициенты накопления приводят к тому, что концентрация излучателей в биомассе загрязненных биоценозов становится более высокой по сравнению с радиоактивностью среды (что ведет к неадекватной оценке радиационного риска при простом санитарном анализе событий).

Мошный процесс избирательной биогенной концентрации рассеянных излучателей наиболее интенсивен в первые годы от момента выпадения радиоактивных осадков. Радионуклиды в этот период представляют собой новейшие для среды, легко диссоции-

Таблица 3.2

Содержание и вертикальное распределение радионуклидов после аварии на Чернобыльской АЭС в естественных — необработанных (числитель) и пахотных (знаменатель) почвах, Бк/кг (1995)

Глубина, см	Загрязненность почв	
	цезием	стронцием
0--2	16 121/3163	522/60,6
2--15	8315/3285	134/57,9
15--23	46/3343	6,5/71,7
23--57	3/3421	1,2/91,4
57--91	4/3319	0,7/83,6

пругие соединения, не вкрапленные, как это происходит в последующем, в кристаллические решетки глинистых минералов (процесс старения элементов). Комплекс почвенно-химических реакций старения и последующее включение радионуклидов в состав труднорастворимых почвенных и минеральных структур переводит метаболизм изотопов на равные с их естественными химическими аналогами права. Скорость таких процессов зависит от физико-химических свойств радионуклидов, а также характера загрязнения почв (влажности, концентрации ионов). Максимальная скорость поглощения радионуклидов растениями происходит при pH, близком к нейтральному и слабощелочному. В кислой среде усиливается сорбция твердой фазой почв. Влажность, как следствие увеличения массы сельскохозяйственной продукции, снижает концентрацию радионуклидов в биомассе. Высокие концентрации ионов стабильных элементов препятствуют проникновению радионуклида в корневую систему.

Наиболее доступен для корневых систем растительности, особенно в первые годы после загрязнения среды, *стронций*. Старение радионуклида происходит медленно. Через 12 лет после внесения ^{90}Sr в почву более 95 % изотопа остается в обменной, кальцийподобной форме (табл. 3.3).

Переход радионуклида из органической дернины в минеральную фракцию и последующее ускоренное (семикратное) снижение поступления в растительность происходят только после глубокой вспашки почв. Вместе с тем такие вспашки, проводимые на территориях с загрязненностью свыше 40 Ки/км², ведут к ускоренной гибели сапрофитной микрофлоры почв, беспозвоночных, обедняют видовой состав биомассы в целом, что ускоряет процесс минерализации изотопов, но при резкой патологической деформации почвенных функций (С.П. Просяникова, 1995).

Накопление стронция в растениях обратно пропорционально количеству обменного конкурента изотопа кальция почвы. Такая

Таблица 3.3

Классификация химических элементов по коэффициентам накопления в сельскохозяйственных районах

Коэффициент накопления	Химический элемент
10 -- 1000 (сильное накопление)	K, Cs, Pb, N, Cl, Br, Na, Li
1 -- 10 (слабое накопление)	Mg, Ca, Sr, B, Se, Fe, Mn
0,1 -- 1 (отсутствие накопления)	Ba, Ra, Si, F, J, Co, Ni, Cn
0,01 -- 1 (слабая дискриминация)	Cs, Be, Fe, Ru
0,01 (сильная дискриминация)	Sc, Y, Zn, Ta, Pm, Pb, Pu, Sb

блокада метаболизма имеет предел. Избыточное (> 25 мг-экв на 100 г почвы) внесение кальция не ведет к дальнейшему снижению скорости перехода радионуклида в растительность (Е. С. Мурахтанов, 1995). В целом, как по классическим экспериментальным исследованиям, так и по наблюдениям последних лет, стронций относится к первой группе радионуклидов, отличающихся равномерным распределением между водой, минеральной основой и биомассой почв, коэффициент накопления его в грунте низкий (1—65), в биомассе 1000—2000.

Цезий, судя по коэффициентам накопления в почвах, по разным источникам, относится либо к сильно, либо к слабо накапливаемой группе элементов. Очевидно, это связано со временем оценки процесса миграции от момента загрязнения среды и соответственно степенью минеральной фиксации (кристаллизации) изотопа. В экспериментах и наблюдениях по миграции изотопа (почва — вода — растительность) выявлено его преимущественное накопление в неорганической фазе почв (коэффициент накопления 0,25), но при высоком содержании излучателя в биомассе (8000—9000).

Переход радионуклида в растительность во многом зависит от характера почв и особенностей минерального обмена растений. Результаты исследований Всероссийского НИИ сельскохозяйственной радиологии по метаболизму основных радионуклидов в почвах территорий, пострадавших от аварии на Чернобыльской АЭС, указывают на аутоэкосистемную «деактивацию» сельскохозяйственных культур, произрастающих на черноземах (табл. 3.4).

Таблица 3.4

Коэффициенты перехода (КП) ^{90}Sr и ^{137}Cs в сельскохозяйственные культуры, произрастающие на территориях, радиоактивных от аварии на Чернобыльской АЭС (1995)

Сельхозкультура	КП ^{90}Sr из почв			КП ^{137}Cs из почв		
	дерново-подзолистых	сероземов	черноземов	дерново-подзолистых	сероземов	черноземов
Зерновые (рожь, пшеница)	1,0	0,2	0,1	0,3	0,03	0,03
Овес	6,0	1,0	0,4	0,2	0,05	0,05
Горох	7,0	1,3	0,6	0,5	0,05	0,05
Гречиха	5,0	0,5	0,2	0,75	0,1	0,1
Картофель	2,6	0,3	0,1	0,3	0,08	0,05
Капуста	1,2	0,2	0,1	0,06	0,05	0,05

Поступление обонх радионуклидов в биомассу продукции здесь в 10—15 раз ниже по сравнению с дерново-подзолистыми супесчаными почвами, более распространенными на территориях пострадавших областей. Наибольшее количество радионуклидов накапливается в бобовых культурах, гречихе.

Почва пострадавших от аварий территорий находится в экологически невыгодном положении и по такой интегративной радиационно-экологической величине, как период полуочищения корнеобитаемого слоя (совокупность функций экспоненты радиоактивного распада, минерализации, перехода в подкорневую систему и др.), составляющий 129 лет, что позволяет прогнозировать радиационную «чистоту» таких территорий только через 600—1000 лет.

Периоды полуочищения корнеобитаемых слоев почв от суммарной радиоактивности:

Почвы	Дерново-подзолистые	Дерново-глеевые суглинные	Торфяные	Низменные торфяные	Болота
Период полуочищения, лет	129	78	28	13,9	12,4

Регистрируемые показатели накопления радионуклидов растительными продуктами районов максимального радиоактивного загрязнения среды даны в табл. 3.5.

Очевидно, радионуклидом, определяющим опасность радиоактивного загрязнения среды от аварии на Чернобыльской АЭС, является цезий-137, несмотря на более низкий по сравнению со стронцием коэффициент накопления, что связано с его более высоким уровнем содержания в почве. Наибольшее количество изотопов накапливается в надпочвенной (листовой) части растений, поэтому наибольшим кумулятором активности являются много-

Таблица 3.5

Распределение радионуклидов на примере картофеля

¹³⁷ Cs			⁹⁰ Sr		
Загрязненность почв, Ки/км ² ; нКи/кг	Содержание, нКи		Загрязненность почв, Ки/км ² ; нКи/кг	Содержание, нКи	
	в клубнях	в ботве		в клубнях	в ботве
25; 11,3	1,1	31,2	2,18; 5,9	2,08	28,5
Коэффициент накопления	0,048	1,36	Коэффициент накопления	0,3	40,7

Максимальное содержание ¹³⁷Cs, нКи: в зерне — 3,1; картофеле — 0,72; овощах — 1,57; многолетних травах — 55,7.

летние травы, а среди непосредственно употребляемых в пищу — зерновые, бобовые (см. табл. 3.4).

Дальнейшая миграция радионуклидов «почва — растительность — животные — человек» ведет к кумуляции радионуклидов при максимальном накоплении в теле человека (табл. 3.6).

Резкие межгрупповые различия формируемых среднегодовых доз внутреннего облучения населения — 2,4 мЗв (0,2 бэр), 5 мЗв (0,5 бэр), 25 мЗв (2,5 бэр), минимальной, средней, максимальной накопленной радиоактивности во многом определяются характером питания обследуемых и соответственно радиоактивностью пищевого рациона (минимальным ее накоплением при преимущественном потреблении растительных продуктов и максимальным — при преимущественном питании продуктами животного происхождения). На территориях, относящихся к разряду безопасных (порядка 5 Ки/км²), накопление радиоактивности существенно ниже. Вместе с тем и здесь возможно накопление радиоактивности, сопоставимое с регистрируемой на территориях максимального радиационного риска.

Наименее исследована миграция и последующее накопление в теле человека *плутония* и сопутствующих ему (в крайне незначительных, «следовых» количествах) *нептуния*, *америция*, *кюрия*. Эти элементы относятся к сильно дискриминированным метаболитам, не включающимся в активный экосистемный обмен. Первичная загрязненность почв радионуклидами этого ряда регистрируется в виде «горячих частиц» PuO₂ диаметром порядка 10 мкм, активностью от 50 до 1000 мкБк (Н.С. Швыдко и др., 1995). Включение в почвенную миграцию происходит медленно, после образования Fe — Pu — Al-комплексов с низкомолекулярными фульвокислотами. Скорость последующего вертикального движения в прикорневую систему зависит от сформировавшейся в поч-

Таблица 3.6

Миграция радиоактивности по пищевой цепочке (данные Брянского областного Центра госсанэпиднадзора — 1995)

Радиоактивность		Коэф- фициент нако- пления КН	Радиоактивность тела человека					
среды, Ки/ку?	травоядных животных, Ки/кг		минимальная (до 60 % населения)		средняя (до 30 % населения)		максимальная (до 10 % населения)	
			Ки/кг	КН	Ки/кг	КН	Ки/кг	КН
> 40	$9,45 \cdot 10^{-7}$	1,7	$1,8 \cdot 10^{-6}$	48,2	$7,8 \cdot 10^{-6}$	185,7	$1,4 \cdot 10^{-5}$	333,3
15—40	$6,75 \cdot 10^{-7}$	1,5	$1,8 \cdot 10^{-6}$	72,0	$6,7 \cdot 10^{-6}$	26,8	$7,8 \cdot 10^{-6}$	312,0
5—15	$3,78 \cdot 10^{-7}$	1,7	$1,0 \cdot 10^{-7}$	7,4	$4,3 \cdot 10^{-7}$	30,7	$5,7 \cdot 10^{-7}$	40,7
1—5	$5,0 \cdot 10^{-9}$	0,19	$3,0 \cdot 10^{-8}$	3,3	$1,8 \cdot 10^{-7}$	20,0	$1,8 \cdot 10^{-7}$	20,0

вах скорости движения нерадиоактивных носителей. До 9 % от плутониевых выпадений мигрируют на глубину 10—90 см чернозема и до 20 % на аналогичную глубину — серозема торфяников спустя 10—15 лет после загрязнения среды. Почвенные загрязнения плутонием, их долгосрочное содержание в поверхностных слоях ведут к аэрозольному проникновению α -излучателя в организм человека и накоплению радионуклида в легких (от 4 до 83 мБк), лимфоузлах по ходу дыхательных путей и лучевым нагрузкам порядка 0,8 фЗв на легкие и 3,6 фЗв на гонады (В.Г. Михальченко, 1990). После черновильской аварии лучевые нагрузки от плутония возросли в среднем в 1,5 раза и достигли 2 мкЗв/год.

В почвах Брянской и Рязанской областей соотношение радионуклидов Cs: Sr: Pu = 1:0,1:0,0012, формируемых доз — 1:0,25:0,01 (Р.М. Алексахин, 1992).

3.3. Поведение долгоживущих радионуклидов ядерно-энергетического происхождения в воде

Значительная часть радионуклидов первичного загрязнения среды смывается с загрязненных поверхностей и с талыми, дождевыми водами поступает в открытые и, частично, грунтовые воды. Источниками постоянных (незначительных) загрязнений являются АЭС, строящиеся, как правило, на берегах водоемов — рек, озер, морей: в ядерно-энергетических установках для охлаждения реакторов используются большие объемы воды, в которые попадают радиоактивные продукты коррозии и незначительная часть радиоактивных отходов. В целом в водную среду Земли (водная площадь которой составляет $\frac{2}{3}$ всей ее поверхности) поступает до 80 % антропогенных радиоактивных загрязнений, превращая ее в наиболее мощное депо не только естественных, но и искусственных радионуклидов. Сток радионуклидов в водоемы зависит от скорости взаимодействия радионуклидов с почвами. Период полураспада стока ^{90}Sr из почв в водоемы равен 2,4 годам, ^{137}Cs в 10 раз меньше по сравнению со стронцием.

Практический интерес представляет поведение радионуклидов в морской воде, в прибрежных районах, в местах впадения (эстуарии) рек, в лагунах, водных пространствах над континентальным шельфом, так называемых «окраинных» морях континентов с глубиной не свыше 1 км.

Поступающие на водную поверхность и в верхние ее слои радиоактивные вещества первоначально содержатся в верхних горизонтах морей, постепенно мигрируя вниз. На глубине 700 м содержание стронция составляет 20—30 % от концентрации поверхностных слоев моря. Содержание радионуклидов ^{90}Sr и ^{137}Cs в открытых морях выше по сравнению с океаном. Например, фоновая

активность радионуклидов в Балтийском море в 6—10 раз выше, чем в Атлантическом океане на тех же широтах.

В прибрежных водах вертикальные перемещения радионуклидов с последующим накоплением в донных отложениях протекают со значительно большей скоростью по сравнению с открытым океаном. Основные причины различий:

сорбция и осаждение радионуклидов массивными крупнодисперсными стоками, поступающими в прибрежные воды;

большая биологическая и биохимическая активность биогенной и литогенной взвеси, легко поднимающейся во время шторма со дна прибрежных вод с последующим захватом радионуклидов и осаждением;

большое количество и громадная биологическая активность биогенной массы прибрежных вод мелководья, эстурации рек, лагун.

Наибольшая концентрация радионуклидов обнаруживается в биомассе гидробионтов и особенно в планктоне. Включение Cs — Sr-излучателей в метаболизм водных биот во многом зависит от степени минерализации воды. С ее увеличением скорость и величина захвата радиоактивности снижаются. Так, содержание стронция-90 в костях рыб Балтийского моря в 5 раз выше по сравнению с рыбами Атлантики. Наибольшее содержание радионуклидов обнаруживается в биомассе пресноводных.

Гидробионты поглощают радионуклиды непосредственно из воды и по пищевым цепям. Наиболее мощное поглощение радионуклидов происходит в верхних слоях воды и осуществляется ее обязательными биологическими составляющими — планктоном и nekтоном. Большая суммарная биомасса фито-, зоопланктона прибрежных морей, наибольший коэффициент накопления радионуклидов этим звеном (10 000 и более) и наибольшая скорость экосистемного обмена (репродукция массы одноклеточных с последующим осаждением омертвевшей части и ее дальнейшей донной миграции по биологическим цепям) ставят этот вид биологической дезактивации водной среды на первое место по эффективности. До 90—99 % радионуклидов уходят в донные отложения по этой цепи миграции.

Коэффициент накопления снижается по мере перехода к более высоким трофическим уровням (до 360 у зоопланктона, до 33 у рыб). Как и в случае почвенного загрязнения, большое значение в миграции играет экосистемная «новизна» изотопа: накопление ^{55}Fe у зоопланктона в 670 раз выше по сравнению с накоплением стабильного железа. Пресноводные микроорганизмы, являясь основным начальным звеном водной миграции, более активно поглощают радионуклиды ядерно-энергетического происхождения. При этом слабые концентрации излучателей стимулируют активность и сорбционную способность биомассы. Такие особенности, прослеживаемые и в дальнейших звеньях обмена, ведут к более эф-

фективному очищению пресных водоемов по сравнению с морскими при прочих равных условиях. Время полуочистки (протекания, как и радиоактивный распад, по экспоненте) непроточных вод, озер средней полосы от ^{90}Cs , ^{137}Sr составляет 10—20 лет. В реках процесс идет значительно быстрее, усиливаясь стоком загрязненных вод в океан.

Коэффициенты накопления радионуклидов в грунте дна пресных водоемов невелики, превышая активность воды в 5—10 раз; в биомассе высших водных растений этот коэффициент равен 200—1000; в планктоне — до 1000 (в среднем), в иловых отложениях — 400—4000.

По общему характеру распределения радионуклиды подразделяются на четыре группы:

гидротропные, остающиеся в относительно высоких концентрациях в воде;

равномерно распределяющиеся в воде, грунте, биомассе;

педотропные, преимущественно накапливающиеся в грунте;

биотропные — в биомассе.

Основной современный загрязнитель среды — цезий — преимущественно накапливается в грунте; стронций относительно равномерно распределяется между водой, грунтом, биомассой. Подразделение тем не менее условно: при перерасчете накопления радионуклидов на массу составляющих водоемов очевидна наибольшая активность биологической компоненты водной среды, эффективно поглощающей и накапливающей радионуклиды среды, даже при чрезвычайно малых концентрациях изотопов. В последующем биомасса с поглощенной радиоактивностью откладывается в донных отложениях, имеющих самостоятельные циклы обмена.

Поведение радионуклидов в подземных водах резко отличается от их миграции в почве, открытых водоемах. Радиационные емкости этих водоисточников существенно разнятся в зависимости от путей, гидрогеологических условий поступления радионуклидов в подземные воды и характера гидродинамики (движения) воды, дренирования подземных вод, их химического состава. Такая многофакторность процесса обуславливает разнообразие поведения радионуклидов в этих водоемах.

Наиболее подвержены радиоактивному загрязнению ненапорные грунтовые воды, имеющие непосредственную связь с атмосферными осадками, открытыми водоемами. Вместе с тем большинство почв, особенно глинистых, является мощным барьером для проникновения этих загрязнений в грунтовые воды. Исследования показали, что через 40 лет после загрязнения поверхности Земли ^{90}Sr на глубину 1 м относительное содержание радионуклида, проникающего через делювиальные глины, составит $4 \cdot 10^{-3}$, а через 100 лет составит $8 \cdot 10^{-4}$ от начальной концентрации радионуклида.

Напорные (артезианские) водоисточники, не питающиеся непосредственно от осадков и пополняющиеся за счет медленной нисходящей фильтрации подземных вод, радиоактивному загрязнению не подвержены.

В целом миграция радионуклидов техногенного происхождения как в почве, так и в водной среде подчиняется общим закономерностям. Первичный выброс в среду вследствие легкой диссоциации новых изотопных соединений до их минерализации, перехода в донные отложения, ведет к массивному первичному включению в почвенно (водно)-растительный метаболизм и последующему активному включению радионуклидов в трофические цепи миграции.

Радиационная емкость цепей (почвы — вода, первичная сапрофитная микрофлора — растительность — животные) в целом зависит от минеральной отрицательной ионной насыщенности среды: в достаточно минерализованной почве (черноземе), морской воде процессы миграции и накопления радионуклидов в конечных, радиационно опасных для человека звеньях обмена (продуктах питания) идут значительно медленнее.

Скорость миграции во многом зависит от климатических условий метаболизма. Наиболее интенсивно процесс протекает в районах, не превышающих нулевой температурный барьер водно-почвенного метаболизма, но при обязательном условии достаточного разнообразия (экологической дифференцировки) среды и ее экосистемных компонентов: микро-, макрофлоры (широколиственные, смешанные леса, лесостепи), фауны. В аналогичных географических зонах, но при обеднении среды растительным, животным миром скорость метаболизма снижается (степь, пустыни, территории активной человеческой деятельности).

Наиболее продолжителен процесс естественной дезактивации среды через естественно-трофические цепи миграции в зонах, перешагивающих за нулевой температурный барьер почвенного метаболизма. На таких территориях (тундра, тайга) радиоактивные метаболиты включены в активные звенья экосистемного обмена с периодической температурной консервацией процесса. Длительность такой консервации растет с ростом продолжительности холодного периода года.

3.4. Радионуклиды в продуктах питания

Загрязняющие внешнюю среду радионуклиды способны включаться в качестве «чужеродных веществ» в «пищевую цепь» и вместе с продуктами питания попадать в организм человека. Источники таких радионуклидов приведены на рис. 3.2.

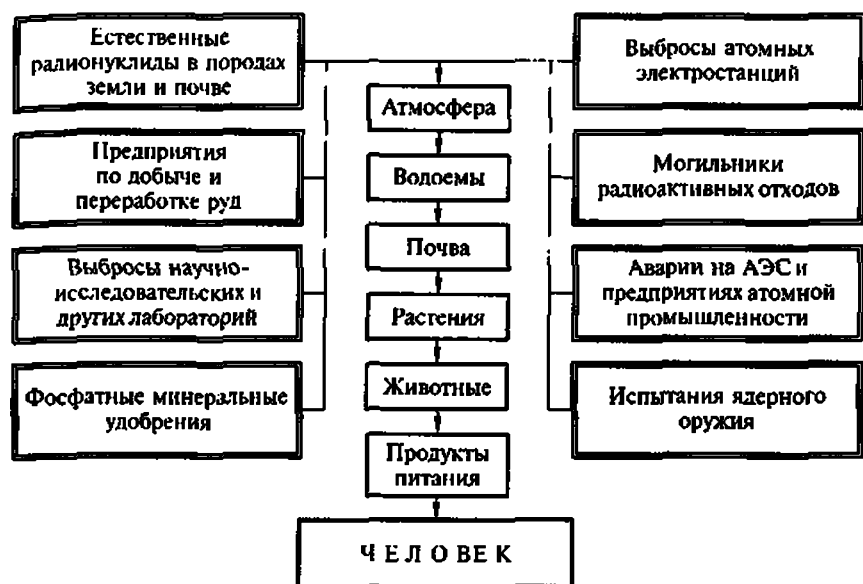


Рис. 3.2. Источники поступления радионуклидов в «пищевую цепь» и организм человека

К естественным источникам относят радиоактивные вещества, находящиеся в земной коре, ее породах и почве, откуда они попадают в воду и пищевые продукты. В эту группу входит прежде всего ^{40}K и ряд других космогенных радионуклидов, относительно равномерно распределенных на поверхности земного шара, а также, в меньшей степени, долгоживущие радионуклиды — продукты распада цепочек ^{238}U , ^{232}Th . В регионах со средним уровнем естественной радиации годовое поступление ^{238}U в организм человека с продуктами питания оценивается, по данным Японии, Англии и США, примерно величиной 5 Бк, превышая таковые за счет воздуха и питьевой воды. Аналогичная зависимость наблюдается, по данным Англии и нашей страны, в отношении поступления в организм человека ^{226}Ra . Годовое поступление этого изотопа с пищей достигает 15 Бк, что в 1000 и более раз превышает его поступление с воздухом. Основным поставщиком в организм человека долгоживущих продуктов распада ^{222}Rn (^{210}Pb и ^{210}Po) также являются продукты питания. Концентрации этих изотопов в молоке и мясе обычно невелики, в хлебопродуктах и овощах — умеренные, в рыбе и других обитателях морской среды — относительно высокие. Головные поступления связаны с характером питания и колеблются от 20 — 30 Бк в США и Англии, до 40 Бк — в Германии, России, Индии, Италии и до 200 Бк — в Японии. Особенно большое годовое поступление этих радио-

нуклидов (до 140 Бк ^{210}Pb и 1400 Бк ^{210}Po) отмечено у населения, проживающего в арктических и субарктических регионах, что связано с употреблением в пищу в качестве основного продукта питания мяса северных и канадских оленей, питающихся в зимний период лишайниками, накапливающими в своем составе эти изотопы.

^{232}Th и ^{228}Ra поступают в организм человека также в основном с пищей растительного и животного происхождения. Другие естественные радионуклиды поступают в организм человека в очень небольших количествах, вследствие чего интереса не представляют.

Перечисленные естественные радионуклиды могут попадать в продукты питания в результате применения фосфорсодержащих минеральных удобрений за счет высокого уровня их содержания в фосфатных породах — исходном материале для их получения.

Значительно более важным с экологической и гигиенической точек зрения представляется загрязнение окружающей среды в результате строительства и эксплуатации ядерных реакторов и использования радиоактивных изотопов в других отраслях народного хозяйства, а также захоронения твердых и жидких отходов таких производств. В этих случаях в окружающую среду, а следовательно, и в продукты питания могут попадать большие количества самых разнообразных искусственных радионуклидов (^7Be , ^{22}Na , ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{59}Fe , 57,58 и ^{60}Co , ^{63}Ni , ^{65}Zn , ^{76}As , ^{88}Rb , 89,90 и ^{91}Sr , 95 и ^{97}Zr , ^{95}Nb , ^{99}Mo , ^{99}Tc , 103,105 и ^{106}Ru , 108 и ^{110}Ag , ^{113}Sn , ^{115}Cd , 124 и ^{125}Sb , ^{123}Sn , ^{123}Te , 134 и ^{137}Cs , 139,141 и ^{144}Ce , ^{140}Ba , ^{140}La , ^{182}Ta) и, самое главное, ряд изотопов с большим периодом полураспада: ^{14}C (5730 лет), ^{129}I (16 млн лет) и др.

Поступление столь широкого спектра радионуклидов в окружающую среду приводит к загрязнению ими рыбы и других морепродуктов. По данным Хупта (1985), радиоактивность рыбы (треска, камбала, палтус, сельдь) может достигать 690—750 Бк/кг⁻¹ (суммарно по β -излучению), 23—28 Бк/кг⁻¹ (по ^{134}Cs), 570—590 Бк/кг⁻¹ (по ^{137}Cs). Еще более загрязненными являются морские животные, имеющие раковину или панцирь. В них концентрация активности превышает аналогичную у рыбы, выловленной в тех же местах, в семь — десять (омары и крабы соответственно) и даже в 90 раз (береговые моллюски).

Наиболее серьезные изменения в окружающей среде были отмечены в период испытаний в атмосфере или на поверхности Земли ядерного оружия и при серьезных авариях на ядерных предприятиях.

Научный комитет ООН на основании данных из разных стран мира, в той или иной степени пострадавших в результате аварий на Чернобыльской АЭС, пришел к заключению (1993), что загрязненные продукты питания явились одним из наиболее важных источников облучения людей ^{131}I и ^{137}Cs . В общем выбросе в

результате чернобыльской аварии на долю этих радионуклидов, а также ^{134}Cs приходится более 43 % радиоактивных веществ. Указанные радионуклиды попадали в организм человека с молоком и зеленью вскоре после их непосредственного выпадения на траву, растущую на пастбищах, и на огородные культуры. Другие основные продукты питания (зерновые, корнеплоды, фрукты, мясо) попадали в организм человека лишь спустя некоторое время после загрязнения, что снизило их опасность как источника поступления ^{131}I (период полураспада 8,04 сут), к этому времени в значительной степени снизившего свою активность.

По данным о концентрации ^{131}I и ^{137}Cs в пищевых продуктах в первые недели после аварии на ЧАЭС, в отдельных регионах Румынии, Швейцарии, Греции, Болгарии, областях Украины, Белоруссии и России загрязнение молочных продуктов достигало 28—44 Бк/кг, тогда как в странах Западной Европы (Бельгия, Франция, Ирландия, Великобритания) оно не превышало 0,6—4,4 Бк/кг, а в странах Северной Европы, Азии и Северной Америки было еще ниже (0,1—0,8 Бк/кг). Уровень загрязнения зелени был несколько выше, достигая в отдельных регионах 150—210 Бк/кг (Греция, Югославия). Загрязнение ^{137}Cs охватывает широкий круг продуктов питания.

Наиболее высокие уровни загрязнения отмечены в местных продуктах — 57—200 Бк/кг⁻¹ (Австрия, Финляндия, Румыния, Швейцария, Болгария, ближайшие к месту аварии области Украины, России, Белоруссии). Второе по уровню загрязнения место занимали в тех же регионах молочные продукты (21—90 Бк/кг). Ниже были концентрации ^{137}Cs в овощах и фруктах (9—46 Бк/кг), в зерновых продуктах и зелени (15—60 Бк/кг). В регионах стран Западной и Северной Европы, Северной Америки и Восточной Азии концентрации ^{137}Cs колебались от 0,05—13 Бк/кг (в молочных продуктах) до 0,03—18 Бк/кг в местных и 0,02—9,6 Бк/кг — в других продуктах питания.

Из-за различий в источниках пищи, потребляемой разными животными, концентрация ^{137}Cs обычно была низкой в свинине и мясе домашней птицы, более высокая — в говядине и баранине и очень высокая — в мясе дичи.

В некоторых продуктах — оленине, грибах, озерной рыбе, потребляемых большинством людей в малых количествах, концентрация ^{137}Cs была значительно выше приведенных значений. Так, после чернобыльской аварии в Швеции концентрация этого радионуклида в мясе оленей достигала 10 кБк/кг. В грибах на территории Германии содержание ^{137}Cs было несколько ниже, но изменялось в широких пределах в зависимости от видов гриба (от 250 Бк/кг в моховиках до 100 Бк/кг в белых грибах и еще меньше в шампиньонах). В пресноводной озерной рыбе концентрация ^{137}Cs составила от 300 Бк/кг (Германия) до многих тысяч Бк/кг (Шве-

ция). В организме морских рыб ^{137}Cs аккумулируется в очень малых количествах.

Проведенный научным комитетом ООН анализ показал, что на долю ^{137}Cs , а также ^{134}Cs приходится более 50 % дозы внутреннего облучения радионуклидами, поступающими с пищей.

Следует упомянуть и о возможности поступления в организм через «пищевую цепь» еще одного радионуклида — ^{90}Sr . Хотя в общем выбросе Чернобыльской АЭС на долю ^{90}Sr приходится около 4 %, значение его чрезвычайно велико: при поступлении в организм человека стронций накапливается в костной ткани и практически не выводится, период его полураспада очень большой (29,12 лет).

Стронций в больших количествах поступал во внешнюю среду и ранее — в период испытаний ядерного оружия. За этот период суммарное поступление этого радионуклида составило 600 ПБк, а его среднее содержание в почве северного полушария планеты в 1975 г. составляло 2068 Бк/кг.

Источниками ^{90}Sr в продуктах питания являются молоко, хлеб, овощи и фрукты. Так, в 1960 — 1975 гг. население США и Дании потребляло с молочными продуктами 30 % ^{90}Sr ; с зерновыми продуктами — 17 и 45 %; с овощами и фруктами — 54 и 24 % соответственно. На мясные продукты приходится очень небольшой процент.

Концентрация ^{90}Sr , попавшего в атмосферу в результате взрывов ядерного оружия и затем перешедшего в продукты питания, в последующие годы постоянно снижалась. Так, в нашей стране с 1960 по 1972 г. концентрация ^{90}Sr в хлебе уменьшилась в 50 раз (с 2,2 до 0,44 Бк/кг), в молоке — в 33 раза (с 11 до 0,33 Бк/кг), в мясе — в 5 раз (с 10,7 до 2,2 Бк/кг) (Р. М. Алексахин, 1982).

Одним из основных направлений профилактики неблагоприятного воздействия радионуклидов является контроль за содержанием их в продуктах питания.

Допустимые уровни содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в продуктах питания (СанПиН 2.3.2.560-96):

	^{137}Cs	^{90}Sr
Мясо без костей	160	50
Оленина без костей	250	80
Мясо диких животных без костей	320	100
Кости всех видов	160	200
Яйца и продукты из них	80	50
Молоко свежее	50	25
Молочные консервы	200	100
Молочные продукты сухие	360	200
Сыры твердые	50	100
Рыба свежая мороженая	130	100
Рыба сушеная и вяленая	260	200

	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr
Водоросли, морские моллюски и ракообразные	200	100
Зерновые культуры	80	140
Зернобобовые и крупы	60	100
Мука и макаронные изделия	60	80
Хлеб и хлебобулочные изделия	40	70
Мучные кондитерские изделия	50	80
Сахар	140	100
Картофель	320	60
Овощи и бахчевые культуры	130	50
Фрукты и ягоды	40	50
Грибы	500	50
Сушеный картофель	1200	240
Сушеные овощи и бахчевые	600	240
Сушеные фрукты и ягоды	200	240
Сушеные грибы	2500	250
Джем, варенье, соки	80	70
Специи и пряности	200	100
Чай	400	100
Кофе в зернах и молотый	300	100
Масло растительное	60	80
Масло коровье	100	60
Пиво, вино и другие спиртные напитки	70	100

Контроль за содержанием радионуклидов в продуктах питания возлагается на санитарно-эпидемиологическую службу Минздрава России.

3.5. Экосистемные воздействия техногенных радиационных и токсикохимических факторов

В естественных природных условиях радиационное загрязнение среды, как правило, сочетается с воздействием и других техногенных факторов, прежде всего химического загрязнения. В силу этого вычленить влияние того или иного загрязнения на экосистемные изменения среды бывает крайне сложно, а подчас невозможно, вследствие чего возможны необъективные выводы с последующей разработкой ошибочных теоретических концепций.

Так, исследования, проводившиеся на внепромышленных территориях повышенной радиоактивности в условиях высокогорья, в районах Хиросимы и Нагасаки, а также в запрещенных для заселения и промышленной деятельности районах чернобыльской катастрофы, указывают на бурный рост и большое разнообразие растительного, а в последующем и животного мира по сравнению с нерадиоактивными территориями. Вместе с тем аналогичные

радиоактивные загрязнения среды после аварий, происшедших в непосредственной близости от крупнейшего в мире источника техногенной загрязненности среды — Нью-Йорка — и в других аналогичных зонах токсико-химических загрязнений среды, свидетельствуют об обратном — прогрессирующей гибели лесов, обеднении флоры и фауны.

Очевидно, фоновое техногенное химическое загрязнение определяет резервы устойчивости экосистем, их способность противостоять экосистемной деградации под воздействием новейших радиационных метаболитов.

К наиболее агрессивным, устойчивым в среде, накапливающимся в пищевых экологических цепочках с коэффициентом накопления, близким к аналогичным радиационным величинам (10^3 — 10^5 и более), относятся:

хлорорганические пестициды (ДДТ и его аналоги);

полихлорбифенолы (ПХБ);

тяжелые металлы (особенно ртуть);

диоксид серы, оксиды азота, 3,4 бенз(а)пирен — массивные газоаэрозольные выбросы от сжигания топлива.

Отличительной особенностью экосистемного поведения загрязнителей этого ряда является их способность при переходе из первичного звена загрязнения в последующие (например, из атмосферы в почву) превращаться в новые, более токсичные формы. Такие особенности ведут, как правило, к непредсказуемым на основании принятых токсикологических моделей последствиям, проявляющимся с большой инерционностью от момента загрязнения, что может вести к необъективным оценкам действующих факторов.

Примером таких откликов экосистем на изменения воздействий может служить водный тепловой выброс: при повышении температуры среды у рыб возрастает потребность в пище, но уменьшается скорость обмена, в результате снижается активность и способность к воспроизводству; подавление обменных процессов ведет к повышению (лепонированию) накопления в них типовых загрязнителей среды (особенно метилированной ртути), что вызывает подавление репродукции вида. Параллельно формируется дисбаланс экосистемных процессов, приводящий к последующей медленной эвтрофикации водоема (накоплению биогенных элементов), дисбалансу, завершающемуся бурным развитием водорослей (цветением), дефициту растворенного в воде кислорода и, как следствие, к гибели биоценоза водоема.

Наиболее массивным из перечисленных загрязнителем среды является диоксид серы и обязательно сопутствующие ему оксиды азота, оксид углерода. Время жизни загрязнителя в атмосфере невелико (2 — 3 ч), с последующим образованием серного ангидрида (SO_2), легко переходящего при взаимодействии с водой в сер-

ную кислоту и сульфаты. Каждое последующее соединение в этой цепи реакций более токсично. Действие загрязнителей в экосистемах начинает проявляться уже при содержании нескольких микрограммов выбросов в метре кубическом. Суммарный ежегодный выброс диоксида серы в атмосферу Земли (по расчетам) составляет 150 млн т. Концентрации выбросов ($0,8 \text{ т/(МВт} \cdot \text{ч)}$) при производстве электроэнергии тепловыми электростанциями в большинстве городов России превышают ПДК в пять—десять раз. Массивность выбросов SO_2 в атмосферу и образование сульфатов лежат в основе конденсации влаги воздуха, появления мелкодисперсных аэрозолей, загрязняющих атмосферу, изменения спектра солнечной радиации, климата. Последующее выпадение с осадками и водная миграция сульфатов ведут к закислению водоемов, гибели планктона, резкому снижению воспроизводства рыб, снижению видового разнообразия флоры, фауны.

Пестициды, накапливающиеся в конечных звеньях трофических цепей, у животных, человека ($\text{КН} = 5 \cdot 10^5$), как и сульфаты, опасны вследствие не только прямого токсического и подобного радиационному генетического воздействия, но и вторичных эффектов, связанных с нарушением биологического равновесия экосистем. Последнее особенно выражено в действии химически устойчивых пестицидов (группы ДДТ), приведших к гибели либо дегенерации ряда популяционных звеньев биоценозов. Загрязненность почв России этим ядом достигает $3,9 \text{ кг/га}$. Время его экспоненциального полувыведения из почв в воду — 30 лет. Допустимые концентрации в почвах могут вести к функционально связанным с загрязненностью почв загрязнениям воздуха, воды в концентрациях, превышающих ПДК. Токсиканты этой группы, включенные в глобальный экосистемный метаболизм, обнаруживаются у моллюсков, рыб, птиц, животных, питающихся рыбой (в том числе в крови пингвинов).

К не менее агрессивным хлорорганическим соединениям относятся *полихлорбифенолы* (ПХБ), входящие в состав смазочных материалов, гидравлических жидкостей, синтетических смол, попадающие в среду при эксплуатации техники (испарение в атмосферу), со свалок и др. Коэффициент накопления ПХБ в планктоне составляет 10^4 , в организмах рыб достигает 10^5 , птиц и млекопитающих, связанных с водной средой, — 10^7 — 10^8 . Концентрации в икре рыб промышленных районов достигают 800 млн^{-1} (в чистых водах 1 млн^{-1}). Содержание ПХБ в водах Атлантики (атмосферный перенос) достигает 10 млн^{-1} при значительно большей устойчивости яда по сравнению с ДДТ. Токсичность и экосистемная агрессивность ПХБ ставит эти устойчивые хлорорганические соединения в один ряд с наиболее агрессивными конкурентами в метаболизме всех звеньев экосистем — тяжелыми металлами.

Обобщенные данные воздействия фоновых радиационных, токсико-химических и психоэмоциональных факторов среды на население (по официальным документам и литературным источникам)

Группа факторов	Степень воздействия в стране и некоторых ее территориях	Характер реакций на хронические малодозные воздействия
Радиоактивность среды ядерно-энергетического происхождения	Суммарная активность выброса долгоживущих радионуклидов от аварии на Чернобыльской АЭС 10^{13} Ки: 85 по ^{137}Cs , 1,7 по ^{90}Sr . В России регистрируемым воздействиям >1 Ки/км ² подвержено 2,7 млн чел. в 4 тыс. населенных пунктов; (в Брянской области — 0,27 млн чел. в 2,7 тыс. населенных пунктов)	Регистрируемые реакции населения: рост общей заболеваемости (иммунодефицит); нервной и эндокринной патологии; злокачественных новообразований при неустоявленных территориях от загрязнений при неустоявленных территориях от загрязнений с уровнями загрязнения территории авариях на ЧАЭС. Критическими являются: кровеносные органы, нервная и эндокринная системы
Недоокисленные продукты сжигания топлива: оксид углерода; сернистый ангидрид; оксиды азота	5—10 ПДК в 124 городах страны. В остальных — от 1 до 5 ПДК. Наиболее массивная группа загрязнителей атмосферы	Хроническое воздействие ведет к иммунодефициту, астеническому синдрому, способствует формированию рака. Критическими являются: кровеносные органы, кровь, легкие, головной мозг
3,4 бенз(а)пирен	ПДК превышено более чем в 50 % городов России. Суммарный выброс в Новозыбковск — 15 кг/год. В Архангельске, Новодвинске, Новодульском — максимальные концентрации достигали 289—598 ПДК	Относится к неконкурентным канцерогенам. Риск летальности при вдыхании ПДК в течение 70 лет равен $1,8 \cdot 10^{-4}$. Воздействие совместно с иммунотоксичными ядами повышает риск формирования рака, ведет к росту летальной смертности, внутриутробной дегенерации ЦНС, подавлению сперматогенеза

Тяжелые металлы:
кадмий, свинец, ртуть,
соединения меди,
цинка, марганца

Более 50 % территории России имеют
завышенное содержание указанных
металлов на фоне дисбаланса микро-
элементов. В Брянской области
содержание свинца колеблется
от 2 до 12 ПДК

Пестициды и другие
сельскохозяйственные
яды

Загрязненность по России достигает
3,9 кг/га (В Брянской области в среднем
1,22 кг/га). Уровень загрязненности
стабилен, нормы (КУН) превышены
на 8 — 10 %

Иммуноагрессивная и нейротоксичная груп-
па ядов. Реакция на хроническое поступление
в организм: иммунодефицит, рост детской
смертности, подавление функции критических
органов, осложнения беременности, терато- и
мутагенные эффекты. Особую опасность
представляют ртуть, кадмий, соединения серы.
Действие ядов сходно с радиационными
эффектами: разрушение цитохромов, блокада
тиоловых (SH) группировок ферментов,
подавление пластических и энергетических
процессов. Критические органы при
воздействии: кальций — печень; свинец —
печень, кости, костный мозг, щитовидная
железа; ртуть — головной мозг, печень,
почки; медь — печень; цинк — головной
мозг, костный мозг; марганец — головной
мозг, сердечная мышца

Тератогенное воздействие ведет к общей
задержке физического и психического
развития, большой частоте формирования
нервно-психических заболеваний. У детей
в пестицидно-токсичных зонах кроветворение
и иммунитет подавлены, эндокринные
заболевания отмечаются в семь раз чаще,
чем в «чистых» районах. Отмечается рост
раковых заболеваний

Группа факторов	Степень воздействия в стране и некоторых ее территориях	Характер реакций на хронические малоинтенсивные воздействия
Нитраты-нитриты, ионные компоненты	Среднесуточное поступление оценивается в 100 мг. Концентрация в водоемочниках в среднем 10 ПДК	Поступление в организм идет попутно с пестицидами и другими сельскохозяйственными ядами, ведет к подавлению кроветворения, иммунодефициту. Совместное действие резко (в два—три раза) усиливает канцерогенез. У детей — подавление функций ЦНС, отставание в умственном и физическом развитии
Микроэлементы	Содержание в организме зависит от биогеохимической провинции на данной территории. Дефицит содержания в организме жителей Бранской области (Новозыбковский район) составляет: по йоду 46—50 %, железу — 62, меди — 40—60, цинку — 60—70, селену — 35 %	Недостаток и дисбаланс микроэлементов ведет к дефициту синтеза ферментов; окислительному стрессу (ПОЛ), особенно в случае нехватки антагонистов стрессовых внутриклеточных реакций и витамина Е (дефицит 18—30 %); подавлению функций кроветворения; иммунодефициту; повышению риска формирования рака. Дефицит йода в совокупности с дисбалансом поступления других микроэлементов (марганца, меди, железа, селена) проявляется склонностью к нервным и психическим заболеваниям
Стресс	Хроническое психоэмоциональное напряжение социального происхождения, имеющее тесную связь со степенью концентрации производств и соответствующим дефицитом занятости населения	Истощение нейрогуморальных механизмов регуляции гомеостаза. Неврастения. Иммунодефицит. Рост нервной и сердечно-сосудистой патологии

Тяжелые металлы и их соединения, особенно соединения ртути, относятся к загрязнителям, поставившим вопрос о лимитирующей среде: выброс соединений этого ряда в атмосферу ведет тем не менее к формированию агрессивных по отношению к человеку и экосистемам в целом почв, поверхностных вод среды. Ежегодный выброс ртути в атмосферу в виде паров и неорганических соединений металла составляет 5 тыс. т при сжигании твердых топлив и нефти и около 10 тыс. т при переработке минерального сырья. Современное содержание элементов в среде громадно. Отношение техногенного выброса тяжелых металлов к их естественному содержанию в литосфере достигает $4,5 \cdot 10^9$ для ртути, $6,5 \cdot 10^8$ для свинца.

Общее содержание ртути в наземной биомассе достигает 500 тыс. т. В биофизический круговорот вовлекается 40 кт/год. В вовлечении металла в экосистемный метаболизм активное участие принимают аэробная и анаэробная микрофлоры, преобразуя металлическую ртуть в органическую — метилртуть (метилизация металла). Этот процесс приводит к высокой концентрации и накоплению элемента в гидробионтах, рыбе и других морских организмах. Большое значение для биологической трансформации метаболита имеет закисление водосмывов, ускоряющее формирование высокотоксичных соединений и их накопление в гидробионтах.

Выброс свинца и его соединений связан с работой металлургических заводов, сжиганием органических топлив тепловых электростанций, выбросом выхлопных газов автомобилей, использующих этилированный бензин. Концентрации свинца в воздухе крупных городов достигают $4,5 \text{ мкг/м}^3$ (фоновое содержание свинца в воздухе не превышает $2—40 \text{ нг/м}^3$). Средний глобальный уровень содержания элемента в почвах составляет 17 мг/кг почвы (достигая 70 мг/кг и выше).

Концентрация *кадмия* в основных типах почв лежит в пределах $0,01—1,4 \text{ мг/кг}$. Большинство территорий России ($> 50\%$) рассматриваются в настоящее время как геохимические провинции с крайне повышенным содержанием тяжелых металлов, вносящих, помимо прямых эффектов, дисбаланс как в экосистемный, так и в организменный метаболизм микроэлементов.

Сопутствующим выбросу тяжелых металлов, особенно свинца, крайне агрессивным соединением (внеконкурентным канцерогеном) является $3,4 \text{ бенз(а)пирен}$. Максимальная концентрация его в городах достигает $0,1 \text{ мкг/м}^3$, превышая ПДК в зоне автомагистралей в ≥ 10 раз.

Биологическая эффективность малоинтенсивных экосистемных воздействий большинства нерадикационных техногенных метаболитов среды и последствия воздействий факторов во многом схожи с аналогичными процессами проведения и формирования реакций от радионуклидов ядерного происхождения (табл. 3.7).

Вопросы для самопроверки

1. Как ведут себя долгоживущие радионуклиды ядерно-энергетического происхождения в атмосфере?
2. Каковы особенности поведения инертных радиоактивных газов в воздушной среде?
3. Назовите общие закономерности поведения радионуклидов ядерно-энергетического происхождения в почвах.
4. Как ведут себя долгоживущие радионуклиды ядерно-энергетического происхождения в морской воде?
5. Как ведут себя радионуклиды ядерно-энергетического происхождения в реках, озерах, подземных водах?
6. Расскажите о техногенном токсико-химическом фоне радиационных экосистемных воздействий.

ТЕХНОГЕННАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ СРЕДЫ И ЗДОРОВЬЕ НАСЕЛЕНИЯ

За минувшее столетие радиация из фактора лабораторной случайности превратилась в глобальный экологический фактор среды. В отличие от мощных, но рецепторно ощутимых жидких и газо-аэрозольных промышленных выбросов, радиоактивность по-прежнему относится к разряду «Х-факторов», неоощутимость воздействия которых вела в свое время к громадным лучевым нагрузкам, радиационным ожогам, трофическим дерматитам, катарактам, злокачественным новообразованиям, ускоренному старению пионеров радиационной практики. В настоящее время «неоощутимое присутствие» радиации в среде вызывает множество споров о причинности изменений состояния здоровья населения территорий, специфике (радиогенности) выявляемых заболеваний и реакций. Чрезвычайную сложность решения вопроса о связи формирования болезней с ростом радиоактивности среды подчеркивают международная (МКРЗ) и национальные (НКРЗ) комиссии по радиационной защите. Необходимое здесь выявление собственно радиогенных реакций невозможно без знаний механизмов и закономерностей формирования радиоактивных повреждений клеточного, организменного, экосистемного (популяционного) уровней.

Воздействие радиации на организм в дозах, существенно превышающих естественный природный фон, чрезвычайно многообразно, зависит от многих причин, и прежде всего от дозы излучения (рис. 4.1).

Ионизирующее излучение действует на организм как из внешних, так и из внутренних источников облучения. В последнем случае радиоактивные вещества поступают в организм с пищей, водой, через кожные покровы. Возможно комбинированное действие внешнего и внутреннего облучений.

Повреждающее действие ионизирующей радиации разных видов зависит от их проникающей способности и, следовательно, от плотности ионизации в тканях. Чем короче путь прохождения луча, тем больше плотность ионизации и сильнее повреждающее действие.

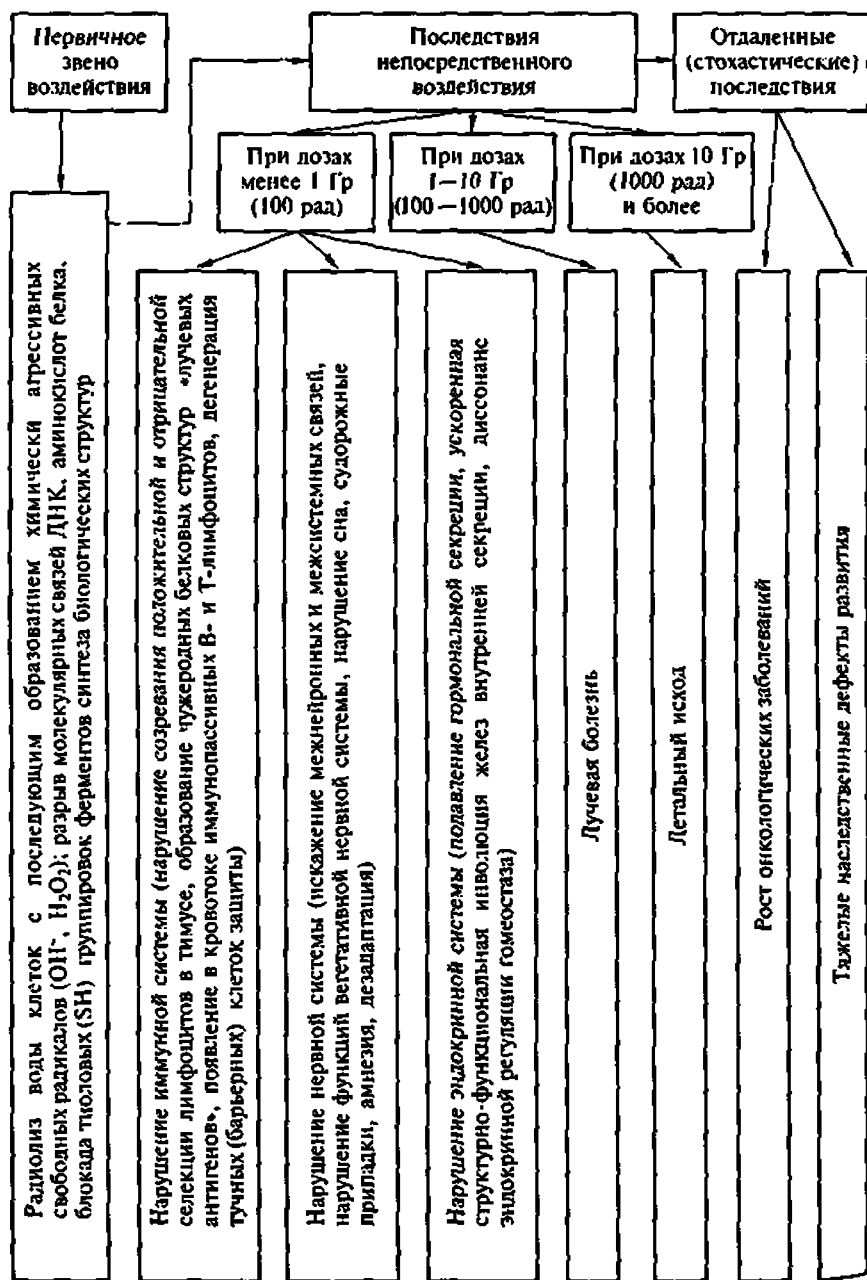


Рис. 4.1. Содержание и варианты радиационного воздействия на организм человека в зависимости от дозы облучения и времени проявления

Одинаковые количества поглощенной энергии дают часто разный биологический эффект в зависимости от вида ионизирующего излучения. Поэтому для оценки степени повреждающего действия ионизирующей радиации на биологические объекты используют коэффициент относительной биологической эффективности — ОБЭ.

Реакция организма на ионизирующее излучение зависит от величины поглощенной дозы, выражаемой в системе СИ в греях (Гр) или внесистемных — радах (рад).

Повреждающее действие ионизирующей радиации при кратковременном облучении более выражено, чем при длительном облучении в одной и той же дозе. При дробном (фракционированном) облучении наблюдается снижение биологического эффекта: организм может переносить облучение в более высоких суммарных дозах.

Индивидуальная реактивность и возраст имеют также большое значение в определении тяжести радиационного поражения.

4.1. Механизм действия радиации на живые организмы

Процессы взаимодействия ионизирующего излучения с веществом в живых организмах приводят к специфическому биологическому действию, завершающемуся повреждением организма. В процессе этого повреждающего действия условно можно выделить три этапа: а) первичное действие ионизирующего излучения; б) влияние радиации на клетки; в) действие радиации на целый организм.

Первичное звено этого действия — возбуждение и ионизация молекул, в результате чего возникают свободные радикалы (прямое действие излучения) или начинается химическое превращение (радиолиз) воды, продукты которого (радикал $\text{OH}\cdot$, пероксид водорода H_2O_2 и др.) вступают в химическую реакцию с молекулами биологической системы (см. рис. 4.1).

Первичные процессы ионизации не вызывают больших нарушений в живых тканях. Повреждающее действие излучения связано, по-видимому, с вторичными реакциями, при которых происходит разрыв связей внутри сложных органических молекул, например SH-групп в белках, хромоформных групп азотистых оснований в ДНК, ненасыщенных связей в липидах и пр.

Влияние ионизирующего излучения на клетки обусловлено взаимодействием свободных радикалов с молекулами белков, нуклеиновых кислот и липидов, когда вследствие всех этих процессов образуются органические пероксиды и возникают быстропротекающие реакции окисления. В результате пероксидного окисления накапливается множество измененных молекул, в результате чего

начальный радиационный эффект многократно усиливается. Все это отражается прежде всего на структуре биологических мембран, меняются их сорбционные свойства и повышается проницаемость (в том числе мембран лизосом и митохондрий). Изменения в мембранах лизосом приводят к освобождению и активации ДНК-азы, РНК-азы, катепсинов, фосфатазы, ферментов гидролиза мукополисахаридов и ряда других ферментов.

Высвобождающиеся гидролитические ферменты могут путем простой диффузии достичь любой органеллы клетки, в которую они легко проникают из-за повышения проницаемости мембран. Под действием этих ферментов происходит дальнейший распад макромолекулярных компонентов клетки, в том числе нуклеиновых кислот, белков. Разобщение окислительного фосфорилирования в результате выхода ряда ферментов из митохондрий, в свою очередь, приводит к угнетению синтеза АТФ (аденозинтрифосфата) и — к нарушению биосинтеза белков.

Таким образом, в основе радиационного поражения клетки лежат нарушение ультраструктур клеточных органелл и связанные с этим изменения обмена веществ. Кроме того, ионизирующая радиация вызывает образование в тканях организма целого комплекса токсических продуктов, усиливающих лучевой эффект, — так называемых радиотоксинов. Среди них наибольшей активностью обладают продукты окисления липидов — пероксиды, эпоксиды, альдегиды и кетоны. Образуюсь тотчас после облучения, липидные радиотоксины стимулируют образование других биологически активных веществ — хинонов, холина, гистамина — и вызывают усиленный распад белков. Введение необлученным животным липидных радиотоксинов оказывает действие, напоминающее лучевое поражение. Ионизирующее излучение наиболее воздействует на ядро клетки, угнетая митотическую активность.

Ионизирующее излучение влияет на клетки тем сильнее, чем они моложе и менее дифференцированы. На основании морфологических признаков поражаемости органы и ткани распределяются в следующем нисходящем порядке: лимфоидные органы (лимфатические узлы, селезенка, зубная железа, лимфоидная ткань других органов), костный мозг, семенники, яичники, слизистая оболочка желудочно-кишечного тракта. Еще меньше поражаются кожа с придатками, хрящи, кости, эндотелий сосудов. Высокой радиоустойчивостью обладают паренхиматозные органы: печень, надпочечники, почки, слюнные железы, легкие.

Повреждающее действие ионизирующего излучения на клетки при достаточно высоких дозах завершается их гибелью. Гибель клетки в основном обусловлена подавлением митотической активности и необратимым нарушением хромосомного аппарата клетки, но возможна и интерфазная гибель (вне периода митоза) из-за нарушения метаболизма клетки и интоксикации упомянутыми ра-

диотоксинами. В результате происходит опустошение тканей из-за того, что не восполняется естественная убыль клеток за счет образования новых.

Гибель клеток и опустошение тканей играют важную роль в развитии общих поражений организма от ионизирующего излучения — лучевой болезни.

4.2. Лучевая болезнь

При местном воздействии ионизирующей радиации в зависимости от дозы облучения возникают различные изменения — от явлений преходящих расстройств кровообращения до развития радиационных ожогов и некрозов.

После внешнего равномерного облучения организма в зависимости от дозы полученного воздействия возникают поражения от едва уловимых общих реакций до острых форм лучевой болезни. При равномерном облучении в дозах 1–10 Гр (100–1000 рад) развивается острая лучевая болезнь с преимущественным поражением костного мозга. Костно-мозговая форма острой лучевой болезни с преимущественным поражением кроветворной системы наиболее типична. В ее течении выделяют четыре периода: первичную реакцию (кратковременный); скрытый (мнимого благополучия); разгара болезни; восстановления.

Первичная реакция обычно наблюдается, если доза облучения превышает 0,2 Гр (200 рад). Возникает сразу после облучения и длится от нескольких часов до 1–2 сут. В это время характерны некоторое возбуждение, головная боль. Затем наступают диспепсические расстройства. Со стороны крови — кратковременный нейтрофильный лейкоцитоз, лимфопения.

В механизме развития лучевой болезни наряду с прямым повреждающим действием ионизирующего излучения на клетки ведущее значение имеет включение в этот процесс нервных и гормональных механизмов регуляции функций организма. В начальном периоде лучевой болезни характерна повышенная возбудимость нервной системы, отсюда некоторая лабильность (неустойчивость) вегетативных функций — колебания артериального давления, ритма сердца и т.д. Активация гипофиз-адреналовой системы приводит к усиленной секреции гормонов коры надпочечников, что в данной ситуации может иметь приспособительное значение.

Скрытый период болезни характеризуется улучшением общего состояния больных вплоть до кажущегося благополучия. Продолжительность латентного периода зависит от дозы облучения. При сравнительно небольших дозах 0,25–1 Гр (25–100 рад) начальные легкие функциональные реакции не пере-

ходят в развернутую клиническую картину (т.е. в третий период болезни), и заболевание ограничивается затухающими явлениями начальных реакций. При облучении в средних дозах 1,5—2,5 Гр (150—250 рад) латентный период продолжается 2—2,5 нед. При больших дозах 3—5 Гр (300—500 рад) в латентный период — 3—10 сут. — продолжают нарастать изменения в системе кроветворения: лейкоцитоз сменяется лейкопенией, нарастает лимфопения, затем появляются тромбоцитопения и другие изменения системы крови. Все это — результат непосредственного повреждения клеток радиочувствительных органов — костного мозга и лимфоидного аппарата.

В период разгара болезни состояние больного вновь ухудшается — нарастает общая слабость, повышается температура тела, появляется кровоточивость, в результате чего на коже и слизистых возникают кровоизлияния, в тяжелых случаях они возможны и в сердце, и в головном мозге. Характерно истощение гемопоэза, в тяжелых случаях до полного опустошения кроветворной системы вследствие гибели стволовых клеток. Количество лейкоцитов и тромбоцитов в периферической крови резко падает. Возникает ряд эндокринных нарушений и нарушений функции нервной системы. Резко снижается иммунитет, в результате чего легко возникают инфекционные заболевания, аутоинфекция и аутоинтоксикация.

Продолжительность периода выраженных клинических проявлений от нескольких дней до 2—3 нед. В наиболее тяжелых случаях больной гибнет на пике заболевания.

Период восстановления характеризуется постепенной нормализацией нарушенных функций. Температура тела снижается, прекращается кровоточивость, восстанавливается кроветворная функция, нормализуется обмен веществ и т.д.

При благоприятной ситуации болезнь излечивается полностью. При неполном восстановлении функции кроветворения возможен переход болезни в хроническую форму.

При облучении в сверхсмертельных дозах — 10 Гр (1000 рад) и более — смерть наступает на седьмые—десятые сутки. В этот период характерны интенсивная рвота, тенезмы в день облучения, в дальнейшем — кровавый понос, повышение температуры тела, явления сепсиса, типичные для лучевого поражения изменения крови.

При дозах еще более высоких (20—80 Гр) смерть наступает на четвертые — седьмые сутки. В этот период характерны тяжелые гемодинамические нарушения, парез сосудов и распад тканей. Общая интоксикация, олигурия, гиперазотемия.

При дозах > 80 Гр (8000 рад) смертельный исход может произойти даже в ходе самого облучения или через несколько минут (или часов) после воздействия — так называемая «смерть под лучом». Причина — гибель клеток коры головного мозга и нейронов

ядер гипоталамуса. В поражении нервной системы главное значение имеет непосредственное повреждающее действие ионизирующей радиации на ткани. По-видимому, существенную роль играют и образующиеся в тканях радиотоксины.

4.3. Патогенез лучевого поражения организма

Патогенез лучевого поражения организма представляется очень сложным процессом. Начальное звено поражения — непосредственное действие радиации на клетки радиочувствительных тканей. Наряду с этим первичным процессом с самого начала лучевого поражения организма возникают изменения функции интегративных регулирующих систем, прежде всего нервной, позже эндокринной и иммунной.

Патогенетические процессы при воздействии радиации на организм более подробно рассмотрены ниже.

4.3.1. Клеточно-молекулярные реакции и их последствия.

Критические структуры клеток

Сложившиеся представления об эффектах, лежащих в основе биологических реакций на лучевые воздействия, построены преимущественно на моделях острых радиационных поражений дозами от 10 до 100 Гр и выше. В основе реакций на такие воздействия, превышающие дозы суммарного радиационного фона в сотни тысяч раз, лежат (согласно модели Вейса-Баррона) процессы ионизационного радиолитического разложения воды клеток с последующим образованием химически агрессивных свободных $H^{\cdot}$, $OH^{\cdot}$, $H_2O_2^{\cdot}$, $O^{\cdot}$, разрывом молекулярных связей ДНК, аминокислот белка, блокадой тиоловых (SH) группировок ферментов синтеза биологических структур.

Внутримолекулярное и внутриклеточное распределение энергии, соотношение факторов ионизации и возбуждения внутри молекул, электромагнитные взаимодействия фактора в оценке такого массивного ионизационного удара не имеют значения.

Ионизирующие излучения естественного радиационного фона планеты при его устоявшемся на протяжении миллионов лет спектре (с энергией фотонов от 50 кэВ до 1 МэВ) и мощности дозы (порядка 200 мбэр/год) поглощаются в биологических тканях преимущественно металлсодержащими ферментами. Взаимодействие идет по типу фотоэффекта с характерным крайне неравномерным распределением энергии внутри молекулы. Основную часть энергии — поглощенную веществом $E_p \sim Z^{3(4)}$, где Z — порядковый номер элемента в таблице Менделеева, — забирает электронная оболочка активного центра фермента (Co, Ni, Fe, Cu) —

«банк энергетической валюты» химических процессов — электронов внешних нестабильных электронных оболочек реагентов.

Полициклическая C-H—N-сетка активного центра фермента при определенных длинах волн фотонного излучения возбуждается (эффект резонанса), что в совокупности с реакцией фотонного возбуждения активного центра фермента ведет к химической (тысячекратной и более) активации процессов обмена. Такие эволюционно отработанные реакции фотоэффекта и электромагнитного резонанса лежат в основе синтеза, роста, репарации клеток. Дополнительно, в пределах определенной кратности фона, облучение радиацией устоявшегося состава (^{40}K , вторичное космическое излучение, мягкая рентгеновская радиация и, очевидно, другие радиационные воздействия, укладывающиеся в адаптированные пределы волновых и корпускулярных характеристик) стимулирует биологические процессы, повышая иммунитет, рождаемость, среднюю продолжительность жизни. Изменения спектра излучений, энергии фотонов ведут к неблагоприятным эффектам: статистически доказано, что смещение естественного спектра солнечной радиации в сторону более жесткого ультрафиолетового излучения на 1 % ведет к росту рака кожи (поломки ДНК эпителия) на 2 %.

Очевидно, что характерное смещение спектра техногенных ионизирующих излучений современной среды в сторону 1 МэВ дополняет взаимодействия Комптон-эффектом и ростом в облученной клетке электронов, сорванных с электронных оболочек облучаемого вещества с энергией, достаточной для разрывов молекулярных связей ДНК, ферментов. Частота таких разрывов превышает естественную (фоновую) частоту в десятки раз при равных физических поглощенных дозах радиации (John W. Gofman, 1990). Немалое значение здесь имеет, очевидно, и изменение частотных (волновых) электромагнитных характеристик, излучений, искажающих эволюционно отработанные резонансные взаимодействия биологических структур и радиоактивности среды.

Такие спектрально зависимые различия реакций, выявляемые в случае острых воздействий только при разнице в энергии фотонов (частиц) порядка сотен МэВ, становятся, по всей вероятности, ведущим фактором опасности в случае хронических популяционных облучений (МКРЗ зарегистрирован двукратный рост биологической эффективности хронического профессионального облучения фотонами с энергией 1 МэВ).

Неучтенность спектра вносит определенную ошибку в оценку последствий облучения при принятом коэффициенте качества радиации от техногенных источников. Равенство этой величины единице очевидно только при острых воздействиях и не соответствует регистрируемым последствиям радиоактивного загрязнения среды.

Повышенная частота молекулярных поломок вследствие нарушений электронного транспорта и радиационных взаимодействий

и особенно ДНК облучаемой клетки требует для восстановления структур массивных дополнительных энергетических затрат. Вместе с тем повреждающее действие хронического малоинтенсивного облучения направлено прежде всего на энергетические процессы клетки, протекающие в ее симбиотических, достаточно самостоятельных, имеющих собственную ДНК органеллах, митохондриях. Причиной избирательного действия (вскрывающей «энергетический парадокс» эффекта) является концентрация в митохондриях металлсодержащих ферментов (цитохромов), что ведет к преимущественному поглощению энергии излучений этими структурами, с последующим повышенным риском внутриклеточных разрушений этих энергетических центров.

Энергия излучений, поглощаемая ферментами органелл, превышает поглощаемую «окружающей» структурированный фермент $C-H-O$ -средой клетки в сотни — тысячи раз. Избирательное разрушение фермента дополняется разрушением его связи с наиболее агрессивным в свободном состоянии внутри клетки элементом — кислородом. Поступление его в клетку при ферментной недостаточности транспорта окислителя ведет к выходу в клеточную среду атомарного кислорода (эффект Петко), образованию свободных радикалов, пероксидов, пероксидному окислению липидов (ПОЛ), мембран клеток повреждениям ДНК. Цепь реакций потенцируется закономерным здесь дефицитом продукции окислительного фосфорилирования «энергетической валюты» живого, АТФ и последующим компенсаторным переходом клетки на более древнее анаэробное дыхание, сопровождающееся массивным выходом токсических метаболитов.

Такие свободнорадикальные эффекты (ПОЛ) не являются, как это считалось, исключительно радиационными, несмотря на специфичность первичных цитохромных поломок. Выход агрессивного кислорода практически неизбежен в звеньях транспорта кислорода в норме. Для обеспечения безопасности этого чреватого риском окислительного разрушения звеньев высокоэффективного процесса выработки энергии в клетке имеется эволюционно отработанная (ферментная группа трансфераз) система защиты. Ее недостаточность тем не менее неизбежна при любых энергетических перегрузках клеток и при неизбежном здесь ферментном дефиците транспорта окислителя.

Выход свободных радикалов в цитоплазму регистрируется при хронически повышенных физических перегрузках, токсическом повреждении ферментов и дефиците внутриклеточного транспорта кислорода, иммунодефицитах, склеротических изменениях мембран, стрессе и др. Свободные радикалы при хроническом выходе в цитоплазму ведут к повреждению реакционных поверхностей мембран и ДНК митохондрий, их инволюции и гибели. Особую опасность хронический энергетический кризис клетки

представляет для нейронов, обладающих в норме наиболее мощным энергетическим потенциалом (до 10 000 митохондрий в нейроне при 5000 в других тканях).

Цитохромная направленность радиационных повреждений подтверждается и введением в клетки, организм радиопротекторов: металлосодержащие ферменты, полусинтетические казеиновые соединения железа, кремния и даже несвязанный мелкодисперсный порошок металла резко снижают повреждающее действие радиации.

Параллельно цитохромному эффекту, но в большей степени вследствие его побочных (ПОЛ) реакций, в клетке идет *разрушение мембран*, определяемое тропностью радикалов к липидам, тиоловым группировкам этих структур. Немалый (по мнению ряда авторов — ведущий) вклад в разрушение дренажно-детоксикационных, рецепторных функций мембран вносят ионизационные изменения мембранного потенциала, определяющего функциональную активность клетки. Вред радиационного образования дополнительного «каскада» ионов Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , избыточного положительного потенциала клетки подтверждается внесением облученного животного в среду, насыщенную отрицательными ионами. Ионная терапия резко снижает повреждающую эффективность облучения, риск формирования рака, лейкозов (В. В. Спиридонов, 1976).

Снижение детоксикационных, рецепторных, барьерных функций сети мембран клеток на фоне подавления энергетических процессов ведет к дополнительному выходу в клеточную и межклеточную среду токсичных метаболитов. Разрушение мембранных рецепторных полей, настроенных (в зависимости от функций ткани) на определенные гормональные приказы, лежит в основе искажений эндокринной регуляции обмена и, как следствие, дополнительных «эффективных» функциональных расстройств клеточного обмена. Суммация мембранных и цитохромных реакций вносит до 90 % вклада в формирование радиогенных эффектов в клетке.

Повреждение генопина клетки, ее ключевой регуляторной системы, ДНК, диктующей до 1000 сигналов в минуту только по биохимическим каналам связи (через мембранную сеть транспорта матриц — РНК), является пусковым началом нарушений нормальной репродукции внутриклеточных структур, патологического разрастания качественно изменившихся клеток рака, лейкозов. Реакции, судя по современным представлениям, связаны с разрушением хромосомного цикла предмитотического контроля структуры ДНК. Контроль ведется ферментами репарации, по дубликатным (аналогичным) фрагментам нитей в двунитевой (двуспиральной) структуре ДНК хромосом. Непосредственно радиационной причиной онкогенеза является разрушение (деформация) фрагментов генома клетки при попадании в них кванта (частицы) с энергией, достаточной для одновременного разрушения молекулярных связей в обеих нитях. Нарушению предмитотиче-

ского контроля могут способствовать радиационные повреждения мембран, энергетических процессов клетки и, как следствие, подавление активности ферментов репарации.

Фиксация искаженного (но конкурентного) генотипа клетки (риск появления $1 \cdot 10^{-6}$) может вовлечь в процесс (особенно на фоне подавленных иммунных реакций) соседние клетки выходом этой группы из-под гуморального контроля с последующей активной неконтролируемой пролиферацией. Аналогичные поломки генетического материала зародышевых клеток могут вести к предрасположенности к раковым заболеваниям детей, зачатых и родившихся в радиационных зонах, генетическим и тератогенным дефектам.

В целом цепь внутриклеточных радиогенных реакций отличается от аналогичных полиэтиологических реакций «окислительного стресса» и последующего каскада повреждений от воздействия других малоинтенсивных факторов среды (п. 3.4) только по пусковому (цитохромному) началу и риску непосредственного радиогенного повреждения ДНК. Такие «SOS-реакции» при оптимальном соотношении функциональных резервов клетки и мощности повреждающего действия любого фактора ведут к стрессорной поисковой (эволюционно отработанной) ферментной перестройке обмена, направленной на возвращение энергетических расходов и эффективности выполняемых ферментных функций на дорадиационный уровень, формируя «плато» устойчивости к воздействию. Вместе с тем именно однонаправленность и результирующая однотипность малоинтенсивных воздействий (Н. М. Кончаловская, 1972) резко снижают устойчивость клетки на фоне хронического «окислительного стресса» и соответствующей напряженности транспортных каналов мембран, фоновых дефектов мембранорецепторных полей, искаженности информационных сигналов и соответственно истощения (мощных в норме) функциональных резервов клеток.

4.3.2. Реакции организма. Критические системы

Сохранение согласованности функций клеток, межклеточных взаимодействий, временных циклов роста, деления, отмирания, постоянства внутренней среды органов и систем в постоянно меняющихся, внешних и проникающих в организм воздействиях осуществляется благодаря постоянному надзору иммунной, эндокринной, нервной систем организма и вносимым ими коррекциям. Системы едины (ассоциативны) в выполнении функций характерных «темных» (И. М. Сеченов) неконтролируемых ЦНС, интерорецепторных ощущений и их анализа. Поэтому независимо от характера первичного воздействия, угрожающего сохранению гомеостаза (психогенный стресс, токсичность среды и др.), в реакции напряжения на чужеродные воздействия среды включается триада иммунных, нервных и эндокринных звеньев рецепции и ответа.

Начало реакциям в случае малоинтенсивных радиационных и токсических воздействий среды дает Т-лимфоцитарное (Т-хелперное) звено иммунного надзора. Клетки (благодаря их автономной способности к рецепции, памяти, регуляции функций и роста периферических клеток) регистрируют изменения в тканях, взаимодействуя с диффузно распределенными периферическими, нервными и эндокринными клетками АПУД-системы. Информация об изменениях передается нервной и эндокринной системам через эпифиз. Благодаря особенностям микроциркуляции крови в капиллярах железы, стенки которых выстланы пинеалоцитами, рецепторными клетками нервной (гипоталамус) и эндокринной (типофиз) систем, сигналы передаются в «высшие» звенья триады с последующими корректирующими нервными (вегетативными), гормональными ответами, передающимися через Т-лимфоцитарное звено системы.

Повышенная частота периферических клеточных поломок обмена ведет, как правило, к напряженности иммунных реакций, росту числа клеток этого ряда в периферической крови — сигналу (ВОЗ, программы MRFIT и NHANES) общей адаптационной напряженности населения. На территориях России, пострадавших от аварии на ЧАЭС, сформировавшийся у населения стабильный умеренный лейколимфоцитоз принят в качестве нормы (Институт гематологии и трансфузиологии Минздрава России).

Напряженность иммунной, нервной, эндокринной систем организма в ответ на внесение в постоянный состав среды радиационного фактора ведет к повышенному риску и повышенной частоте в группах населения, испытывающих воздействия радиации, заболеваний и расстройств (поломок) напряженных систем.

Иммунная система, требующая внеконкурентных по сравнению с другими тканями энерготрат — постоянная репродукция и мембранорецепторное «обучение» лимфоцитов стромальными клетками красного костного мозга, вилочковой железы, иммунное обеспечение барьерных систем организма, — подавлена при доклинических (~50 сГр) лучевых нагрузках на ликвидаторов аварии на Чернобыльской АЭС. Формирование реакций многосложно и связано с дефицитом макроэргического обеспечения репродукции клеток, поломкой клеточной сигнальной системы обучения лимфоцитов в тимусе, красном костном мозге, переключением иммунной системы на деформированные под воздействием радиации, ставшие чужеродными белковые структуры — «лучевые антигены». Поломки напряженной системы проявляются появлением в кровотоке иммуннопассивных В-, Т-лимфоцитов, дегенерацией тучных (барьерных) клеток защиты. Нарушения проявляются повышенной частотой воспалительных процессов, ростом острых респираторных заболеваний (ОРЗ), пневмоний, нефритов, уретритов. Собоюственно радиационная зависимость реакций выявляется в группах

ликвидаторов аварии, а также у населения радиоактивных территорий с массивной техногенной загрязненностью среды (тяжелые металлы, пестициды) и соответственно с фоновой напряженностью первичных клеточных реакций, реакций систем регуляции гомеостаза. В группах населения радиоактивных территорий при относительной экологической чистоте среды (и соответствующих резервах систем защиты как клеточного, так и организменного уровней) регистрируется тем не менее не только отсутствие реакций, но и достоверный рост (стимул) иммунной резистентности жителей с увеличением радиоактивной загрязненности среды.

Нервная система сформирована из ста миллиардов (10^{11}) нейронов и ста триллионов (10^{14}) синапсов, определяющих шифровку, трансляцию, межнейронное распределение сигналов. Громадное число нейронов, вовлекаемых в реакцию на сигнал (в том числе и от эпифизарного рецепторного поля на изменения воздействий среды), внеконкурентно высокий нейронно-синаптический расход энергии на этот процесс (в одном нейроне функционирует до 10 тыс. митохондрий), ионизационная чувствительность синапса определяют высокую радиочувствительность системы. Искажения межнейронных и межсистемных связей проявляется в расстройствах поведения, сна, судорожных припадках, амнезии, дезадаптации, нарушениях функций вегетативной системы более чем у 90 % ликвидаторов аварии. У детей, рожденных на радиоактивной территории, при практически обязательном неврастеническом фоне выявляется повышенная частота пограничных нервно-психических расстройств (аффективный синдром, депрессия интеллекта и др.). Радиационная зависимость реакций, как и подавление иммунитета, достоверно регистрируется только при воздействии радиационного фактора на фоне техногенных токсических воздействий среды.

Эндокринная система по структуре верхнего эшелона желез (гипоталамус, гипофиз) более напоминает структуру синапса, секретирующего «медиатор» — гормон, разросшийся в «синаптическую щель», в крайне незначительных, но строго дозированных количествах. Поэтому незначительные, но постоянные дисфункции мембран, энергетического аппарата этих клеток, генетического внутриклеточного контроля синтеза гормонов катастрофичны для всего организма. Подавление гормональной секреции, ускоренная структурно-функциональная инволюция желез, рост частоты поломок генотипа клеток ведут к каскадному (растущему в более низких звеньях) диссонансу эндокринной регуляции гомеостаза, подавляя адаптационные иммунные и нейрорегуляторные резервы организма. Непосредственная связь системы с нервным аппаратом, взаимозависимость систем в реакциях напряженности и истощения функций проявляются доклиническими, эндокринными расстройствами в совокупности с нервно-психическими реакциями.

Особое место в формировании нейроэндокринных расстройств занимает облучение организма в период эмбриогенеза и раннем (младенческом) возрасте. Малейшие дефекты генетического аппарата быстродействующих клеток, энергетических и пластических функций в этот период накладывают отпечаток на формирование и последующее состояние нервной и эндокринной систем. Среди детей, перенесших тератогенные радиационные воздействия, выявляются более частые органические нарушения (табл. 4.1).

Собственно эндокринные расстройства в группе ликвидаторов чернобыльской аварии в 10 раз превышают частоту аналогичных реакций у жителей нерадиоактивных территорий. Выявляемые при обследовании нарушения функций гипоталамно-гипофизарной надпочечниковой системы (составляющие стрессорных ответов) выявляются у детей радиоактивных территорий, в два раза превышая частоту аналогичных реакций детей «чистых» районов страны. Радиационно-эпидемиологический анализ медицинских по-

Таблица 4.1

Дефекты нервной системы, выявляемые у детей с радиоактивных территорий от аварий на Чернобыльской АЭС, ПО «Маяк»

Начальное облучение	Ключевые симптомы, отмеченные в исследованиях	Диагноз	Доля от общего числа обследованных
В возрасте 7 – 14 лет и старше	Раздражительность, неадекватность эмоций, утомляемость, рассредоточенность, плохой сон, мнительность, недоверчивость, частая смена настроений, конфликтность, аффективность	Неврастения и другие формы неврозов	До 70 – 100 %
В возрасте 5 – 7 лет	Интеллектуальная пассивность, умственная отсталость, ухудшение памяти, бедность словарного запаса, дефекты речи, депрессии, неспособность к полной и последовательной реализации целевых установок, хаотичность поведения, судороги	Олигофрения, судорожный синдром	От 30 до 60 %
Облучение зачаточного материала обоих родителей, радиационный тератогенез	Судорожные припадки в совокупности с симптомами олигофрении, церебральные параличи, утрата слуха, зрения и другие органические аномалии	Генетические пороки нервной системы	В два раза выше по сравнению с чистыми районами страны

следствий чернобыльской аварии, проведенный Российским государственным медико-дозиметрическим регистром, поставил именно эндокринную патологию в разряд достоверных радиационно-зависимых реакций облучаемого организма. Реакции тем не менее неспецифичны; рост аналогичных расстройств отмечается у жителей районов повышенной токсичности — Московского округа, Новосибирска — с массивной пестицидной загрязненностью среды. Поэтому радиогенность расстройств этого ряда ставится под сомнение, в том числе и вследствие выявляемой более низкой частоты таких реакций на радиоактивных территориях с характерной экологической чистотой среды.

4.3.3. Популяционные реакции

Популяция — население, заселяющее определенные климато-географические пространства и воспроизводящее себя на занимаемой территории в течение большого (не менее пяти) числа поколений, — самостоятельная экосистемная единица, способная к сохранению своего динамического постоянства (уравновешенности рождаемости и смертности, при определенном биологически допустимом уровне заболеваемости), устойчивая по отношению к спектру характерных (для занимаемого пространства) воздействий среды. Как и при формировании одного из звеньев устойчивости, иммунитета, процесс развивается по принципу «ключ к замку». Причем «замком» (закон Либиха) является специфичная для занимаемого пространства гамма микроэлементного, витаминного, аминокислотного, радионуклидного состава среды, мощности и спектра, устоявшейся периодичности (ритма) электромагнитных (ионизирующих, ультрафиолетовых, СВЧ) радиационных, звуковых (информационных) воздействий; «ключом» — сформировавшиеся генетически фиксированные ферментно-гормональные особенности обмена, дополняемые при необходимости сложившимися традициями (особенностями) питания, поведения, — *популяционный фенотип*.

Как и функции отдельного организма (дыхание, кровообращение, выведение), человеческий популяционный фенотип имеет мощные функциональные резервы, позволившие адаптировать, в отличие от более низших экосистемных единиц, практически все, чрезвычайно разные, в том числе и радиоактивные, геохимические и климатические провинции Земли. Исследования адаптивных реакций, проводившиеся СОАМН (В. П. Казначеев), показывают, что интимная адаптационная перестройка обмена мигрантов, направленная на подобный генетически фиксированному ферментному обеспечению клеточного обмена аборигенов — эвенков, протекает у населения, осваивающего Север, не менее 10 — 15 лет. Окончательная адаптация, судя по обследованиям ста-

роверов, с полной генетической фиксацией фенотипа происходит в пяти-шести поколениях переселенцев.

Аналогичные процессы прослеживаются и у населения Западной Европы, США. Исторически внезапная техническая революция XIX в. сопровождалась здесь быстро менявшимися средой мощными техногенными загрязнениями, бурно прогрессирующими миграцией, концентрацией населения в городах (урбанизацией), ломкой устоявшихся отношений и критериев ценностей. Вместе с тем резкая иммунная (рост частоты воспалительных процессов органов дыхания, мочевыделения), нейроэндокринная напряженность процесса при средней продолжительности жизни, снизившейся до 40—50 лет (*T. Makinodan*), сменяется в последующих пяти-шести поколениях ростом ее до 80 лет и выше, стабилизацией здоровья при неизменных, а в ряде случаев ухудшившихся характеристиках среды.

Радиационный фактор, относящийся, как и электромагнитный, микроэлементный спектры воздействий к факторам *стационарности экосистем*, неизменным на протяжении последнего миллиона лет геохимической истории планеты, ведет в случае смены радиационного состава среды к аналогичным адаптационным последствиям. Процесс протекает по двум эволюционно отработанным вариантам: экстренной энергоемкой детоксикации токсических метаболитов, накапливающихся вследствие конфликта вновь сформировавшегося состава воздействий и генетически фиксированного дорадиационного фенотипа обмена (несоответствия старого «ключа» к новому «замку»). Реакция вследствие мобилизации ≥ 30 дополнительных ферментов (трансфераз) и постоянных неадекватных функциям клеток энергозатрат сопровождается дополнительным смещением энергетики клеток в сторону перексидного окисления липидов, повышенным выходом свободных радикалов, ускоренным старением клеток, организма в целом, популяций деформированных биоценозов.

Параллельная цепь реакций направлена на эффективную «рентабельную» реорганизацию обмена (использование ПОЛ в качестве ведущего ферментозащищенного процесса энергопродукции у аборигенов Севера, повышенная цитохромная активность у жителей высокогорья и др.). С наибольшей скоростью такие процессы протекают в микрофлоре: генетически фиксированная адаптация к аномальным микроэлементным и токсическим ингредиентам среды, антибиотикам при полном сохранении эпидемиологических характеристик штаммов формируется за менее чем 50 лет.

В организме клеточные реакции эффективной адаптивной реконструкции обмена фиксируются Т-лимфоцитарным надзором с последующей трансляцией (через Т-лимфоцитарный кровоток) в нервную, эндокринную системы регуляции гомеостаза с последующей эфферентной коррекцией обмена во всех тканях. При

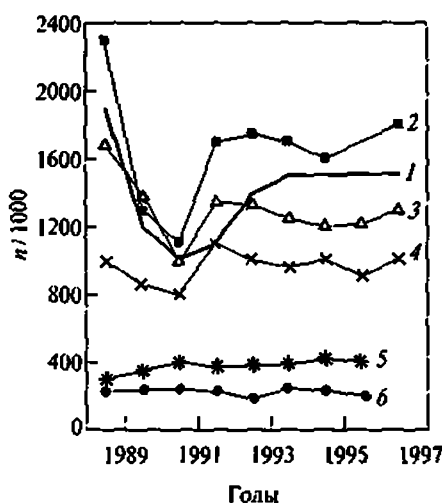
постоянном спектре вновь сформировавшихся воздействий процесс ведет к формированию жесткого многоуровневого фенотипа, адекватного составу среды.

Процесс, как показывают наблюдения за заболеваемостью жителей радиоактивных территорий, идет 10—15 лет, не отличаясь от аналогичных типовых реакций на смену состава среды. Период конфликта — экстренной поисковой перестройки клеточного метаболизма, сопровождающийся накоплениями радикалов, эндогенных токсинов, повышенной частотой клеточных генетических поломок (риск канцерогенеза), высокой иммунной напряженностью и всплеском заболеваемости населения, сменяется через два-три года от начала воздействий характерной паузой реакций с последующим периодом напряженной устойчивости, адекватной ферментной, иммунной, эндокринной перестройкой обмена (рис. 4.2).

Характер и исход течения адаптационного популяционного стресса зависит от фоновой напряженности и мощности резервов адаптационных систем организма. В случае массивной фоновой загрузки среды, особенно такими экологическими новейшими, «маскированными» под микроэлементы и гормональные структуры метаболитами, как тяжелые металлы, пестициды, в популяциях формируется компенсированный (либо декомпенсированный) тип адаптации. Снижение общей частоты адаптационных поломок (заболеваний) сопровождается повышенной (к доадаптационной частоте), но стабилизировавшейся (компенсированный тип) либо прогрессирующей (декомпенсированный тип) частотой поломок одной из систем. Такие типы иммунной напряженности, иммунодефицита прослеживаются на радиоактивных от аварии на Чернобыльской АЭС территориях при массивной фоновой загрязненнос-

Рис. 4.2. Динамика реакций населения радиоактивных территорий с мощным техногенным химическим фоном среды и контрольных территорий, изолированных от техногенных воздействий от момента аварии на Чернобыльской АЭС:

1 — типовая модель адаптации; 2, 5 — общие реакции жителей радиоактивных (2) и контрольных (нерадиоактивных) (5) территорий; 3, 4, 6 — иммунные реакции жителей радиационно-токсичных (3), радиоактивных (4), контрольных (нерадиоактивных) (6) территорий



ти среды «маскированными» токсическими метаболитами (юго-запад Брянской области, Могилевская область и др.).

Полная адаптация, нередко протекающая по гормезисному (стимулирующему) типу и сопровождающаяся активацией обмена, роста, физического развития детей, снижением заболеваемости населения в целом по мере роста малых техногенных радиационных нагрузок, прослеживается на радиоактивных, но экологически чистых территориях. Заболеваемость детского населения здесь, вызванная дефицитом иммунных функций, с ростом радиоактивности среды до 17 Ки/км² снижается до 473,3 на 1000 детей (что в два раза ниже аналогичных реакций по России); нейроэндокринные «поломки» -- до 19,9 (ниже в шесть раз); общая частота заболеваний — до 927,2 (ниже в 1,3 раза).

Повышенная частота свободнорадикальных поломок генотипа клеток в процессе адаптации ведет к повышенному риску формирования конкурентных прораковых клеточных популяций и последующим (спустя 5—15 лет от момента мутаций) раку, лейкозу.

Генетические поломки такого ряда лежат в основе генетических и тератогенных дефектов эмбриогенеза с последующим рождением детей с патологией, чаще всего центральной нервной системы.

Теоретически конкурентность клеток с искаженным генотипом растет в случае дефицита иммунных реакций (клеточного надзора), наиболее вероятна при радиационных аварийных воздействиях на фоне агрессивной токсичности среды. Вместе с тем сравнительная оценка показателей этого ряда канцерогенеза по России (1,06 для детей и 7,01 для взрослых на 1000 чел), территорий радиационно-изолированных воздействий (1,2 и 11,1) и территорий радиоактивной загрязненности на фоне мощного техногенного фона среды (1,6 и 10,2 соответственно) не выявляет достоверных различий соотношения реакций. Отсутствие достоверности в показателях закономерно. Стохастические реакции от воздействия радиационного фактора ядерно-энергетического происхождения многократно перекрываются аналогичными радиогенными реакциями от других доаварийных источников радиационного фона (по В. Ф. Кириллову):

Источник	Собственно радиацион- ный фон	Техногенно измененный радиационный фон	Глобальное загрязнение ядерно- энергетического происхождения
Число случаев в год (по России):			
рак со смертель- ным исходом	6750	23 265	241,5
тяжелые наследст- венные дефекты	1775	6112	62,9

В целом прогнозы дальнейшего развития популяционных реакций на изменение радиоактивности среды могут быть построены на обобщении материалов о состоянии здоровья населения, проживающего в пяти-шести поколениях и более на территориях повышенного радиационного фона.

Обобщения этого ряда (А. М. Кузин) показывают, что смертность населения*, проживающего в условиях повышенной естественной радиоактивности среды, не только не отличается от аналогичных показателей в районе с нормальным уровнем радиации, но и достоверно ниже, в том числе по такому «радиогенному» показателю, как смертность от рака:

Радиационный фон	Повышенный	Нормальный
Содержание урана в почвах, мг/кг	20,8	1,0
Среднегодовая лучевая нагрузка, мрад	552	147
Общее число смертей в год	47	86
Из них от рака	7	10

Наблюдения, проведенные в США за жителями высокогорья (свыше 1000 м над уровнем моря, с повышенной космической радиацией), также указывают на статистически достоверную здесь меньшую смертность, в том числе и от рака, по сравнению с жителями обычных районов страны. Анализ переписи населения показывает, что до 80 % долгожителей проживают в высокогорных (Закавказье, Средняя Азия, Казахстан) районах с повышенным радиационным фоном. По расчетам, 10-кратный рост радиационного фона ведет к увеличению продолжительности жизни на 10 лет. Сравнительная оценка частоты генетических заболеваний и уродств в детском возрасте была проведена в провинции Китая Гуандонг (80 тыс. чел.) с содержанием урана в почвах, в пять-шесть раз превышающих норму. Национальность, занятость, структура питания населения радиоактивных и контрольных районов одинакова. Достоверных различий частоты исследуемых реакций не выявляется (22,3 случая врожденных дефектов на 1000 жителей в радиоактивных и 22,5 — в нормальных районах). Прослеживается большая иммунная защищенность детей в радиоактивных районах. Привлекает внимание экологическая техногенная чистота исследуемых радиоактивных мест (высокогорье, курортные зоны, сельскохозяйственные территории) и однотипная положительная (биостимулирующая) направленность реакций населения на воздействие радиационного фактора как в исследованиях последствий чернобыльской аварии в экологически чистых районах, так и в аналогичных условиях естественного повышенного радиационного фона. Такие совпадения макропопуляционных реакций позволяют прогнозировать не только благополучное течение реоргани-

* В частности, Италии по результатам 17-летнего наблюдения.

защиты популяционного фенотипа (адаптации) в ответ на малые изменения радиоактивности среды, но и гормезисный характер реакций при условии достаточных адаптационных резервов процесса, очевидных в случае отсутствия в составе среды агрессивных токсикохимических воздействий.

4.4. Экосистемные реакции на радиационную деформацию среды

Исследования, выявляющие общие (интегративные) закономерности реакций экосистем на деформацию радиационного звена факторов стационарности среды, отсутствуют. Единичные работы этого ряда указывают на сходство радиогенных изменений с популяционными в их зависимости от техногенного фона радиационных воздействий. Это подтверждается, в частности, чрезвычайно большим видовым разнообразием флоры в условиях аномальных экологически чистых радиационных воздействий. Такое разнообразие — ключ к резервной стабильности и эволюции экосистем — превышает здесь этот показатель средних широт с нормальным радиационным фоном в 15—20 раз. Эти различия позволили выдвинуть положение (F. Soddy) о ключевой функции повышенного естественного радиационного фона в происхождении новых видов живого.

Все сельскохозяйственные злаковые мира произошли из восьми горных мест с высоким уровнем космического излучения. Считалось, что основным действующим началом здесь являлось ультрафиолетовое космическое излучение. Но сравнительная оценка генетических реакций в эксперименте позволила американскому биологу кандидату Нобелевской премии Дж. Миллеру прийти к выводу о ведущей роли в формировании этих эффектов нейтронного потока частиц.

Положения об исключительности естественного радиационного фона, в противоположность техногенному, также оказались несостоятельными. Гибель растительности, грызунов в зонах атомного взрыва в Хиросиме, чернобыльской и кыштымской аварий непосредственно после состоявшихся инцидентов сменяется через полтора—два года бурным, превышающим дорadiационный период ростом и разнообразием живого.

Искусственное снижение радиационного фона в эксперименте ведет к противоположным реакциям — снижению скорости деления клеток, роста, размножения, что еще раз указывает на использование биотой «отобранных» в процессе эволюции радиационных воздействий в качестве фактора стационарности экосистем, колебания которого тем не менее требуют реорганизации экосистемных взаимодействий («ключ к замку») в биогеоценозах.

Помимо этой серии результатов, указывающих на био-, иммуностимулирующие функции фактора (А. М. Кузин), как правило, при его (не подчеркнутом в исследованиях) изолированном воздействии — в горных районах, территориях радиационных инцидентов, закрытых для человеческой деятельности, аналогичных экспериментальных облучений — имеется ряд не менее достоверных наблюдений, фиксирующих противоположные радиогенные реакции в районах с мощным техногенным фоном среды. К числу таких реакций, названных «эффектом Петко», относится широко рекламируемая деградация лесов вблизи АЭС, расположенных на территориях, крайне перенасыщенных тяжелыми металлами, оксидами азота, сернистым ангидридом и др., в непосредственной близости от Нью-Йорка, во Франции (в районах АЭС, расположенных в Бретани), в Германии (вблизи Франкфурта) и др. Реакции подчеркиваются выявляемой здесь повышенной частотой генетических дефектов новорожденных с последующей деградацией интеллекта, ростом детской преступности.

Системные исследования экологических реакций на радиационную загрязненность среды, близкую по составу к выбросам от АЭС, были впервые проведены Н. В. Тимофеевым-Ресовским. Наблюдения за сообществом биоценозов велись на грядках, в которые вносились радионуклиды ядерно-энергетического происхождения порядка 5 (малая радиоактивная загрязненность), 50 (средняя), 100 (высокая) мКи/м² или 0,5, 50, 100 кКи/км² почв соответственно. В микробассейны с озерной водой, водорослями, инфузориями вносилось от 3 до 600 мКи/л с аналогичным составом и шагом роста радиоактивной загрязненности. Для всех трех видов сообществ (наземный фитоценоз, почвенный бактериоценоз и пресноводный перифитон) были получены принципиально сходные результаты. Малые радиоактивные воздействия (порядка 5 мКи/л) как в почвенных, так и в водных биоценозах ведут к стимулу роста и достоверному увеличению биомассы, более выраженному в группах простейших, сапрофитной микрофлоры почв.

Дальнейшее увеличение радиационных воздействий ведет к явному расслоению (рис. 4.3) реакций: продолжению роста и

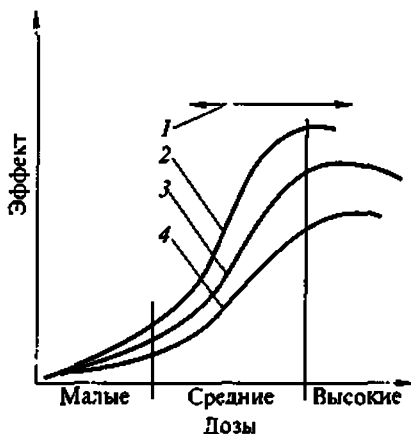


Рис. 4.3. Эффект «расслоения» биологических последствий радиационных воздействий в экосистемах: 1 — плато реакций; 2 — простейшие; 3 — растительность; 4 — животный мир

увеличению биомассы низших биологических видов, но при угнетении пролиферации высших форм растений, организмов.

Коэффициенты радиорезистентности составляющих биоценозов (по кратности роста LD_{50} относительно высших млекопитающих):

Высшие млекопитающие (человек, человекообразные и др.)	1 (контроль)
Грызуны (мыши, крысы и др.)	4—5
Птицы, рыбы	5—8
Змеи	50—80
Насекомые	4—40
Растения	4—600
Простейшие	400—1200

Такие расслоения симбиотической активности составляющих биоценозов создают чрезвычайно сложные внутрисистемные изменения межвидовых трофических взаимодействий, объема занимаемых сред, пространств, иерархичности межвидовых взаимодействий, что в целом, по аналогии с популяционными реакциями, может быть определено как деформация экосистемного фенотипа. Такие реакции, прослеживаемые в настоящем по реакциям микробиоты почв и при более малых (порядка 40 Ки/км²) радиоактивных загрязнениях среды (С.П. Просяникова, 1995), ведут к активации олиготрофной (пассивной в дорадиационный период) микрофлоры почв, снижению численности разрыхлителей почв, беспозвоночных, изменениям устоявшихся дорадиационных структур почвенных биоценозов, снижению плодородия почв. Изменения, судя по прослеженным закономерностям развития фенотипических реакций на смену состава среды, временные и предполагают в последующем, в том числе и при максимальных уровнях радиоактивного загрязнения среды, восстановление экологического гомеостаза, особенно при отсутствии антропогенных вмешательств в экологический метаболизм.

Вопросы для самоконтроля

1. Как радиационные воздействия среды влияют на клеточно-молекулярные реакции?
2. Как реагирует организм на радиационные воздействия?
3. Расскажите о популяционных реакциях.
4. Охарактеризуйте стохастические реакции на радиационные воздействия.
5. Расскажите об экосистемных реакциях на радиационные воздействия.

Нормы радиационной безопасности — один из наиболее спорных вопросов радиационной гигиены и экологии. Социальный резонанс чернобыльской катастрофы вовлек в решение этой проблемы специалистов, не всегда компетентных в медико-биологических аспектах экосистемных антропогенных воздействий. Выдвигаются концепции, описывающие рост частоты патологических реакций в популяциях по мере снижения дозы радиационного фактора, но увеличения его протяженности во времени. Исходя из таких закономерностей, необходимо полное исключение ионизирующих излучений из состава среды. Помимо ирреальности таких подходов, неприемлемых в оценке воздействий всех, не только радиационных, воздействий среды, авторы забывают о проверенной на практике концепции «взвешенного риска». После аварии на Чернобыльской АЭС и всплеска требований к закрытию ядерных энергетических установок в Европе такая попытка, позволившая взвесить риск вреда ядерной энергетики в риске вреда от тепловых электростанций, была предпринята во Франции. Расконсервация тепловых электростанций, резкий рост потребности в угле, его добыче и транспортировке, громадный газоаэрозольный выброс в атмосферу, концентрирующий в том числе и фоновую радиоактивность среды, доказала, что запрет наносит значительно больший вред, чем разумные ограничения предельно допустимых радиационных воздействий.

5.1. История нормирования радиации

Необходимость в нормировании радиации — определении уровней безопасного облучения — возникла сразу после открытия ионизирующих излучений и радиоактивности. В ноябре 1895 г., через три недели после опубликования В. К. Рентгеном чертежей анодо-катодной трубки, произошло первое радиационное поражение. Пионером стал Э. Грауббе: воспроизводя рентгеновское из-

лучение, он получил серьезный радиационный ожог кожи рук, приведший к развитию хронического дерматита. В 1896 г. А. Беккерель некоторое время носил герметично закупоренную ампулу с солями урана в кармане. На прилегающем участке кожи появились красные пятна, а затем — долго незаживающие язвы.

Первая попытка выявить безопасные пределы облучения была предпринята П. Кюри в 1911 г. Аппликации солей урана себе на предплечья позволили ему установить закономерности радиационных поражений кожи. Время появления легкого покраснения (эритемы), связь с количеством радиоактивности и длительностью соприкосновения явились основой первой практической мерки радиационной безопасности, «пороговой эритемной дозы». Под пороговой дозой П. Кюри понималось весовое количество радиоактивного вещества в сочетании со временем непосредственного соприкосновения с ним. Допустимыми считались такие последствия, при которых легкое покраснение кожи длилось не более суток, затем исчезало, возникало вновь через семь—десять суток, но при заживлении не оставляло рубцов.

В последующем эритемную дозу использовали и при работе с рентгеновскими излучателями, широко введенными к тому времени в медицинскую практику. В качестве своего рода «биологического дозиметра», позволявшего установить условия радиационной безопасности без риска для человека, использовали молодого бритого поросенка. Доза, которая вела к безопасным реакциям (эритеме), как это оказалось впоследствии, была равна 340 Р (рентген)! Позже, в 1925 г., американский радиолог Матчеллер предложил снизить эту дозу в 100 раз.

В начале 1920-х гг. в практику рентгенологического исследования стало входить все более жесткое и более проникающее в ткани излучение, смешавшее очаги радиационных поражений в красный костный мозг, гонады, лимфатические узлы облучаемого. Отсутствие эритемной реакции кожи при довольно больших дозах облучения, ведущих к поражениям внутренних органов, послужило одной из причин роста случаев радиационных поражений. Уже в 1911 г. было описано 94 случая злокачественных радиогенных опухолей. В 1936 г. в Гамбурге был поставлен памятник 110 пионерам радиационной практики, жертвам радиационных поражений. Все это привело к кризису «эритемного» нормирования. Были начаты обширные исследования интимных процессов биологического действия радиации. В 1928 г. в Женеве была учреждена Международная комиссия по защите от рентгеновских лучей и радия, ставшая в последующем наиболее авторитетной в мире Международной комиссией по радиационной защите (МКРЗ). По инициативе комиссии была разработана и введена в практику первая единица измерения радиации — рентген. Вопрос о допустимых размерах облучения был решен тем не менее спустя пять лет.

на основе анализа накопленного в мировой практике материала, обобщенном Зивертом, Барклеем, Коксом и др. В качестве переносимой (толерантной) была рекомендована доза 200 мР/сут, или 35 Р/год (в России, по постановлению Народного комиссариата труда, в качестве допустимой была принята доза облучения 1 Р/нед).

К последующему изменению величины привела неопределенность методов дозиметрии излучений. В странах Европы экспозиционную дозу радиации измеряли на поверхности тела облучаемого. В США аналогичные измерения проводили в свободном воздухе, что исключало, по мнению американских дозиметристов, ошибку за счет рассеянного и отраженного излучений. Для компромиссного решения вопроса (доведенного до уровня межправительственного англо-американского конфликта) измеряемую величину снизили в два раза — до 0,5 Р/нед (или 15 Р/год).

Второй этап снижения доз допустимого профессионального облучения начался в военные и послевоенные годы, что во многом было связано с вовлечением громадного числа людей в практику радиационной военной физики, в добычу урановых руд, в испытания и применение ядерного оружия (Хиросима, Нагасаки), в строительство реакторов и атомных электростанций. Накопленные к этому времени материалы о серьезных отдаленных последствиях облучения, об ускорении процессов старения заставили, прежде всего, отказаться от понятия «толерантная (т.е. переносимая) доза» и ввести современное — предельно допустимая доза (ПДД) — «такая доза, которая, как можно полагать в свете современных знаний, не должна вызывать значительного повреждения человеческого организма в любой момент времени от начала радиационных воздействий на протяжении его жизни». В том же году в рекомендациях МКРЗ было впервые введено понятие о критических органах, т.е. «органах, облучение которых данной дозой причиняет наибольший вред облучаемому организму».

Расширение использования ионизирующих излучений, накопление обширного экспериментального и фактического материалов, указывающих на генетический риск радиационных воздействий, определявшийся как «пониженная способность к деторождению, повышенная частота генетических расстройств в последующих поколениях» вызвали необходимость дальнейшего снижения ПДД. Расчеты и обобщения генетических исследований показали, что доза, удваивающая частоту спонтанных (естественных) мутаций у человека, находится в пределах 0,1—1 Зв (10—100 бэр), привели к выводу о необходимости ограничения лучевых нагрузок как на лиц, занятых в радиационной практике, так и на население в целом. В 1948 г. МКРЗ было предложено снизить суммарную (профессиональную) лучевую нагрузку до 200 бэр

(или 5 бэр в год), запретить работу с источниками ионизирующих излучений лицам моложе 18 лет, беременным женщинам, ограничив суммарную лучевую нагрузку в детородном возрасте (до 30 лет) до 60 бэр. К 1958 г. эти практически неизменные до настоящего времени положения были утверждены международным конгрессом радиологов.

Первым официальным документом, нормирующим профессиональное облучение в нашей стране, явились «Санитарные нормы и правила при работе с радиоактивными изотопами» от 01.04.1953.

В документе регламентировалась допустимая доза гамма-облучения для профессиональных работников — 0,3 Р/нед (15 Р/год).

В 1957 г. в документ были внесены изменения, учитывающие относительную биологическую эффективность излучений разных видов, но допустимые дозы остались прежними. Впервые развернутые требования радиационной безопасности были отражены в документе 1960 г. «Санитарные правила работы с радиоактивными веществами и источниками ионизирующих излучений 333 -- 60». В эти годы, подобно зарубежным национальным комиссиям по радиационной защите, создается отечественная Национальная комиссия по радиационной защите (НКРЗ) во главе с академиком АМН СССР Н. А. Летаветтом.

Благодаря работе этой комиссии, в стране впервые разрабатывается национальный документ, соответствующий международным нормам радиационной безопасности, НРБ-69. В настоящее время в стране действует НРБ-99. С учетом этого юридического документа в России должны вестись все работы с ионизирующей радиацией и обеспечиваться радиационная безопасность всего населения.

5.2. Современные теоретические представления о пределах радиационной безопасности

Наиболее полно современные представления о радиационной безопасности изложены в публикациях МКРЗ № 26 и № 60. Основой построения системы радиационной безопасности в стране является нормирование любых лучевых воздействий на население с учетом возраста, пола, профессиональной принадлежности, числа облучаемых и доли облучаемых по профессиональной принадлежности от общего числа жителей страны. Нормирование должно предусматривать полное предупреждение соматических реакций (снижение сопротивляемости организма, нарушения нервно-психического состояния) и максимальное снижение риска развития отдаленных реакций на облучение в виде опухолей, лейкозов, наследственных заболеваний (стохастиче-

ские эффекты). Понятие о стохастическом эффекте (риске) и его размерах до сих пор спорно и нуждается в расшифровке. Согласно трактовке Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), риск — это всякое скрытое, явное, но проявляемое в будущем неблагоприятное влияние фактора среды на физическое развитие, здоровье и жизнедеятельность человека. Вместе с тем облучение в любых, даже незначительных, дозах сопряжено с риском. Поэтому в практику оценки радиационной безопасности введено понятие «относительный риск» — отношение риска от воздействия радиации (в ее допустимых размерах) к риску от воздействия нерадиационного (принятого обществом) фактора при осуществлении аналогичных технологий, лечении одинаковых заболеваний, получении одинаковой энергии и т.п. Иными словами, это «взвешенность» риска нового, радиационного, в риске старого, привычного.

Приемы оценок риска различны. Так, при оценке получения энергии радиационным (ядерным) и нерадиационными способами мы должны сопоставлять размеры риска по всей цепочке технологии производства, начиная от урановых и угольных шахт, транспортировки топлив, разгрузочно-перегрузочных работ и кончая риском непосредственного производства энергии на АЭС и аналогичной по мощности тепловой электростанции. Кроме того, риск должен оцениваться и по аналогичным (сопоставимым) последствиям воздействия производства: раковым заболеваниям, травмам (переоблучению), влиянию на заболеваемость в зоне производства и в прилегающих районах.

Вместе с тем такая оценка трудна, поскольку специфичный для данного производства риск чаще всего «смазывается» «фоновым» воздействием социальных, коммунальных и т.п. факторов. Риск смерти от воздействия факторов нерадиационной природы, например несчастные случаи, профессиональные и непрофессиональные заболевания, убийства и самоубийства, колеблется в пределах от ста до миллиона в год (один шанс из 100 — один шанс из 1 000 000). Приведенные колебания слишком высоки, чтобы достоверно сравнивать их с риском радиационного производства энергии: от $3 \cdot 10^4$ до $2 \cdot 10^5$ (табл. 5.1).

Распространенным подходом является оценка допустимости облучения по социально-экономическому соотношению «польза/вред» (любая новая технология несет в себе вред). Общество должно принимать новую технологию только в том случае, если вред, наносимый новой технологией, окупается приносимой ею пользой. Оценка не менее затруднительна. Японские обыватели, проживающие вблизи АЭС, находятся на полном государственном обеспечении.

Не менее остро встают вопросы и общего (допустимого) числа облучаемого населения страны. Проблема связана с оплош-

**Расчетная величина риска возникновения рака при уровне воздействия
1 сЗв (с учетом зависимости «доза-эффект»)
(Данные International Commission on Radiological Protection)**

Тип рака	Расчетное число случаев на 1 млн лиц, подвергав- шихся воздействию ^{*1}	Порядок риска для отдельных лиц
Новообразования, веду- щие к летальному исходу:		
лейкемия ^{*2}	20	5
другие	20	5
Рак щитовидной железы ^{*3}	10 — 20	5

^{*1} Эффект может проявиться на протяжении периода более 10 — 20 лет.

^{*2} Риск может возрастать в 2 — 10 раз при воздействии на плод.

^{*3} Расчеты касаются воздействия в детском возрасте; частота случаев заболевания не эквивалентна смертности.

ностями захоронения радиоактивных отходов атомной промышленности, отслуживших медицинских и технических гамма-установок, радиоизотопов, ростом риска аварий на АЭС, массовостью медицинского профилактического облучения, с одной стороны, и ростом проявления генетических последствий облучения — с другой. Еще в 1933 г. генетик Меллер говорил о необходимости оберегать от радиации генетический материал человека, «нить единожды данной нам зародышевой плазмы (ДНК) для сохранения человеческой расы в самом отдаленном будущем, а не увлекаться эфемерной выгодой одного, нынешнего поколения».

Во многих странах с этой целью введены правила жесткого ограничения любого вида облучения населения, в том числе и медицинского, в дозах, превышающих естественный радиационный фон. Число же облучаемых (по причинам места работы, жительства и др.) в более высоких дозах, близких к ПДД, не должно превышать 2 % от общего числа жителей страны. Рекомендуются и защита «разбавлением» облучаемых среди необлучаемого населения. Врачам-радиологам, например, не рекомендуется вступать в брак с лицами аналогичной профессии.

Более жестко эти вопросы поставлены в последних публикациях МКРЗ, которая настаивает на полном прекращении сверхфоновое облучения населения и устранения из норм самого понятия «Лица категории Б». Но, к сожалению, на практике это неосуществимо, особенно в настоящее время в нашей стране.

Очень важна достоверная информация населения о размерах радиационной опасности, методах снижения риска облучения, поскольку этот фактор, в отличие от других, неосязаем. И превышение, и занижение риска может привести только к отрицательным изменениям в состоянии здоровья, в том числе и к неадекватным нервно-психическим реакциям.

Любой облучаемый должен знать дозу облучения и вероятные реакции организма на нее. Любое облучение должно быть оправданным (либо «окупаемым»), добровольным. Окупаемость должна обосновываться и оговариваться в каждом конкретном случае облучения.

5.3. Нормы радиационной безопасности, принятые в России, и их оценка

Последние «Нормы радиационной безопасности» (НРБ-99) — (СП.2.6.2.758-99) приняты в качестве юридического документа в нашей стране в 1999 г. В них предусмотрены следующие основные принципы радиационной безопасности:

1) принцип нормирования — непревышение допустимых пределов индивидуальных доз облучения граждан от всех источников ионизирующего излучения;

2) принцип обоснования — запрещение всех видов деятельности по использованию источников ионизирующего излучения, при которых полученная для человека и общества польза не превышает риск возможного вреда, причиненного дополнительным к естественному радиационному фону облучения;

3) принцип оптимизации — поддержание на возможно низком и достижимом уровне индивидуальных доз облучения и числа облучаемых лиц при использовании любого источника ионизирующего излучения.

Нормы радиационной безопасности распространяются на следующие виды облучения персонала и населения:

при нормальной эксплуатации техногенных источников ионизирующего излучения;

в условиях радиационной аварии;

природными источниками ионизирующего излучения;

медицинское.

Требования по обеспечению радиационной безопасности сформулированы для каждого вида облучения. Суммарная доза от всех видов облучения служит только для оценки радиационной обстановки и медицинских последствий.

Требования НРБ-99 не распространяются на источники ионизирующего излучения, создающие годовую эффективную дозу не более 10 мкЗв и коллективную годовую дозу не более 1 чел-Зв при

любых условиях их использования, а также на космическое излучение на поверхности Земли и облучение, создаваемое ^{40}K , содержащимся в организме человека, на которые практически невозможно влиять.

Для количественной характеристики ионизирующей способности радиоактивного излучения в действующих ранее НРБ-96 использовалось понятие «экспозиционная доза». В последней редакции НРБ это понятие не применяется, соответственно не применяются и единицы его выражения (Кл/кг и рентген Р ($1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$)). В новых нормах для характеристики этого показателя используют понятие «поглощенная доза», т.е. величина энергии излучения, переданная единице массы облучаемого вещества. Поглощенная доза измеряется в джоулях, деленных на килограмм (Дж/кг), и имеет специальное название — грей (Гр). Используемая ранее внесистемная единица «рад» равна 0,01 Гр.

Установлено, что биологическое действие одинаковых поглощенных доз разного вида излучений (α , β , γ и др.) на организм неодинаково.

Эффект лучевого воздействия на организм зависит не только от поглощенной дозы и ее фракционирования во времени, но и в значительной степени от удельной ионизации данного вида излучения. Чем выше удельная ионизация, тем больше биологическое действие такого излучения, тем больше взвешивающий коэффициент данного вида излучения. Взвешивающий коэффициент показывает, во сколько раз биологическое действие данного вида излучения больше, чем β -, γ - или рентгеновского излучения, при одинаковой поглощенной дозе.

Взвешивающие коэффициенты для тканей и органов при расчете эффективной дозы:

Гонады	0,20
Костный мозг (красный)	0,12
Толстый кишечник	
(прямая, сигмовидная и нисходящая кишки)	0,12
Легкие	0,12
Желудок	0,12
Мочевой пузырь	0,05
Грудная железа	0,05
Печень	0,05
Пишeвод	0,05
Щитовидная железа	0,05
Кожа	0,01
Клетки костных поверхностей	0,01
Остальные (надпочечники, головной мозг, слепая, восходящая и поперечно-ободочная кишки, тонкий кишечник, почки, мышечная ткань, поджелудочная железа, селезенка, вилочковая железа, матка)	0,05

Для выработки общей основы, позволяющей сравнивать все виды ионизирующих излучений в отношении возможного возникновения вредных эффектов от облучения, вводится понятие «эквивалентная доза».

Эквивалентная доза равна произведению поглощенной дозы на взвешивающий коэффициент для данного вида излучения, равный, например, 1 — для рентгеновского, γ - и β -излучений, 20 — для α -излучения, т.е. при одной и той же поглощенной дозе биологическое действие α -излучения будет в 20 раз больше, чем рентгеновского, γ - или β -излучений.

Доза эквивалентная, или эффективная, — это доза, ожидаемая при внутреннем облучении, за время с момента поступления радиоактивных веществ в организм. Если это время не определено, то его следует принять равным 50 годам для взрослых и 7 — для детей.

Доза эффективная или эквивалентная годовая — сумма эффективной или эквивалентной дозы внешнего облучения, полученной за календарный год, и ожидаемой эффективной или эквивалентной дозы внутреннего облучения, обусловленной поступлением в организм радионуклидов за этот же год.

Эффективная доза (E) — мера риска возникновения отдаленных последствий облучения всего тела человека и отдельных его органов и тканей с учетом их радиочувствительности, равна сумме произведений эквивалентной дозы в органах и тканях на соответствующие взвешивающие коэффициенты.

Единица эффективной дозы — зиверт (Зв).

Взвешивающие коэффициенты для тканей и органов при расчете эффективной дозы используются для учета *различной чувствительности* разных органов и тканей в возникновении *стохастических (вероятностных) эффектов* радиации (генетические заболевания, злокачественные новообразования, лейкозы).

В основу различной радиочувствительности органов и тканей положен закон радиочувствительности Бергонье—Трибондо, по которому наиболее чувствительными к ионизирующему излучению являются наименее дифференцированные ткани, клетки которых интенсивно размножаются.

При воздействии на организм человека ионизирующая радиация может вызвать эффекты двух видов:

детерминированные пороговые эффекты (лучевая болезнь, лучевой дерматит, лучевая катаракта, лучевое бесплодие, аномалии развития плода и др.);

стохастические (вероятностные) беспороговые эффекты (злокачественные опухоли, лейкозы, наследственные болезни).

В проявлении ранних *детерминированных эффектов* характерна четкая зависимость от дозы облучения радиационных повреждений разной степени тяжести — от скрытых, т.е. незначительных, без клинических проявлений, до смертельных.

Так, клинически значимое подавление кроветворения при *остром облучении* наблюдается с порогом 0,15 Гр поглощенной дозы во всем красном костном мозге. Пороговая доза для лучевой катаракты 0,15 Гр/год. Радиационные поражения кожи легкой, средней и тяжелой степеней тяжести развиваются при местном облучении соответственно в дозах 8—10, 10—20, ≥ 30 Гр. Пороговая доза, вызывающая острую лучевую болезнь, 1 Гр. При дозах 3—5 Гр в результате повреждения стволовых клеток костного мозга 50 % облученных могут погибнуть (без лечения) в течение 60 сут. При дозах > 15 Гр летальный исход у всех облученных наступает в течение 5 сут.

Эффективность *хронического облучения* также зависит от мощности дозы. Например, доза облучения персонала 5 мЗв/год не позволяет выявить повреждений с помощью современных методов исследования.

Доза хронического облучения в течение нескольких лет 100 мЗв/год вызывает снижение неспецифической резистентности организма, а 500 мЗв/год может привести к развитию хронической лучевой болезни.

Таким образом, доказан и существует дозовый порог проявления детерминированных эффектов, которые, как правило, возникают при значительных дозах облучения, в основном вследствие гибели части клеток в поврежденных органах или тканях.

Не существует дозового порога *стохастических (вероятностных) эффектов*. Это означает, что возникновение стохастических эффектов теоретически возможно при сколь угодно малой дозе облучения. Величина дозы ионизирующего излучения влияет на вероятность стохастических эффектов, но не на тяжесть их. То есть чем выше доза облучения, тем больше частота (вероятность) случаев проявления раковых заболеваний или наследственных дефектов в популяции людей, в том числе у каждого индивидуума.

Очень важно специальное понятие «коллективная доза облучения» — произведение двух величин: средней эффективной индивидуальной дозы в облученной когорте и численности людей, которые подверглись облучению. Обозначается коллективная доза в человеко-зивертах или человеко-греях (чел-Зв; чел-Гр).

Из определения коллективной дозы следует, что эта величина возрастает не только при увеличении индивидуальных доз, но и при увеличении числа облученных людей. При этом вероятность риска (частота стохастических эффектов) будет также возрастать.

Расчеты показывают, что при коллективной дозе облучения 1000 чел-Зв можно ожидать возникновения 60 злокачественных опухолей (излечимых и со смертельным исходом) в каждой из популяций людей.

Ограничение возникновения именно этих вероятностных эффектов после воздействия радиации является медико-гигиенической основой радиационной защиты и регламентации пределов доз облучения.

Исходя из того, что постулируется сугубо научное положение о том, что любая доза облучения в принципе опасна (беспороговое действие), общество обязано установить и принять *величину приемлемого риска* от дополнительного антропогенного радиационного воздействия на население и отдельных его членов. При этом в качестве главной цели следует добиваться того, чтобы уменьшить риск облучения отдельных лиц и населения в целом. Нужно стремиться к достижению минимально низких уровней облучения, достижимых с учетом экономических и социальных факторов (ведь следует признать, что современное общество без рисков является утопией: все виды человеческой деятельности или отсутствие таковой сопряжены с некоторым риском).

Последнее фундаментальное положение, лежащее в основе регламентации радиационного фактора, состоит в том, что предотвращение данного риска (на фоне химических, биологических и др.) может дискриминировать значимость другого вида риска, объективно определяющего гораздо больший ущерб общественному здоровью и отдельному индивидууму.

Нормами радиационной безопасности устанавливаются следующие группы облучаемых лиц:

группа А — персонал (лица, работающие с техногенными источниками излучения);

группа Б — лица из персонала, находящиеся по условиям работы в сфере воздействия техногенных источников излучения;

все население, включая лиц из персонала вне сферы и условий их производственной деятельности.

Для категорий облучаемых лиц устанавливаются три класса нормативов:

I — основные пределы доз (ПД);

II — допустимые уровни монофакторного воздействия (для одного радионуклида, пути поступления или одного вида внешнего излучения), являющиеся производными от основных пределов доз: пределы годового поступления (ПГП),

допустимые среднегодовые объемные активности (ДОВА), среднегодовые удельные активности (ДУА) и др.;

III — контрольные уровни. Речь идет о предельно допустимых выбросах (ПДВ) в атмосферу, предельно-допустимых сбросах (ПДС) отходов.

Основные пределы доз. Предел дозы (ПД) — это величина годовой эффективной или эквивалентной дозы техногенного облучения, которая не должна превышать в условиях нормаль-

ной работы. Соблюдение предела годовой дозы предотвращает возникновение детерминированных эффектов, при этом вероятность стохастических эффектов сохраняется на приемлемом уровне.

Допускается одновременное облучение до указанных пределов по всем нормируемым величинам.

Основные пределы доз (НРБ-99):

	Персонал (группа А)	Персонал (группа Б)	Население
Эффективная доза (в среднем за любые последовательные 5 лет), мЗв/год	20 (≤ 50)	5 ($\leq 12,5$)	1 (≤ 5)
Эквивалентная доза, мЗв/год:			
в хрусталике глаза	150	37,5	15
в коже	500	125	50
в кистях и стопах	500	125	50

Основные пределы доз облучения не включают дозы природного и медицинского облучения, а также вследствие радиационных аварий. На эти виды облучения устанавливаются специальные ограничения.

При одновременном воздействии на человека источников внешнего и внутреннего облучения годовая эффективная доза не должна превышать основных пределов доз.

Для женщин в возрасте до 45 лет, работающих с ионизирующими 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 0,05 предела годового поступления для персонала. В документе отмечено, что администрация предприятия обязана перевести беременную женщину на работу, не связанную с источниками ионизирующего излучения, со дня информации о факте беременности до окончания грудного вскармливания ребенка.

Планируемое повышенное облучение при ликвидации аварии выше установленных дозовых пределов может быть разрешено только в тех случаях, когда нет возможности принять меры, исключающие их превышение, и может быть оправданно только спасением жизни, предотвращением дальнейшего развития аварии и облучения большого количества людей. Планируемое повышенное облучение допускается только для мужчин старше 30 лет при их добровольном письменном согласии, знании возможных доз облучения и о риске для здоровья.

Планируемое повышенное облучение в дозе не более 100 мЗв/год допускается с разрешения территориальных органов госсан-

эпиднадзора, а облучение в дозе ≤ 200 мЗв год — только с разрешения Госсанэпиднадзора Министерства здравоохранения России.

Для студентов и учащихся старше 16 лет, проходящих профессиональное обучение с использованием источников излучения, годовые дозы не должны превышать значений, установленных для персонала группы Б.

Производный от основных пределов доз норматив — *предел годового поступления (ПГП)*, измеряемый в беккерелях в год — допустимый уровень поступления данного радионуклида в организм в течение года, который при монофакторном воздействии приводит к облучению условного человека ожидаемой дозой, равной соответствующему пределу годовой дозы.

Нормируются разные значения ПГП: в зависимости от радионуклида, для персонала (в воздухе рабочих помещений), для населения (в атмосферном воздухе, а также в воде и пище).

ПГП зависит в том числе от степени опасности радиоактивных элементов при попадании внутрь и определяется их *радиотоксичностью* — свойством радиоактивных изотопов вызывать большие или меньшие патологические изменения при попадании их в организм.

Среднегодовые допустимые объемные активности (ДОА), Бк/м³, отдельных радионуклидов для воздуха и уровни вмешательства (УВ), Бк/кг, для воды и пищи вычисляются как отношение ПГП радионуклида к объему (V) воздуха и массы воды (M), с которыми радионуклид поступает в организм человека на протяжении календарного года. ДОА выражается:

Для персонала:

объем вдыхаемого воздуха $2,4 \cdot 10^3$ м³/год,
время работы для персонала 1700 ч/год,
масса потребляемой воды равна нулю.

Для населения:

объем вдыхаемого воздуха — в зависимости от возраста,
время возможного поступления в организм радионуклида 8800 ч/год (примерно 365 дней),
масса потребляемой воды 730 кг/год (для взрослых).

Возможное поступление радионуклидов с пищей рассчитывают исходя из местных статистических данных о годовом потреблении отдельных пищевых продуктов при оценке по ПГП или сравнивают с УВ.

В решении проблемы защиты персонала от воздействия ионизирующих излучений важное место занимают вопросы ограничения загрязнения радионуклидами рабочих поверхностей, кожи, спецодежды и т.д.

Для контроля за таким загрязнением вводится *допустимый уровень общего радиоактивного загрязнения*, число частиц/(мин · см²).

Допустимые уровни общего радиоактивного загрязнения рабочих поверхностей, кожи (в течение рабочей смены), спецодежды и средств индивидуальной защиты, число частиц/(мин · см²):

Активные нуклиды	α -*	β -
Неповрежденная кожа, спецбелье, полотенца, внутренняя поверхность лицевых частей средств индивидуальной защиты 2 (2)		200
Основная спецодежда, внутренняя поверхность дополнительных средств индивидуальной защиты, наружная поверхность спецобуви 5 (20)		2000
Поверхность помещений постоянного пребывания персонала и находящегося в них оборудования 5 (20)		2000
Поверхность помещений периодического пребывания персонала и находящегося в них оборудования 50 (200)		10 000
Наружная поверхность дополнительных средств индивидуальной защиты, снимаемой в саншлюзах 50 (200)		10 000

* Отдельные (прочие).

Источники ионизирующих излучений, воздействующих на человека, могут быть либо открытыми, либо закрытыми.

Радионуклиды, которые могут загрязнять внешнюю среду и попадать с вдыхаемым воздухом, пищей и водой, а также через кожу внутрь организма, называются *открытыми* (пары, газы, жидкости и порошки). Они, как правило, вызывают *внутреннее облучение*.

Для определения необходимости организации защиты и проведения мероприятий по деконтаминации объектов окружающей среды они должны подвергаться радиометрическому исследованию и санитарной оценке степени загрязнения радионуклидами на основании допустимых уровней — ДОО или ДУА (допустимых удельных активностей).

Оценка соответствия суммарных лучевых нагрузок населения НРБ-99 представляет серьезную проблему вследствие чрезвычайной вариабельности радиоактивности среды (почв, строительных материалов жилья, продуктов и состава питания). Ориентировочно оценить дозу внешнего облучения от почв цезием (гамма-излучатель) можно по формуле

$$D_0 = 2A,$$

где D_0 — мощность экспозиционной дозы от гамма-активных излучателей (строительных материалов), мкР, (мкбэр)/ч; A — активность, Ки/км².

Таблица 5.2

Временная допустимая радиоактивность пищевых продуктов и питьевой воды, вводимая в аварийных ситуациях, Ки/кг, Ки/л

Продукт	Удельная активность	Контрольные ВДУ-91
Вода питьевая	$50,0 \cdot 10^{10}$	$10,0 \cdot 10^{10}$
Молоко, сметана, творог, сыр, сливочное масло	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-8}$
Молоко сгущенное	$3,0 \cdot 10^{-8}$	$3,0 \cdot 10^{-8}$
Молоко сухое	$5,0 \cdot 10^{-8}$	$5,0 \cdot 10^{-8}$
Мясо (говядина, свинина, баранина), птица, рыба, мясные и рыбные продукты	$2,0 \cdot 10^{-8}$	$2,0 \cdot 10^{-8}$
Жиры растительные и животные, маргарин	$5,0 \cdot 10^{-9}$	$1,0 \cdot 10^{-9}$
Картофель, корнеплоды, овощи, столовая зелень, фрукты, ягоды (отмытые от почвенных частиц), консервированные фрукты, ягоды, мед	$1,6 \cdot 10^{-8}$	$2,0 \cdot 10^{-9}$
Хлеб и хлебобулочные изделия	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$5,0 \cdot 10^{-9}$
Свежие дикорастущие грибы, ягоды (отмытые от почвенных частиц)	$4,0 \cdot 10^{-8}$	$4,0 \cdot 10^{-8}$
Сушеные грибы и дикорастущие ягоды, чай	$2,0 \cdot 10^{-7}$	$2,0 \cdot 10^{-7}$
Продукты детского питания	$5,0 \cdot 10^{-9}$	$1,0 \cdot 10^{-9}$
Лекарственные растения	$2,0 \cdot 10^{-8}$	$2,0 \cdot 10^{-7}$

Например, при радиоактивной загрязненности почв 15 Ки/км^2 одночасовое пребывание на открытом воздухе ведет к формированию 30 мкР . В год, при таких условиях, при ежедневном пребывании на открытом воздухе в течение 5 ч будет накапливаться доза $0,1 \text{ Р}$ (бэр) — величина, не превышающая допустимую в пересчете на предел дозы для населения в миллизивертах.

Более сложна оценка внутреннего облучения — от источников, попавших в организм с аэрозолями, продуктами питания (основной путь), водой. Скорость выведения, места наибольшего накопления в организме, скорость и энергия распада чрезвычайно различны (см. табл. 1.11). Для крайне приближенной оценки дозы можно использовать формулу

$$D_n = 73,8 E_{cp} T_{эфф} g/m,$$

где E_{cp} — энергия распада оцениваемого радионуклида; $T_{эф}$ — время двукратного снижения радиоактивности в организме; g — накопленная поступившая в организм радиоактивность; m — масса органа (тела), накапливающего радионуклид.

В случае аварийных ситуаций может вводиться понятие временно допустимого уровня (ВДУ). В табл. 5.2 приведены его значения, установленные для территорий, пострадавших от Чернобыльской аварии.

5.4. Экологическое нормирование радиационных воздействий

Сложившиеся радиационно-гигиенические принципы нормирования антропогенного загрязнения среды недостаточно полны вследствие незначительного накопленного материала «радиационных стрессов», экосистем и отсутствия теоретических разработок такого ряда. Установление ПДК радиоактивных веществ, ВДУ радиоактивных загрязнений среды проводится с учетом накопленных доз и оценок радиационной безопасности человека, без учета общих циклов метаболизма радионуклидов в звеньях миграции, трофических экосистемных связей и последующих косвенных (опосредованных) реакций на радиоактивную загрязненность среды. Несмотря на доказанную (см. п. 4.3) радиорезистентность природных сообществ в эксперименте, такие исследования крайне необходимы, поскольку в структуре цепей миграции радионуклидов в биогеоценозах неизбежно выявление критических звеньев с большей выраженностью радиогенных реакций, как в сторону стимула (микрофлоры, например), так и подавления функций, с последующей труднопредсказуемой цепью изменений симбиотических связей и нежелательных последствий. Уменьшение видового разнообразия животных отмечалось при довольно низких (2—5 рад/сут) уровнях радиационных воздействий. Некоторые устойчивые лесные деревья выживали при довольно высоких (10—40 рад/сут) дозах облучения. При этом растительность была угнетена в росте и очень восприимчива к насекомым и болезням. Так, на второй год после облучения дозой (0,1 Гр/сут) сосново-дубового леса произошла 200-кратная вспышка численности дубовой тли.

Существующие нормы содержания радионуклидов ядерно-энергетического происхождения в среде, растительности, организмах животных рассматриваются как пределы радиоактивности звеньев миграции фактора с целью оценки риска накопления в «конечном» с позиций радиационной гигиены звене — организме человека. Считается, что вследствие многотрофности, максимальной по сравнению с другими составляющими экосистем внекон-

курентной функциональной активности человек является ведущим кумулятором радиационного фактора. Однако реальные накопленные дозы внутреннего облучения от новейших цезий-стронциевых метаболитов среды нередко указывают на обратное.

Накапливаемая деревьями (особенно елью, сосной и пихтой) радиоактивность в 20 раз превышает накопление фактора организмом человека, достигая 0,5 Гр при прочих равных условиях. По всей вероятности, именно эта неучтенная особенность радиационного метаболизма и кумуляции радионуклидов лежит в основе болезненности лесов, прилегающих к АЭС в непосредственной близости от промышленных центров Европы, США (см. п. 4.3). Значительно превышаются антропогенные и лучевые нагрузки на сельскохозяйственные зерновые, особенно в период интенсивного роста растений. Радиоактивность зерна достигает 3—7 Гр — доз, явно превышающих границы гормезисных реакций и ведущих к подавлению созревания, резкому росту числа мутаций и накоплению неблагоприятного генетического груза выращиваемых культур. На территориях регулярного загрязнения среды, ведущего к формированию лучевых нагрузок у человека порядка 0,5—3 сЗв/год, облучение популяций трав достигает 50—300 сЗв. При этом у коров при их выпасе на таких территориях развивается хроническая лучевая болезнь, сопровождающаяся резким, на 25—50 %, снижением лактации.

Причины таких различий разнообразны. Мощный вклад в снижение лучевых нагрузок на человека вносит настороженность населения, разработка комплекса мероприятий по предупреждению поступления радионуклидов в организм человека при отсутствии таких мер в экосистемах в целом. Не менее важна и недостаточность накопленных данных об особенностях метаболизма в звеньях экосистем, различий трофических цепей, рационов, структуры питания. Разнотипность рационов человека и животных приводит и к соответствующим различиям лучевых нагрузок. Примером могут служить олени, основной корм которых — лишайник — является мощным кумулятором стронция, загрязняющего эти районы от экспериментальных ядерных взрывов. Несмотря на то, что конечной цепью миграции этого радионуклида является человек (потребляющий оленину), дозы облучения костной и кроветворной ткани оленей превышают аналогичные лучевые нагрузки на человека в два раза.

Приведенные примеры показывают, что в ряде экологических ситуаций растительность, определенные группы животных становятся критическими, по накоплению фактора, звеньями экосистем, что может служить основой их инволюции, патологической деформации биоценозов и его звеньев.

Сравнивая радиационно-гигиенические нормативы с радиационно-экологическими, следует иметь в виду, что при разработке

антропогенных пределов радиационных воздействий в них закладывается высокий коэффициент запаса: доза, вызывающая непосредственные соматические радиогенные реакции у человека, в 100--1000 раз выше принятых ПДД. Подобные экологические разработки, указывающие на размеры «радиологической емкости» экосистем, с учетом климатических, эндемических характеристик, видового разнообразия биоценозов отсутствуют. Разработка экологических норм радиационных воздействий остается одной из нерешенных проблем.

Вопросы для самоконтроля

1. Как исторически сложилось нормирование радиационных воздействий?
2. Каковы теоретические представления о пределах радиационной безопасности?
3. Перечислите нормы радиационной безопасности.
4. Расскажите об экологическом нормировании радиационных воздействий.

РАДИАЦИОННО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ, ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И ПРОФИЛАКТИКА ПОСЛЕДСТВИЙ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ СРЕДЫ

Эксплуатация источников ионизирующих излучений, и особенно, ядерно-энергетических установок, ведет к неизбежному риску аварий и последующего радиоактивного загрязнения среды. Для принятия экстренных мер по профилактике последствий, прогнозированию таких инцидентов национальными и международными организациями по радиационной защите (НКДАР, МАГАТЭ, ООН, МКРЗ, НКРЗ) разработаны организационные и методические аспекты предпринимаемых действий с учетом характера радиоактивных загрязнений, мощности выброса радионуклидов в окружающую среду, площади радиоактивных загрязнений. Радиационные аварии по степени потенциальной опасности подразделяются на уровни (шкала аварий).

6.1. Организация мер по профилактике последствий радиоактивного загрязнения среды в случае радиационных аварий

Согласно современным нормативным документам, радиационная авария — потеря управления источником ионизирующего излучения (реактором), вызванная неисправностью оборудования, стихийными бедствиями или иными причинами, которые могли привести или привели к незапланированному радиоактивному загрязнению среды и облучению людей. Наибольшую экологическую опасность — массивное загрязнение среды — представляют аварии на энергетических ядерных реакторах АЭС (табл. 6.1), хранилищах ядерных установок.

Общее число таких аварий приближается к нескольким десяткам, но к авариям глобального уровня (гл. 2), увеличившим радиационные воздействия на всех жителей северного полушария в полтора-два раза, относится только чернобыльская. Расчетная коллективная доза населения планеты от аварии на Чернобыльской АЭС оценивается в 600 000 чел.-Зв, из которых 53 % падает на страны

Таблица 6.1

Международная шкала аварий на АЭС

Уровень	Авария или происшествие	Критерий	Пример
<i>Аварии</i>			
VII	Глобальная	Выброс в окружающую среду большей части радиоактивных продуктов, накопленных в активной зоне, в результате которого будут превышены дозовые пределы для проектных аварий* ¹ . Возможны острые лучевые поражения. Длительное воздействие на здоровье населения, проживающего на большой территории, включающей более чем одну страну	Чернобыль, СССР, 1986
VI	Тяжелая	Выброс в окружающую среду большого количества радиоактивных продуктов, накопленных в активной зоне, в результате которого дозовые пределы для проектных аварий* ¹ будут превышены, а для запроектных — нет. Для ослабления серьезного влияния на здоровье населения необходимо введение планов мероприятий по защите персонала и населения в случае аварий в зоне радиусом 25 км, включающих эвакуацию населения	Уинд-скейл, Великобритания, 1957
V	С риском для окружающей среды	Выброс в окружающую среду такого количества продуктов деления, который приводит к незначительному повышению дозовых пределов для проектных аварий* ² и радиационно эквивалентных выбросов порядка сотни ТБк [31]. Разрушение большей части активной зоны, вызванное механическим воздействием или плавлением с превышением максимального проектного предела повреждения твэлов. В некоторых случаях требуется частичное введение планов мероприятий по защите персонала и населения в случае аварий (местная иодная профилактика и (или) частичная эвакуация) для уменьшения влияния облучения на здоровье населения	Три-Майл-Айленд, США, 1979

IV	В пределах АЭС	Выброс радиоактивных продуктов в окружающую среду в количестве, превышающем значения для урана III, который привел к переоблучению части персонала, но в результате которого не будут превышены дозовые пределы для населения* ² . Однако требуется контроль продуктов питания населения	Сант-Лаурент, Франция, 1980
<i>Происшествия</i>			
III-1	Серьезной, средней и незначительной тяжести	Выброс в окружающую среду радиоактивных продуктов выше допустимого суточного, но не превышающий 5-кратного допустимого суточного выброса газодисперсных летучих радиоактивных продуктов и аэрозолей. Отказы оборудования или отклонения от нормальной эксплуатации, которые не влияют непосредственно на безопасность станции, но способны привести к значительной переоценке мер по безопасности. Функциональные отклонения в управлении, которые не представляют какого-нибудь риска, но указывают на недостатки в обеспечении безопасности	

Примечания:

*¹ После дозовым пределом для аварийных ситуаций понимают непревышение дозы внешнего облучения 0,1 Зв (10 бэр) и внутреннего облучения щитовидной железы 0,3 Зв (30 бэр) за первый год после аварии.

*² При аварийных авариях дозы на границе санитарно-защитной зоны и за ее пределами не должны превышать 0,1 Зв (10 бэр) на все тело и 0,3 Зв (30 бэр) на щитовидную железу за первый год после аварии.

Европы, 36 — на Россию и страны бывшего СССР, 8 — на Азию, 2 — на Африку, 0,3 % — на страны Америки. Уровни радиоактивного загрязнения в результате аварии на Чернобыльской АЭС наиболее пострадавших территорий России представлены на рис. 6.1.

Разработка и совершенствование мероприятий по ликвидации последствий аварии является наиболее сложной проблемой. Решение ее основывается на многолетнем опыте по изучению закономерностей формирования лучевых нагрузок на население, экосистему и ее составляющие с учетом характера миграции радионуклидов, зависимостей доза — эффект.

На основании накопленного опыта с учетом рекомендаций МКРЗ, ВОЗ предполагается радиационно-экологическая подготовка населения, проживающего в непосредственной близости от АЭС, ядерных хранилищ. Население и администрация территорий должны знать схему простых и четких действий на случай аварии.

Радиационно-защитные мероприятия подразделяются на три последовательных этапа:

начальный, в период угрозы и первые часы выброса радионуклидов в окружающую среду;

первичный, ликвидации последствий аварии, в условиях состоявшегося выброса и осаднения радионуклидов на землю;

проведения и завершения работ по ликвидации аварии и ее последствий.

Действия в период угрозы и на протяжении первых часов от момента аварии должны включать:

экстренное оповещение работников аварийного объекта и находящихся вблизи предприятий, жителей прилегающих территорий, администрации, МЧС России, Госкомприроды о потенциальной либо состоявшейся опасности радиоактивного загрязнения среды;

проведение анализа радиоактивного состава загрязнений, высоты газоаэрозольного выброса, направления и скорости его перемещения, прогноза развития радиационной обстановки на территориях риска радиационных загрязнений среды;

предупреждение населения и администрации территорий повышенного радиационного риска о возможных последствиях с целью подготовки к принятию мер радиационной защиты.

Второй этап первичной ликвидации последствий аварии должен включать:

обязательный радиационно-дозиметрический контроль за состоянием среды и территорий повышенного радиационного риска;

первичные меры защиты, исключаяющие выход населения из жилищ, мест работы, герметизацию и влажную уборку, вытяжную вентиляцию с целью предупреждения проникновения и осаднения аэрозолей внутри помещений;

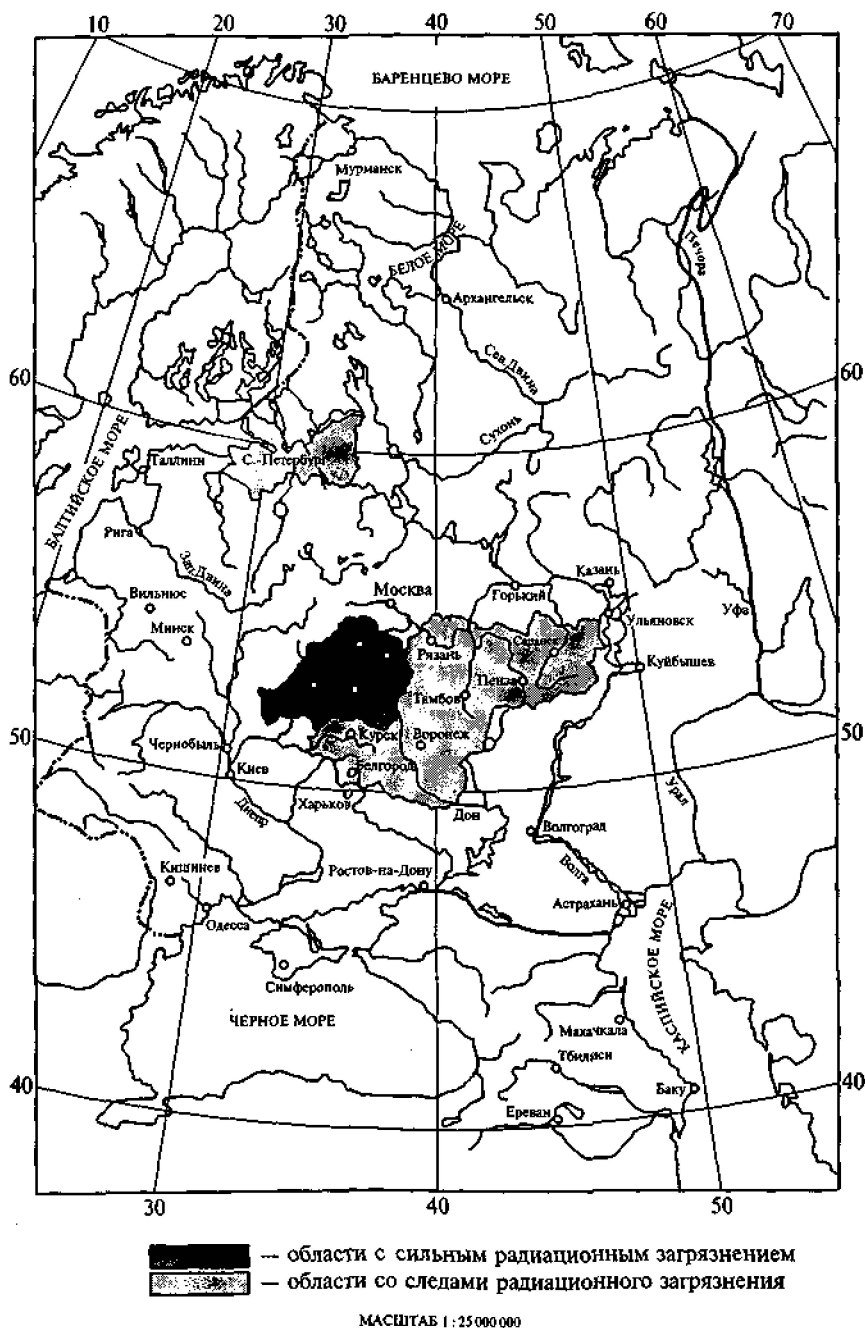


Рис. 6.1. Радиоактивная загрязненность России от аварии на Чернобыльской АЭС

организацию приема йодида калия для профилактики поражений щитовидной железы радиоактивным йодом.

Третий этап проводится после выпадений радиоактивных осадков и строится с учетом степени радиационного загрязнения среды и расчетных лучевых нагрузок на население (см. п. 5.3).

Территории (и комплекс проводимых мероприятий) подразделяются (НРБ-99) на зоны:

радиационного контроля — лучевые нагрузки на население от 1 до 5 мЗв (0,1 — 0,5 бэр). Проводится слежение за радиоактивностью среды, пищевых продуктов, лучевыми нагрузками на жителей. Указывается возможный ущерб здоровью и комплекс мероприятий по снижению доз и профилактики последствий радиационных нагрузок (гл. 7);

ограниченного проживания — лучевые нагрузки от 5 до 20 мЗв. Проводятся активные меры по снижению риска поступления радионуклидов в организм с пищевыми продуктами, водой (радиационный контроль). Лицам, проживающим и выезжающим на территории, разъясняется риск вероятного ущерба здоровью от радиационных воздействий;

добровольного отселения — лучевые нагрузки от 20 до 50 мЗв. Постоянное слежение за радиационными нагрузками на население (дозиметрия), радиоактивностью среды, продуктов питания. Проводятся необходимые меры медицинской радиационной защиты (гл. 7). Для лиц репродуктивного возраста, детей организуется периодический отдых с выездом на нерадиоактивные территории. Въезд на территорию для постоянного жительства запрещен;

отчуждения — лучевые нагрузки > 50 мЗв. Постоянное проживание на них не допускается. На территориях отселения и отчуждения вводится ограничение (запрещение) на использование лесных массивов, водоемов, древесины, торфа и др. Вводятся изменения в технологию производства и переработки сельскохозяйственной продукции либо запрет на ее производство (п. 6.2). Сельскохозяйственные животные переводятся на стойловое содержание с использованием комплекса радиозащитных мер. Разрабатывается и осуществляется комплекс мероприятий по ликвидации последствий аварии, к числу которых относятся, прежде всего, меры по дезактивации территорий.

6.2. Дезактивация радиоактивных территорий и построение мер реабилитации агроценозов (на примере аварии на Чернобыльской АЭС)

Период естественного полуочищения почв, загрязненных радионуклидами ядерно-энергетического происхождения, составляет 129 — 275 лет, что с учетом экспоненты процесса предполагает пол-

ное исключение фактора из состава среды через 1500—2000 лет, не менее. Поэтому при радиоактивной загрязненности среды, превышающей пределы допустимого радиационно-экологического риска (см. п. 5.4), необходимо активное искусственное вмешательство в процесс — дезактивация радиоактивных территорий.

Различают полную и частичную дезактивацию среды. *Полная дезактивация* — комплекс мероприятий, исключающих радиационный фактор из состава среды и его вторичное включение в экосистемный метаболизм; *частичная дезактивация* — временное исключение либо подавление процесса поступления радиационного фактора в звенья экосистемного метаболизма, ведущее к снижению его накопления, в организме жителей радиоактивных территорий, в конечной сельскохозяйственной продукции до допустимых величин.

Полная дезактивация радиоактивных территорий предполагает снятие верхних слоев почв после радиационных осадений до глубины 10—15 см с последующим захоронением срезов в могильниках для радиоактивных отходов. После аварии на Чернобыльской АЭС такая дезактивация была предпринята в 600 населенных пунктах на территории общей площадью 7000 км². Около 50 % загрязненных территорий дезактивировались дважды, как правило, вследствие повторного загрязнения после выпадения осадков, смылов радиоактивности с загрязненных срезов либо недезактивированных территорий, располагавшихся в непосредственной близости и на более высоком уровне относительно объектов дезактивации — детских садов, школ, больниц, предприятий, общественных учреждений. Мощность дозы (контролировалась по γ -излучению) после таких чрезвычайно дорогостоящих мер снижалась в 3—4 раза. В качестве экранов, поглощающих потоки ионизирующих излучений от загрязненных почв (*защита экранированием*), дезактивированные поверхности застилалась гравием, песком, наносился асфальт, что вело к 10-кратному снижению мощности дозы. Экранированием (гравием, асфальтом либо пластиковыми покрытиями) были защищены 25 000 км дорог. В целом было дезактивировано около 7000 домов и учреждений, снято 200 000 м³ почв. Эффект тем не менее оказался крайне незначительным вследствие отсутствия могильников для захоронения радиоактивных срезов, громадной площади недезактивированных территорий, отсутствия инженерных сооружений для сбора сточных вод и отведения радиоактивных дождевых смылов от дезактивированных территорий.

Частичная дезактивация с целью фиксации радиоактивного загрязнения в зонах отчуждения и предупреждения волной, воздушной (выветриванием) миграции радионуклидов на территории с допустимыми значениями фактора осуществляется *биологическим методом*. Высеивание многолетних трав на загрязненные

почвы ведет к эффективному «вытягиванию» радионуклидов мощной корневой системой растений из почв. Скашивание и в последующем сжигание таких трав, захоронение незначительных объемов радиоактивной золы оказалось наиболее эффективным методом как *локализации* (фиксации радиоактивности корневой системой трав), так и дезактивации наиболее массивных радиоактивных загрязнений среды.

В зонах ограниченного проживания, добровольного отселения радиоактивные территории сельскохозяйственных угодий достигают 30 % (табл. 6.2).

Не менее эффективным оказался *механический метод частичной дезактивации* — *глубокое вспахивание* загрязненных полей с целью захоронения основной доли радионуклидов механическим перемещением из активного гумусового горизонта трав, сельскохозяйственных культур (картофеля, зерновых) в более глубокие нерадиоактивные почвенные слои и прерыванием тем самым (гл. 3) активной экосистемной миграции радионуклидов. Методика «обмена» радиоактивных слоев почв на нерадиоактивные отрабатывалась в центрах НИИ «Агрохимрадиология», на радиоактивных территориях Брянской, Калужской, Орловской, Тульской областей. Полученные результаты указывают на эффективность метода (радиоактивность активного гумусового горизонта снижена в 20—40 раз), его простоту и приемлемость в сельскохозяйственной практике.

Перераспределение радиоактивности почвенных слоев после глубокого вспахивания полей (плугом ПНС-4-40):

h пробы, см	0—5	5	10	10—15	15—20	20—30	30—40	40—60
Загрязненность по ^{137}Cs								
до/после вспахивания	25,5/0,3	2,1/0,6	0,8/0,6	0,3/0,1	0,3/0,8	0,2/14,8	0,1/27,6	

Дезактивация дополняется эффективной *конкурентной защитой* — блокадой миграции радионуклидов введением в почву аналогов их метаболизма, калия, кальция. Наибольшим эффект снижения уровня радиоактивной загрязненности урожая оказался при избыточном совместном внесении в почву извести, калийных удобрений (200—300 кг/га раз в 3—4 года) — в сочетании с органическими удобрениями и навозом. Раздельное внесение протекторов-конкурентов в тех же количествах не приводит к аналогичным реакциям блокады транспорта радионуклидов в экосистемах. Комплексная обработка почв по конкурентному принципу снижает радиоактивность сельскохозяйственной продукции в 5—10 раз. Помимо конкурентной блокады миграции радионуклидов, такая обработка положительно меняет агрохимические свойства почв. Потенциал плодородия по трем минимизирующим свойствам —

почвенной кислотности, содержанию обменного калия, фосфора возрастает в 1,6—1,4 раза. Обработка ведет и к образованию сложных нерастворимых соединений со стронцием, резко снижая его поступление в продукты питания, организм.

Таблица 6.2

Загрязнение почв сельскохозяйственных угодий ^{137}Cs в результате чернойбыльской катастрофы

Территория загрязнения	Загрязнено сельскохозяйственных угодий					
	Всего		В том числе по группам загрязнения, Ки/км ²			
	тыс.га	%	1—5	5—15	15—40	> 40
Брянская область:	700,9	37,3	401,2	185,1	97,5	17,1
пашня	483,0	36,5	290,3	130,5	55,0	7,2
сенокосы и пастбища	217,9	39,1	110,9	54,6	42,5	9,9
Калужская область:	145,5	10,8	111,7	33,1	0,7	—
пашня	94,6	9,6	74,5	21,7	0,2	—
сенокосы и пастбища	49,1	13,5	37,2	11,4	0,5	—
Тульская область:	870,2	45,1	756,0	113,7	0,5	—
пашня	729,9	46,9	639,9	92,6	0,4	—
сенокосы и пастбища	140,3	37,5	119,1	21,1	0,1	—
Орловская область:	419,2	20,4	396,4	22,8	—	—
пашня	338,1	20,3	318,8	19,3	—	—
сенокосы и пастбища	81,1	20,8	77,6	3,5	—	—
Рязанская область	497,6	20,3	486,9	10,7	—	—
Белгородская »	110,9	5,3	110,9	—	—	—
Воронежская »	333,7	8,3	333,7	—	—	—
Курская »	117,8	4,9	117,8	—	—	—
Ленинградская »	37,64	4,8	37,6	0,04	—	—
Липецкая »	234,0	12,1	234,0	—	—	—
Мордовия	15,7	0,9	15,7	—	—	—
Пензенская область	47,8	1,6	47,8	—	—	—
Тамбовская »	56,6	2,1	56,6	—	—	—
Ульяновская »	16,0	0,7	16,0	—	—	—

**Влияние измененной кислотности почв на накопление ^{137}Cs
сельскохозяйственной продукцией**

рН почвы	Накопление радионуклидов			
	Молоко	Мясо	Пшеница	Трава
4,5—5,5	3,2	1,8	15—20	0,5
5,6—6,5	0,5	0,6	5—7	0,2
6,1—7,5	0,2	0,3	2	0,05

Немалое значение имеет и связанное с обработкой изменение рН обрабатываемых угодий, утрачивающее характерную для среднерусской полосы повышенную кислотность. Сдвиг ее в щелочную сторону ведет к резкому снижению захвата ^{137}Cs экологическими цепочками, продуктами питания (табл. 6.3).

Практика показывает (Г. Т. Воробьев, 1999), что почва является важнейшей барьерной системой защиты экосистем, выступая основным депо и чутким индикатором опасности радионуклидных и токсических загрязнений среды. Комплексная обработка почв, захоронение в них радионуклидов методом глубокой вспашки, внесение обменного калия, фосфора, кальция, органических удобрений, а затем посев трав переводят местность из радиоактивного в экологически безопасное состояние, перераспределяя и направляя радиоактивность по естественным почвенным каналам. Радиоактивность продуктов питания, выращенных на радиоактивных территориях, после обработки такого типа снижается в 15—20 раз, приближая радиоактивность почв к фоновым значениям фактора.

Ограничение поступления радионуклидов в организм сельскохозяйственных животных во многом дополняется сменой мест выпаса перед забоем с ориентацией на снижение активности цезия-137 в теле животного вдвое. С учетом экспоненты процесса срок выпаса на нерадиоактивных лугах либо в стойлах на привозном нерадиоактивном корме должен составлять не менее 3 мес. Критерием эффективности таких мер служат установленные в радиоактивных районах величины допустимой активности пищевых продуктов ВДУ (см. табл. 5.2).

6.3. Особенности построения радиационно-экологического контроля и профилактических мер при загрязнении лесных массивов и водоемов

Суммарная площадь лесов Украины, Беларуси, России, загрязненных от аварии на Чернобыльской АЭС, составляет 3,5 млн га.

Продолжительность периода лесной вертикальной миграции, перераспределяющей Cs — Sr-радиоизотопный состав с поверхностей загрязнений на глубину 10—15 см и включающей изотопы в активный метаболизм лесных биоценозов, составляет около 1 года для лиственных и около 3—5 лет для хвойных лесов. Основную часть радионуклидов забирает мелкая корневая система, расположенная на глубине до 15 см и выполняющая основную роль в обеспечении минерального питания леса. Наиболее активно здесь захватывается стронций, накапливающийся в последующем в стволах и крупных ветвях деревьев. Цезиевый метаболизм более динамичен. Изотоп включается в листву, формируя в последующем основную активность листового опада. В целом круговорот радионуклидов представляет многократно повторяющийся циклический процесс, стабилизирующийся спустя 4—5 лет в лиственных и 10—12 — в хвойных лесах после загрязнения среды.

Основная часть радионуклидов накапливается в лесной подстилке, являющейся кумулятором радиоактивного загрязнения леса. В листьях, хвое, мелких ветках, коре содержание радионуклидов в 10—100, в древесине, стволах, крупных ветвях — в 10 раз ниже по сравнению с предыдущей группой.

Особое место в лесных биоценозах занимает моховой покров и характерные для таких участков леса ягоды — брусника, морошка, клюква, а также грибы. Растительность мохового покрова перехватывает до 90 % поступающего с опадом и вымываемого ^{137}Cs (табл. 6.4). Методы по дезактивации леса отсутствуют.

В зависимости от плотности радиоактивного загрязнения выделено три зоны лесов: I — с плотностью загрязнения до 15 Ки/км² (85 % лесов); II — от 15 до 40 Ки/км² (4 %); III — свыше 40 Ки/км² (6 %). С 1987 г. в I и II зонах типовые реакции на внесение радиационного фактора (снижение численности грызунов, рост частоты мутаций) не регистрируется, отмечается прогрессирующий рост численности мелких грызунов. Однако радиоактивность лесной продукции во многих случаях превышает ВДУ, что требует профилактики радиационных воздействий посредством организации использования лесопродукции в условиях радиоактивного загрязнения среды, лесовосстановления, охраны и защиты.

Лесопользование — заготовка древесины и ее переработка, сбор ягод, лекарственных трав, охота — требует организации жесткого радиационного контроля с использованием методов биоиндикации радиационного фактора в сочетании с широкой оглаской радиационной обстановки в лесах.

Заготовка древесины связана с введением в сложившуюся систему существенных изменений, регламентирующих содержание цезия и стронция в почвах лесных предприятий (поквартальные замеры), организации и осуществления противопожарных работ

Таблица 6.4

Удельная суммарная радиоактивность элементов экосистем разных типов

Тип экосистемы	Экспозиция, мР/ч		Вид пробы	Удельная активность		Коэффициент накопления
	на почве	на высоте 1 м		кБк/кг	Ки/кг	
Сосняк: лишайниковый	91	65	Почва	3,1	$8,6 \cdot 10^{-8}$	
			Мхи	15,6	$4,2 \cdot 10^{-7}$	4,9
			Лишайник	31,8	$8,6 \cdot 10^{-7}$	10
			Гриб моховик	67,7	$1,8 \cdot 10^{-6}$	20,9
вересковый	117	78	Почва	1,5	$4,0 \cdot 10^{-7}$	0,6
			Вереск	8,8	$2,4 \cdot 10^{-7}$	0,45
			Гриб свинушка	6,8	$1,8 \cdot 10^{-7}$	0,9
			Гриб моховик	13,2	$3,5 \cdot 10^{-7}$	0,38
			Корневище калгана	5,7	$1,5 \cdot 10^{-7}$	
			Почва	25,8	$7 \cdot 10^{-7}$	
мшистый	136	103	Мхи	6,5	$1,7 \cdot 10^{-7}$	0,2
			Черный груздь	8,9	$2,4 \cdot 10^{-7}$	0,34
			Гриб моховик	81,1	$2,2 \cdot 10^{-6}$	3,1
черничный	143	114	Почва	2,2	$5,9 \cdot 10^{-8}$	
			Черника	4,1	$1,1 \cdot 10^{-7}$	1,9

овсяницевый	156	88	Черный груздь	22,3	$6,0 \cdot 10^{-7}$	10,2
			Почва	9,6	$2,6 \cdot 10^{-7}$	
Березняк:	159	110	Гриб рыжик	9,8	$3,7 \cdot 10^{-7}$	1,4
			Гриб польский	94,9	$2,5 \cdot 10^{-6}$	9,6
багульниково-сфагновый	66	53	Почва	1,5	$4,0 \cdot 10^{-7}$	
			Сфагновые мхи	10,1	$2,7 \cdot 10^{-7}$	0,68
тонкополевичный (злаковый) на плато	137	124	Багульник	36,6	$9,6 \cdot 10^{-7}$	2,4
			Клюква	6,5	$1,7 \cdot 10^{-7}$	0,25
Булавишневая ассоциация в верхней части склона	154	130	Гриб подберезовик	66,8	$1,8 \cdot 10^{-7}$	0,45
			Почва	10,0	$2,7 \cdot 10^{-7}$	2,3
Тонкополевичная ассоциация в нижней части склона	154	133	Гриб волнушка	23,1	$6,2 \cdot 10^{-7}$	
			Почва	10,7	$2,9 \cdot 10^{-7}$	
			Тмин песчаный	1,4	$3,8 \cdot 10^{-8}$	0,13
			Почва	13,8	$3,7 \cdot 10^{-7}$	
			Тмин	2,9	$7,8 \cdot 10^{-8}$	0,21

(пожары радиоактивных лесов эквивалентны крупной радиационной аварии), обеспечения безопасных условий труда (с учетом норм радиационной безопасности), контроля получаемой продукции.

Наибольшей радиоактивности достигает березовая древесина. Количество радионуклидов (в основном ^{90}Sr) в стволе березы возросло от второго года после аварии в 10 раз и стабилизировалось. Ожидается плавное снижение активности. Радиоактивность ствола березы в 2,5 раза (в среднем) выше, чем сосны, распределение внутри ствола (от периферии к центру) равномерное, без существенных различий радиоактивности годичных (в том числе и дочернобыльских) колец. Такие особенности транспорта, распределения, накопления радионуклидов (и минерального обмена в целом) внутри ствола ограничивают использование березовой древесины — только с территорий активностью не более 10—15 Ки/км² и, ограниченно, с территорий до 40 Ки/км².

Радиоактивность сосны при одинаковом содержании радионуклидов в лесных почвах в 2,5 раза ниже. Распределение излучателей внутри ствола неравномерно, в периферических годичных кольцах выше, чем в ядре, в 2—3 раза. При обработке и использовании материала необходимо учитывать особенности распределения: кора, горбыль радиоактивнее стволового распильного материала в несколько раз. Древесина сосны может использоваться без ограничения из лесов I и II зон. Накопление радиоактивности другими видами древесины распределяется в убывающем порядке: береза, дуб, осина, ольха, сосна.

Из недревесных продуктов леса наиболее опасно лекарственное сырье при неконтролируемой заготовке. Наибольшее количество радионуклидов и, особенно стронция, накапливается в коре; цезия — в листе, кустарниках, травах. Мощным кумулятором радионуклидов являются грибы, радиоактивность которых достигает в среднем $(1 + 2) \cdot 10^{-7}$ Ки/кг сырой массы продукта, радиоактивность ягод колеблется в тех же пределах, но на порядок ниже.

Содержание ^{137}Cs в сырой массе лесопроductов юго-западных районов Брянской области, нКи/кг:

Травы	0,59
Сыроежки	0,31
Подберезовики	0,81
Грузди	1,44
Маслята	4,50
Моховики	8,61
Лишайник, мох	94,6

Загрязненность всех территорий, но особенно лесных массивов, отличается чрезвычайной пятнистостью. Поэтому радио-

активность собранной растительности может отличаться от приведенных средних значений в десятки раз. Из заготовок леса «чистых» территорий Брянской области (загрязненность до 5 Ки/км²) выбраковывается (по нормам ВДУ) от 30 до 50 % продукции. То же касается и продуктов лесной охоты, прежде всего травоядных (лося, косули, кабана). Радиоактивность мяса этих животных (численность которых стала расти, без выявления радиационно-зависимой миграции внутри биоценозов) превышает нормы ВДУ в сотни раз, что требует тщательного контроля продукции из лесных массивов любых зон при поставке ее на рынок.

Лесовосстановительные и лесопосевные работы проводятся на радиоактивных территориях с целью стабилизации почв, почвенного радиационного метаболизма и тем самым предупреждения массивной трудно предсказуемой миграции радиоактивности с водными стоками, ветром. Особое значение такие работы приобретают на песчаных почвах с радиоактивностью от 40 до 80 Ки/км² и выше, и особенно вблизи водоемов озер, рек. Проводится здесь, как правило, частая посадка смешанного типа с использованием биологически устойчивых древесных и кустарниковых пород, с запретом на последующее использование посадок и их продукции. За такими посадками не ухаживают. К требующим четкого планового проведения (выбора пород посадок, обработки почв, ухода) относятся восстановительные лесонасаждения на территориях вырубки леса с активностью до 40 Ки/км².

Работы по оптимизации радиационно-экологических ситуаций в лесах направлены на предупреждение в том числе и радиогенной патологии леса, предупреждение лесных пожаров. Леса I и II зон обследуют авиационной службой с периодическим (краткие командировки) уточнением службами межобластных станций защиты леса.

Особое внимание уделяется пожароопасности радиоактивных лесов в связи с высоким риском массивного повторного загрязнения среды от сгорания радиоактивных лесных массивов. В качестве профилактических мер используются законодательные областные запреты и ограничения на доступ населения в леса III и IV зон, автотранспортное движение по неплановым лесным дорогам. Вдоль разрешенных дорог создаются вспаханные (минерализированные) полосы шириной ≥ 3 м, устанавливаются знаки, запрещающие курение и использование открытого огня. Автотранспорт для лесных работ обеспечивается искрогасящими устройствами. В наиболее пожароопасных местах в лесах III зоны прокладываются сети минерализованных противопожарных полос внутри леса, по границам с сельскохозяйственными угодьями с обязательным перевспашиванием полос в пожароопасные периоды. Для слежения за противопожарным состоянием используют вышки, телекамеры, авиацию.

Радиогенные реакции лесных биоценозов контролируются подготавливаемыми специалистами (инженерами-патологами леса) с помощью биологической индикации радиоактивного загрязнения среды. С этой целью проводится радиометрия избирательных накопителей радионуклидов (мха, лишайника), подсчитывают число почвенных сапрофагов (мокриц, сухопутных моллюсков, избирательно накапливающих ^{90}Sr), сопоставляют получаемые данные с установившимися в дорадиационный период величинами, нормами для исследуемых биоценозов.

Накопителями цезия и соответственно индикаторами биологических реакций на этот радиоактивный метаболит являются мелкие позвоночные (полевая лесная мышь), иногда насекомые; индикаторами суммарных воздействий радионуклидов с учетом фона — дождевые черви, заглатывающие почву и подвергающиеся таким образом суммарному внешнему и внутреннему облучению от всего спектра радиоактивных излучателей среды. Для регистрации биологических эффектов на репродуктивные функции в биоценозах наиболее прост и показателен подсчет почвообитающих личинок насекомых (косянки и др.).

Радиоактивность водоемов территорий, загрязненных радиоактивными выпадениями, разная. Основные накопители фактора — используемые, как правило, в рыбном хозяйстве озера, пруды, радиоактивность которых, в отличие от проточных вод рек, чрезвычайно велика. Источниками высокой радиоактивности не проточных водоемов, помимо обязательного здесь повышенного содержания растворенного радона и радионуклидов от непосредственных радиоактивных выпадений на поверхность водоемов, являются постоянные стоки дождевых вод, вымывающие радионуклиды из загрязненных почв побережья водоемов и особенно почв без проведения биологической (п. 6.2) фиксации радионуклидов и высадки быстрорастущей многокорневой растительности.

Обследования радиологической обстановки водоемов в Брянской области, проведенные Санкт-Петербургским НИИ озерного и речного рыбного хозяйства (исследовались пробы рыб, грунта и воды), показывают, что рыба (каarp), выращенная в «чистых» по нормам ВДУ водоемах (в Клетнянском, Навлинском, Брянском, Почепском районах), загрязнена ^{137}Cs и ^{134}Cs незначительно, не более 14—15,3 Бк/кг. Вместе с тем радиоактивность этой же рыбы по стронцию-90 опасна для употребления, так как содержание кальцийконкурентного радиоактивного метаболита превышает пределы допустимых уровней (39—63 Бк/кг). Повышенное содержание радионуклидов накапливается в рыбах и после зимовки. В летний период радиоактивность снижается.

Содержание ^{137}Cs , ^{134}Cs и ^{90}Sr в рыбе максимально загрязненных радионуклидами районов (Красногорского, Клинцовского, Брасовского) значительно возрастает (табл. 6.5).

Удельная активность радионуклидов в рыбах и донных отложениях водоемов Брянской области (по данным Санкт-Петербургского НИИ озерного и речного рыбного хозяйства, 1991 г.)

Район отбора проб	Радиоактивность, Бк/кг		
	^{134}Cs	^{137}Cs	^{90}Sr
<i>Чистые районы: Клетнянский, Навалинский, Брянский, Почепский</i>			
Плотва, окунь, ерш, карп	0,6—1,8	0,8—15,3	39—63*
Рыба других видов	1,1—2,0	0,8—14,0	23—48
Донные отложения	10—11	10—80	24—34
<i>Пораженные районы: Красногорский, Клиновский, Брасовский</i>			
Карп-двухлеток	0,7—2,8	5,3—16,9	49—60
Карп-производитель:			
кости, мышцы	1,1	15,0	14,0
гонады (икра, молочники)	6,2	45,6	—
Пескарь, окунь, ерш	84	633,0	—
Донные отложения	25—46	15—300	23—34

* Для продуктов питания ВДУ = 185 Бк/кг.

Как видно из приведенных данных, большое количество радионуклидов закономерно накапливается в костях и гонадах рыб (икре, молочниках).

Обследование донных отложений рек и прудов показало, что донный ил является мощным аккумулятором радионуклидов. Если чистый песчаный донный грунт практически чист, то донные иловые отложения содержат большое количество радионуклидов (до 633 Бк/кг по ^{137}Cs). Поэтому при оценке радиационной опасности водоемов необходимо ориентироваться не на удельную активность воды, но на радиоактивность иловых донных осадений.

Ежемесячный в течение трех лет анализ радиоактивности рыбы в озерах, заводях рек показал, что в 12 % случаях пробы соответствовали фоновым уровням радиоактивности, в остальных содержание радионуклидов достигало предельного либо превышало ВДУ.

Проблема использования в пищу рыбы в пораженных радиацией районах не решена. Ряд исследований показывает, что наибольшее количество цезия накапливает щука (2,0 мкКи/кг); у окуня эта величина достигает 0,4 мкКи/кг, у леща — 0,24 мкКи/кг. По данным Санкт-Петербургского НИИ радиационной гигиены, в накоплении цезия и стронция определенную роль играют не только

виды рыб, но и отдельные части их тушек с преимущественным кальциевым метаболизмом — кости, гонады. Поэтому только филейные части тушки рыбы могут соответствовать ВДУ, и их можно использовать в пищу.

Для предупреждения повышенных лучевых нагрузок на население, связанных с потреблением продукции рыбных хозяйств, расположенных на радиоактивных территориях страны, необходим жесткий контроль за поставкой продукции на рынок, а также радиационный контроль с использованием методов радиационно-экологической индикации загрязнений: избирательной радиометрии донных отложений, активности членистоногих, многолетних рыб.

Для снижения и предупреждения накопления радиоактивности продуктов водоемов необходимо обязательное высеивание многолетних трав, мелкого кустарника на побережьях радиационно-опасных водоемов рыбных хозяйств.

Большое значение имеет реклама радиационной опасности с указанием мест и расстановкой знаков радиационно-опасной рыбной ловли, рыб, избирательно накапливающих радионуклиды, особое внимание следует уделять накопителям стронция, попадание которого в организм наиболее опасно.

Исследования радиоактивности почв сельскохозяйственных угодий, леса, водоемов и продукции, производимой в этих звеньях радиационно-загрязненных экосистем, должны вестись регулярно, с обобщением радиационно-экологической службой (отсутствующей в настоящем). Разрозненная регистрация (санитарной службой и ее радиационно-гигиеническим звеном, службой и НИИ лесных хозяйств, многочисленными сельскохозяйственными организациями) не дает общего представления о реальной и прогнозируемой экологической ситуации.

Для построения объективных представлений о процессах в экосистемах, вызванных внесением в состав среды, многоуровневые звенья ее метаболизма экологически новейших, биологически активных в крайне незначительных микроколичествах факторов требует постоянного многоуровневого мониторинга, регистрирующего динамику радио-, токсико-, стрессорногенных процессов. Именно такой, «биосферный» (по Н.В.Тимофееву-Ресовскому) подход к решению проблемы и может дать объективное представление о характере, направленности реакций, сделает возможными их прогноз, выработку стратегии профилактики последствий радиоактивного загрязнения среды.

Вопросы для самоконтроля

1. Назовите меры по профилактике последствий радиационных аварий.

2. Какой комплекс мер должен производиться по полной дезактивации среды?

3. Как производится частичная дезактивация биологическим методом?

4. Что включает в себя механический метод частичной дезактивации?

5. Как осуществляется конкурентная и комплексная блокада миграции радионуклидов?

6. Каковы особенности радионуклидного загрязнения лесов? Назовите его последствия.

7. Перечислите меры по профилактике повышенных лучевых нагрузок, связанных с лесопользованием.

8. Как проводятся лесовосстановительные работы на радиоактивных территориях?

9. Каким образом организуется контроль за радиационной обстановкой в лесах?

10. Расскажите о радиоактивном загрязнении водоемов. Перечислите методы по профилактике повышенных лучевых нагрузок, связанных с водопользованием.

Регистрируемый рост заболеваний жителей радиоактивных территорий, деформация экосистем указывают на необходимость разработки основ популяционной радиационной защиты; включение радиационного фактора с новым спектром излучений и характером распространения в состав радиационных метаболитов среды, состоявшееся и продолжающееся включение новейших радионуклидов в организмы жителей радиоактивных районов, отсутствие четких (подобных профессиональным) разграничений «организм — фактор опасности» — на необходимость принципиально нового подхода к решению проблемы радиационной защиты. Принципы ограничения радиационной опасности, сформировавшиеся на основе многолетнего опыта профессионального (управляемого) использования радиационного фактора, здесь могут быть использованы с определенной эволюцией методик, неизбежной при переходе на качественно новый уровень как воздействия, так и построения радиационной защиты.

7.1. Медико-административные меры защиты

Вычленение критических групп населения радиоактивных территорий, построение методов регистрации и анализа эффективности проводимых мероприятий должно вестись на основании определенной *теоретической концепции воздействия* радиационного фактора. В настоящее время официально принята подтверждавшаяся на протяжении второй половины XX в. концепция стохастических эффектов малых доз радиационных воздействий (гл. 4).

Установленные МКРЗ (Женева) размеры радиационных рисков, построенные на анализе прослеженных реакций канцерогенеза населения Хиросимы и Нагасаки, пострадавших от последствий атомной бомбардировки в 1945 г., не соответствуют размерам и характеру эффектов, регистрируемых от аварии на Чернобыльской АЭС. Более приемлема здесь *адаптационная концеп-*

ция реакций (подразд. 4.3), построенная на интеграции современных представлений теоретической медицины (адаптация как функция иммунной, нервной, эндокринной систем) и реально регистрируемых последствий радиоактивного экосистемного загрязнения среды (роста иммунной, нервной, эндокринной патологии).

Правомерно с этих позиций, в отличие от дочернобыльской концепции риска, *вычленение детского населения как критической популяционной группы* населения радиоактивных территорий, как группы с несформировавшимся, неадекватным новому составу среды адаптационным фенотипом (адаптационный конфликт), в сочетании с незавершенностью функций «инструментов» его формирования — иммунной, нервной, эндокринной систем.

И наконец, третьим, одним из наиболее важных моментов построения медико-административных мер радиационной защиты с адаптационных (фенотипических) позиций должны стать *обязательные учет и регистрация техногенного фона радиационных воздействий*. Фенотип, как и его мобильные составляющие (иммунитет, поведенческие стереотипы), имеет обязательный функциональный резерв, эволюционно отработанный для перенесения дополнительных экстремальных воздействий, смены состава среды.

Загрязненность среды и соответственно фоновая напряженность фенотипа экологически новейшими (неадаптированными) факторами резко снижают адаптационные функции популяций, направляя процесс по декомпенсированному типу с растущей повышенной частотой заболеваний этого ряда. Проведенные исследования показывают, что наиболее агрессивны в формировании радиационно зависимых реакций, *иммунодефицита* такие факторы среды, как тяжелые металлы (особенно медь), пестициды, ароматические углеводороды (рис. 7.1).

Радиогенный рост нейроэндокринной патологии также максимально проявляется в присутствии пестицидов (как для взрослого, так и для детского населения), тяжелых металлов, соединений марганца (для взрослого населения) в составе среды.

Очевидно, что градация территорий по степени радиационной опасности должна проводиться с учетом перечисленных фоновых воздействий, контроль за которыми должен возлагаться на коммунальные отделы Госсанэпиднадзора соответствующих территорий и в обязательном порядке использоваться при анализе радиационной обстановки. В случае отсутствия таких данных к резко потенцирующей радиогенной реакции следует относить среду радиоактивно загрязненных промышленных территорий.

Профилактика напряженных адаптационных систем и последующего роста патологии должна проводиться преимущественно в *критических группах населения*, среди детей в детских учреждениях, а также на предприятиях, в частности, радиоэлектронной

промышленности, производствах, хранящих и транспортирующих ядохимикаты, лакокрасочные изделия.

Критериями оценок реакций и эффективности их коррекции должны быть типовые показатели заболеваемости, объединенные в группы иммунных популяционных реакций (болезни органов

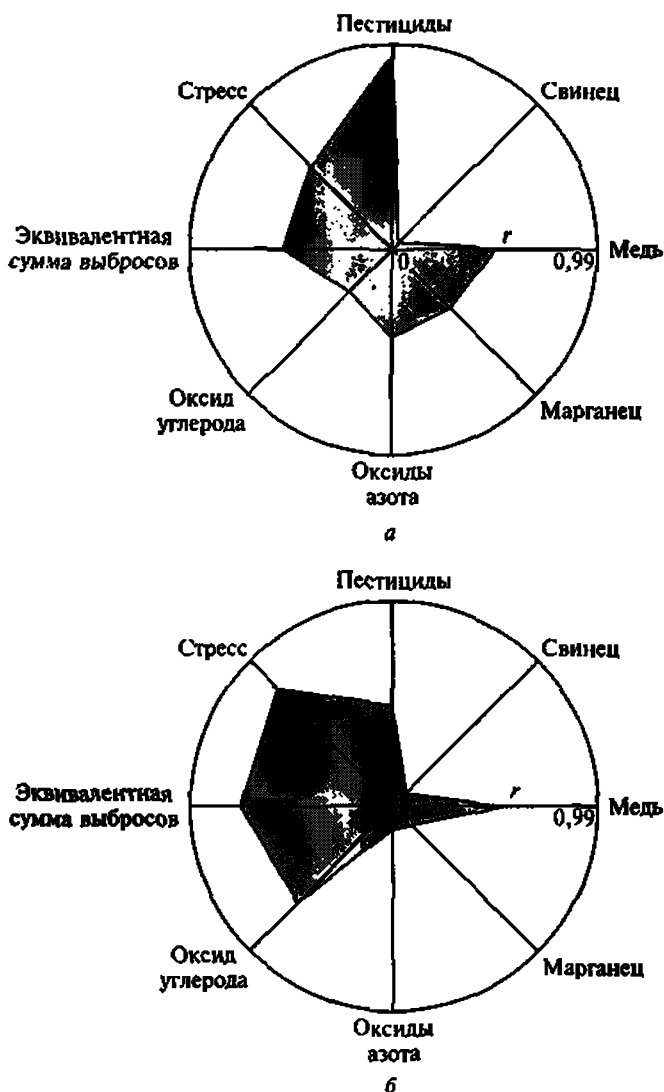


Рис. 7.1. Вклады основных ингредиентов среды в суммарный адаптационный ответ (по коэффициентам корреляции) детского (а) и взрослого (б) населения

дыхания и мочеполовой системы), нейроэндокринных реакций (болезни эндокринной, нервной систем и органов чувств).

Показатели: А — иммунных, Б — нейроэндокринных ответов на внесение в состав среды радиационных факторов:

А. Воспалительные процессы органов дыхания — трахеиты, бронхиты, пневмонии, отоларингологические заболевания, отиты, риниты, тонзиллиты (включая бессимптомную гипертрофию миндалин); конъюнктивиты; заболевания почек и мочевыводящих путей — пиелонефриты, циститы, уретриты, нефропатии; лейко-, лимфоцитоз, эритропения;

Б. Вегетососудистая дистония, невроты, астенический, судорожный синдромы, ожирение, сахарный диабет, заболевания с функционально-морфологическими нарушениями щитовидной железы (гиперплазия, тиреоидиты, зоб), гиперреакции коленных рефлексов, отрицательная пальценосая проба, проба Ромберга.

Практикуемое внедрение показателя частоты выявляемой гиперплазии щитовидной железы в отдельную группу реакций и его трактовка как следствия «йодного удара» неправомерны в связи с крайней непродолжительностью воздействия ^{131}I (≤ 1 мес). Состояние железы, кроме того, является индикацией общей напряженности нейроэндокринного статуса населения по причинам геоэндемических особенностей радиоактивных территорий и всей России вследствие явной недостаточности йода, селена и

Таблица 7.1

Микроэлементный дефицит юго-западных территорий Брянской области (по В. И. Коваленко, 1995)

Элемент	Содержание в почвах, мг/кг	Содержание в теле, г	Доля от нормы, %
I	0,53 (Очень низкое)	0,006	46
Se	0,49 (То же)	0,0045	35
V	30,0 (*)	—	—
Cr	35,0 (*)	—	—
Ni	20,0 (Низкое)	—	—
Cu	30,0 (То же)	—	—
Pb	60 (Крайне высокое)	—	—
Fe	38000 (Пониженное)	0,6	62
K	—	0,8	70
Ca	—	682	68
F	—	1,3	50

других элементов в совокупности с резким ростом напряженности функций этой системы на фоне резкой деформации состава среды (табл. 7.1).

Принятая оценка клинического анализа крови с явным лейкоцитозом должна рассматриваться не как специфическая радиогенная деформация гемопоэза, а как показатель типовой реакции первичных адаптивных процессов в тканях (подразд. 4.3) и экстренной мобилизации функций Т-лимфоцитарного надзора в адаптируемом организме.

В основу профилактических мер должна быть положена фармако-диетическая коррекция питания (особенно критических групп) населения через развернутую цепь (подготовка учителей, персонала предприятий) санитарно-просветительской работы.

7.2. Общая фармакодиетическая защита

Общий статус питания жителей территорий, пострадавших от аварии на ЧАЭС, как и жителей России в целом, отличается хроническим микроэлементным (см. табл. 7.1), витаминным, белковым, аминокислотным дефицитом при постоянном углеводно-жировом избытке и превышении норм суммарной калорийности питания. Такие хронические деформации гомеостаза ведут к закономерному снижению резервного потенциала иммунных (витаминный, аминокислотный дефициты), нейроэндокринных (микроэлементный дефицит) функций, резко усиливающих фоновую токсичность среды и продуктов питания.

Относительная популяционная переносимость такой адаптированной среды при резкой смене ее состава — макропопуляционный социогенный стресс, дополненный локальными радиационными воздействиями, — ведет при дефиците популяционных резервных функций к прогрессирующему росту патологических проявлений адаптационных реакций, общих для страны, но максимальных на территориях с «аварийной», социо-, радиационной деформацией среды.

Наиболее существенным звеном радиационной защиты (особенно детского населения радиоактивных территорий) является коррекция питания, направленная на обеспечение достаточности витаминного, микроэлементного и белкового питания детей, нарушенного в настоящее время (табл. 7.2).

Каскады ферментных реакций в клетках, наиболее интенсивные в процессе адаптации, непосредственно связаны с достаточностью обеспечения коферментных активных центров (витамины) и состоянием энергетических процессов — катализа фосфорилирования, микроэлементного обеспечения. Активность клетки, регулируемая этими взаимозависимыми процессами, позволяет адек-

Сводные данные о состоянии питания детского населения России (по Сыпрыху В. П., Беляеву Е. И., Аверину А. П. и др.)

Компонент питания	Дефицит, %	Последствие	Ведущий источник коррекции
Витамины: С (аскорбиновая кислота)	48 — 63	Недостаток синтеза стероидных гормонов подавления реакций «готовности», переносимости стресса, транспорта кислорода, окисления, углеводного обмена (энергопродукции), замедленная регенерация тканей, снижение барьерных функций эпителия	Плоды шиповника, смородины, лук, капуста, картофель, морковь
А-В ₁₂ -Е (ретинол, цианокобаламин, токоферон)	20 — 30	Задержка роста и развития организма, подавление барьерных и детоксикационных функций (А, В ₁₂), функций нервной системы, реакции ПОЛ, повышенный выход свободных радикалов, риск канцерогенеза	Сливочное масло, творог, морская рыба, печень морских животных (А, В ₁₂), хлеб из муки грубого помола, гречневая, овсяная каши (Е), морковь, перец, облепиха
В ₂ (рибофлавин)	70	Нарушение обмена жиров, синтеза каротинов (пигментов), повышение чувствительности к ультрафиолетовому, тепловому излучению, ионизирующей реакции	Бобовые, печень, гречневая, овсяная каша
В ₁ (тиамин)	58	Подавление энергетических функций клеток нервной системы и мышечных тканей, реакции ПОЛ. Повышенный выход свободных радикалов	Яйца, печень, почки, бобовые, мука грубого помола
В ₆ (пиридоксин)	52	Подавление синтеза аминокислот и липидов. Нарушение функций нервной системы	Фасоль, мясо, печень, морепродукты, орехи, грибы, гречневая и овсяная каши
Микроэлементы	35 — 70	Подавление функций иммунной системы, фагоцитарной активности лейкоцитов (цезий), синдром хронической усталости, дефицит внимания,	

Компонент питания	Дефицит, %	Последствие	Ведущий источник коррекции
Микроэлементы	35 — 70	памяти, гиперактивность, импульсивность (магний, йод, бром), дефицит цитохромной системы транспорта кислорода, повышенный риск ПОЛ, выхода свободных радикалов (Mn, Fe, Cu, Co, Ni), подавление синтеза фосфолипидов, холестерина, активности нервной и эндокринной систем, дефицит адаптационных реакций (V), повышенный риск канцерогенеза (Se)	Фасоль, мясо, печень, морепродукты, орехи, грибы, гречневая и овсяная каши
Полноценный белок	25	Источник построения ферментно-гормональных звеньев обмена. Задержка роста и формирования организма. Снижение резистентности организма	Продукты животного происхождения
Избыток употребления жиров, углеводов (крахмалов, сахаров)	—	Активация жирового обмена, повышенный риск ПОЛ, снижение работоспособности, резистентности, средней продолжительности жизни, ускоренное старение	Отказ от избыточности потребления, сбалансированность и адекватность питания
Забракованные продукты по содержанию свинца и других тяжелых металлов, нитратов, антибиотиков, пестицидов, бактериальной и патогенной микрофлоры	Бракуется от 5 до 30 % продуктов	Подавление сперматогенеза, гематоэоза, Т-лимфоцитарного надзора, канцерогенез, рост младенческой смертности, психических расстройств (Pb, Cu, Mo), иммунодефицит (антибиотики, микрофлора), снижение функций барьерных гематоэнцефальных, маточноплацентарных систем, тератогенные и энцефальные расстройства (пестициды)	Отказ от употребления случайных продуктов

ватно считывать постоянную гуморальную мембранную информацию клеток (реакция на вмешательство фактора в гомеостаз), осуществляет адекватный «поиск» и гениую транспозицию мобильных генетических элементов адаптации в ответ на воздействия с последующей цепью ферментных и энергетических реакций, коррекцией обмена, требующей дополнительного обеспечения клеток полноценным белком, витаминами, микроэлементами.

Дефицит в обеспечении любого из звеньев — взаимосбалансированной регуляции активности ферментов (витамины), достаточности резервного потенциала фосфорилирования (микроэлементы), адекватности считывания и транспорта информации (полноценные белки) — ведет к многоступенчатой инволюции и гибели клетки с последующими результирующими эффектами, очевидными при их рассмотрении на популяционном уровне.

Медико-демографические последствия (в пересчете на 1000 чел.) деформации среды:

Год	1985 ^{*1}	2000 ^{*1}	2000 ^{*2}
Рождаемость	16,1	8,6	9,1
Смертность	11,3	13,8	17,7
Естественный прирост населения	5,3	-5,2	-8,6
Число детей, умерших в возрасте до 1 года	20,7	25,3	28,1

^{*1} По всей России. ^{*2} По радиоактивным территориям.

Способность к сохранению клеточного постоянства определяется окислительным фосфорилированием в митохондриях клеток, эквивалентным по эффективности (Ленинджер А., 1996) сжиганию угля при 900 °С и технически недостижимом 75 %-ном КПД. Витамины, необходимые для осуществления таких функций, являются активными центрами ферментов, регулирующими этот процесс, связанный, тем не менее, как и любое сжигание топлива, с выходом не использованного полностью окислителя, побочных свободных радикалов. Их образование (супероксида О, пероксида Н₂О₂) и других продуктов радиолиза, считавшееся ранее неферментным радиолитическим процессом, является одним из неизбежных звеньев окислительного фосфорилирования с выходом от 2 до 5 % в биологической цепи перехода кислорода и образования углекислого газа и воды.

Образующиеся радикалы используются, тем не менее, клеткой и организмом как обязательное звено обмена в процессе фосфорилирования и активизации белков, регуляции синтеза тироксина в щитовидной железе, лейкоцитных и гуморальных реакциях лизиса. Вместе с тем выход реакции ПОЛ из-под жесткого ферментного контроля (энергетическая перегрузка клетки, недостаток цитохрома Р-450, неизбежные при адаптационных перегрузках в сочетании с микроэлементным и витаминным дефицитом) ведет к накоплению оксидантов, каскаду образования так назы-

ваемых минорных метаболитов, повреждениям ДНК, ускоряющим старение клетки, склеротические преобразования тканей, прежде всего нервной системы. Процесс вместе с тем адаптивен и зависит, в свою очередь, от достаточности антиоксидантной ферментной защиты (коферменты от витаминов А, Е, С, К), достаточной секреции билирубина (функция печени) и содержания уринов (вероятная основа рекламируемой уринотерапии). Особое место занимает антиоксидантное звено глутатиопероксидазы, в формировании которого, помимо аминокислот, необходимо достаточное поступление селена, содержащегося в чесноке. Включение его в состав питания резко ускоряет преобразование пероксидов в воду, разложение образовавшихся гидропероксидов липидов, снижая тем самым частоту радиогенных поломок в клетках, формирования опухолей.

К числу эффективных антиоксидантных комплексов относится, в частности, апробированный после чернобыльской аварии витаминсодержащий препарат «Веторон», стимулирующий, судя по данным его апробации (Рябченко Н. М. и др., 1996), и функции тимуса — Т-лимфоцитарного надзора за состоянием клеточных популяций.

Не меньшее значение в реакциях защиты имеет комплекс мер по снижению риска повреждения клеточных мембран. Изменения мембранной рецепции, трансмембранной передачи сигналов ведут к формированию аномальных ответов, регистрируемых Т-лимфоцитарной системой, искажению информации, передающейся через эпифизарный кровоток нервной и эндокринной системам и соответственно неадекватным гормональным и нейрорегуляторным реакциям с текущим неадекватным построением внутриклеточных ферментных адаптационных ответов. Такая «засоренность» мембранно-гуморальных реакций низкомолекулярными остатками разрушенных структур достаточно эффективно корректируется липоказеиновыми препаратами (липоказеиновый экстракт дрожжей, пивные дрожжи), усиливающими дренажные детоксикационные функции клетки и очищающие тем самым каналы связей от неизбежных последствий, ПОЛ-разрушения липидов мембран, информационных помех.

Большое значение в обеспечении как *ферментообразующих*, так и *дренажных функций* имеет правильное построение питания с достаточным количеством витаминно- и микроэлементсодержащих продуктов (табл. 7.3).

Помимо фармакодиетической коррекции первичных (пусковых) клеточных поломок, при построении защиты необходима адаптивная коррекция функций «верхнего» эшелона — иммунной, нервной, эндокринной систем.

Для обеспечения функций иммунитета, звена кроветворения необходимо прежде всего достаточное количество полноценного

Таблица 7.3

Витамины и микроэлементы, необходимые для коррекции реакций на радиационную деформацию среды

Витамины, микроэлемент, суточная норма, мг	Назначение	Основной источник
<i>I. Витамины</i>		
С (аскорбиновая кислота), 70—100	Устойчивость к инфекциям, прочность стенок сосудов, регуляция холестеринового обмена, антиоксидант	Шиповник, красный перец, смородина (100 мг/100 г)
В ₁ (тиамин)	Биоэнергетические процессы (синтез АТФ), проведение нервного импульса, нормальное состояние центральной нервной системы, сердца	Свинина, горох, фасоль, гречневая крупа, печень (> 0,4 мг/100 г)
В ₂ (рибофлавин)	Состояние нервной системы, зрения, печени, кроветворных тканей	Говяжья печень, яйца, скумбрия (> 0,3 г/100 г)
РР (ниацин, никотиновая кислота), 17—25	Синтез АТФ, белковый обмен, состояние центральной нервной системы	Говяжья печень, почки, язык, куриное мясо, говядина, гречневая крупа, кофе (> 3 мг/100 г)
А (ретинол), 1,5—2,0	Рост, нормальное состояние эпителия (слизистых, кожи, органов дыхания, мочеиспускания). Сумеречное зрение. Тканевое дыхание (антиоксиданты), состояние эндокринных желез	Печень говяжья, свиная, трески, сливочное масло (3,0—0,3 мг/100 г)
Каротин (провитамин А),	То же. Тормозит канцерогенез	Облепиха, морковь, лук зеленый, перец красный, черноплодная рябина (18—20 мг/100 г)

Витамин, микроэлемент, суточная норма, мг	Назначение	Основной источник
Д, 0,0025	Регуляция кальций-фосфорного обмена	Синтезируется при ингаляции. Печень рыбы. Жирные рыбы. Рыбий жир
Холин, 500	Удаление жира из печени, передача нервного импульса	Яичные желтки, печень, почки, сливки (до 100 мг/100 г)
В ₁₂ (циано-кобаламин), 3 мкг	Нормальное кроветворение, синтез липидов, углеводный обмен	Печень, сельдь, скумбрия (≤ 30 мкг/100 г)
Е (токоферолы), 12 — 15 МЕ, детям первого года жизни 5 МЕ	Антиоксидант, препятствует образованию свободных радикалов, повреждению липидов мембран	Синтезируется микрофлорой кишечника (без употребления антибиотиков). Нефильтрованное растительное масло, печень, хлеб из муки грубого помола
К (филлохиноны), 70 — 140 мкг	Антиоксидант, нормализация окислительного фосфорилирования, синтез протромбина, свертывание крови	Синтез микрофлорой кишечника. Белокачанная капуста, шпинат, помидоры, тыква, свиная печень
II. Микроэлементы		
Бром (Br), 0,5 — 2 мг	Регуляция деятельности центральной нервной системы, щитовидной железы, половых желез	Хлеб (мука грубого помола), морепродукты, бобовые
Железо (Fe), 10 — 30 мг	Кроветворение, транспорт кислорода (гемоглобин, цитохромы), реакции иммунитета. Антиоксидант.	Гречневая крупа, фасоль, кровяная колбаса, мясо

Йод (I), 50—200 мкг	Функции щитовидной железы. Недостаток — эндемический зоб, избыток — гипертиреоз	Греческий орех, морская капуста, овощи, мясо
Кобальт (Co), 40—70 мкг	Кровотворение, синтез витамина B ₁₂ , входит в состав витамина B ₁₂ — зависимых ферментов. Протектор повреждения мембран	Бобовые, печень, хлеб из муки грубого помола
Марганец (Mn), 2—10 мг	Формирование иммунитета, кроветворение, рост и формирование скелета, функции гипофиза	Печень, почки, овощи, хлеб
Медь (Cu), 2—5 мг	Синтез цитохромов, флавопротеидов, окислительное фосфорилирование, антиоксидант	Листья чая, орехи, грибы, соя, кофе, хлеб и др.
Цинк (Zn), 5—20 мг	Кровотворение, ферментообразование, рост, формирование организма	Желток яиц, печень, бобовые
Сера (S)	Синтез аминокислот, сульфгидрильных групп ферментов, кофермента А, тиамина, биотина, флавопротеидов. Радиопротектор	Морская рыба, говядина, яйца

белка (при обязательной достаточности поступления витамина В₁₂, К, Fe, Со, Мп с продуктами питания). Первое место среди таких продуктов занимают печень, каши из гречневой крупы и овса, хлеб грубого помола, бобовые, морская рыба.

Формирование и обеспечение функций нервного звена адаптации требуют достаточного поступления в организм тиамина (горох, фасоль, гречневая крупа), рибофлавина (печень, яйца, скумбрия), холина (почки, сливки), брома (хлеб из муки грубого помола).

Для формирования и нормального функционального состояния эндокринной системы — витамина А (печень, сливочное масло), кератина (облепиха, черноплодная рябина, перец), холина (яичный желток), брома (бобовые, хлеб из муки грубого помола), йода (грецкий орех, морская капуста), серы (морская рыба, яйца).

Важное значение для предупреждения последствий воздействия радиационного загрязнения имеет обеспечение населения рациональным сбалансированным питанием, обеспечивающим устойчивость организма к внешним воздействиям, в том числе воздействия техногенных химических и радиационных загрязнений.

Рациональное питание — это питание практически здорового человека, построенное на научных основах и способствующее:

- повышению уровня здоровья;
- повышению сопротивляемости организма;
- сохранению возможно дольше высокой работоспособности, бодрости и продолжительности жизни;
- наилучшему росту, физическому и умственному развитию подрастающего поколения.

Рациональное питание имеет три звена:

- физиологические нормы;
- нормы потребления продуктов;
- режим питания.

Физиологические нормы — это научно обоснованные нормы питания, полностью покрывающие энергетические траты организма и обеспечивающие его всеми веществами в надлежащих количествах и в наиболее выгодных (оптимальных) соотношениях.

В физиологических нормах питания различают две стороны: *количественную*, т.е. калорийность рациона, и *качественную*, где расшифровывается структура калорийности, т.е. за счет каких пищевых веществ обеспечивается калорийность, а также какие еще вещества, не связанные с калорийностью, должны поступать и в каких количествах и соотношениях.

Количественная сторона физиологических норм должна обеспечивать покрытие энерготрат организма, складывающихся в обычных условиях из *нерегулируемых трат* — основной обмен (5,88—7,14 ГДж или 1,4—1,7 Гкал) и специфического динамического действия пищи (СДД), составляющего 10 % от основного

обмена, т.е. 588 — 714 кДж, и *регулируемых трат* — расхода энергии в процессе трудовой деятельности, бытового и домашнего труда, занятий спортом и др. 840 — 1092 кДж/ч (200 — 260 ккал/ч).

Исходя из этих параметров разрабатываются физиологические нормы питания (табл. 7.4 и 7.5).

В результате длительного изучения потребности организма в калориях и пищевых веществах было установлено, что определяющим фактором для детей, подростков и пожилых людей является их возраст, а для трудоспособного населения — возраст и характер трудовой деятельности. В соответствии с ныне действующими физиологическими нормами все население разделено на ряд групп: девять — детского населения по возрастному принципу, в том числе три — детей грудного возраста. В двух старших группах, кроме возрастного, использован и половой признак — мальчики и девочки в группе 11 — 13 лет и юноши и девушки в группе 14 — 17 лет. По возрастному признаку выделены и группы лиц пенсионного возраста: 60 — 74 года и старше 75 лет с дифференциацией по половому признаку.

Согласно ныне действующим физиологическим нормам питания, взрослое трудоспособное население в зависимости от тяжести трудовой деятельности подразделено на пять групп у мужчин и на четыре — у женщин. Каждая профессиональная группа включает:

работников преимущественно умственного труда (1-я группа);

работников, занятых легким физическим трудом (2-я группа);

работников среднего по тяжести труда (3-я группа);

работников тяжелого физического труда (4-я группа);

мужчин, занятых особо тяжелым ручным физическим трудом (5-я группа). Введена дифференциация по возрасту (18 — 29, 30 — 39 и 40 — 59 лет).

В качестве дополнительных групп выделяются беременные женщины и кормящие матери с 1 — 6- и 7 — 12-месячными детьми. Для таких женщин в физиологических нормах приведены добавки к соответствующим их физической активности и возрасту нормам.

Физиологические нормы питания являются средними ориентировочными величинами, отражающими оптимальные потребности отдельных групп населения в основных пищевых веществах и энергии.

Количественная сторона физиологических норм питания является для каждой возрастной и профессиональной группы населения основой и для распределения калорийности питания в течение суток, т.е. режима питания. В зависимости от возраста, характера трудовой деятельности, включая сменность работы, рекомендовано несколько вариантов режима питания, основой которых для взрослого населения являются режимы трех- и четырехразового питания с соответствующим распределением калорийности по отдельным приемам.

Суточная потребность в пищевых веществах

Возраст	Энергия, ккал*2	Белки, г		Жиры, г	Углеводы, г	Минеральные вещества, мг					
		все-го	в т.ч. животные			Ca	P	Mg	Fe	Zn	I
0—3 мес*1	115	2,2	2,2	6,5 (0,7)	13	400	300	55	4	3	0,04
4—6 мес	115	2,6	2,5	6,0 (0,7)	13	500	400	60	7	3	0,04
7—12 мес	110	2,9	2,3	5,5 (0,7)	13	600	500	70	10	4	0,05
1—3 года	1540	53	37	53	212	800	800	150	10	5	0,06
4—6 лет	1970	68	44	68	272	900	1350	200	10	8	0,07
6 (школьный)	2000	69	45	67	285	1000	1500	250	12	10	0,08
7—10 лет	2350	77	46	79	335	1100	1650	250	12	10	0,10
11—13 лет (мальчики)	2750	90	54	92	390	1200	1800	300	15	15	0,10
11—13 лет (девочки)	2500	82	49	84	355	1200	1800	300	18	12	0,10
14—17 лет (юноши)	3000	98	59	100	425	1200	1800	300	15	15	0,13
14—17 лет (девушки)	2600	90	54	90	360	1200	1800	300	18	12	0,13

*1 Потребности детей первого года жизни в энергии, белках, жирах, углеводах даны в граммах на килограмм массы тела. В скобках указана потребность в линолевой кислоте, (г/кг массы тела). Величины потребности в белке даны для вскармливания детей материнским молоком или заменителем женского молока с биологической ценностью (БЦ) белкового компонента более 80 %; при вскармливании мо-

Суточная потребность в веществах и энергии взрослого

Группа	Коэффициент физической активности	Возраст, лет	Энергия, ккал	Белки (г)		Жиры, г	Углеводы, г	Минеральные		
				Всего	В т.ч. животные			Ca	P	Mg
Мужчины										
I	1,4	18—29	2450	72	40	81	358	800	1200	400
		30—39	2300	68	37	77	335			
		40—59	2100	65	36	70	303			
II	1,6	18—29	2800	80	44	93	411	800	1200	400
		30—39	2650	77	42	88	387			
		40—59	2500	72	40	83	366			

Таблица 7.4

и энергии групп детского населения

Витамины									
С, мг	А, мкг	Е, мг ток. ^{а3}	Д, мкг	В ₁ , мг	В ₂ , мг	В ₆ , мг	ниацин, мг ^{а4}	фолат, мкг	В ₁₂ , мкг
30	400	3	10	0,3	0,4	0,4	5	40	0,3
35	400	3	10	0,4	0,5	0,5	6	40	0,4
40	400	4	10	0,5	0,6	0,6	7	60	0,5
45	450	5	10	0,8	0,9	0,9	10	100	1,0
50	500	7	2,5	0,9	1,0	1,3	11	200	1,5
60	500	10	2,5	1,0	1,2	1,3	13	200	1,5
60	700	10	2,5	1,2	1,4	1,6	15	200	2,0
70	1000	12	2,5	1,4	1,7	1,8	18	200	3,0
70	800	10	2,5	1,3	1,5	1,6	17	200	3,0
70	1000	15	2,5	1,5	1,8	2,0	20	200	3,0
70	800	12	2,5	1,3	1,5	1,6	17	200	3,0

лочными продуктами с БЦ менее 80 % указанные величины необходимо увеличить на 20 — 25 %.

^{а2} 1 ккал = 4,18 кДж.

^{а3} Токофероловый эквивалент.

^{а4} Ниациновый эквивалент.

Таблица 7.5

трудоспособного населения и лиц пенсионного возраста

вещества, мг			Витамины									
Fe	Zn	I	С, мг	А, мкг	Е, мг	Д, мкг	В ₁ , мг	В ₂ , мг	В ₆ , мг	ниацин, мг	фолат, мкг	В ₁₂ , мкг
10	15	0,15	70	1000	10	2,5	1,2	1,5	2	16	200	3
10	15	0,15	70	1000	10	2,5	1,4	1,7	2	18	200	3

Группа	Коэффициент физической активности	Возраст, лет	Энергия, ккал	Белки (г)		Жиры, г	Углеводы, г	Минеральные		
				Всего	В т.ч. животные			Ca	P	Mg
III	1,9	18—29	3300	94	52	110	484	800	1200	400
		30—39	3150	89	49	105	462			
		40—59	2950	84	46	98	432			
IV	2,2	18—29	3850	108	59	128	566	800	1200	400
		30—39	3600	102	56	120	528			
		40—59	3400	96	53	113	499			
V	2,5	18—29	4200	117	64	154	586	800	1200	400
		30—39	3950	111	61	144	550			
		40—59	3750	104	57	137	524			

Женщины

I	1,4	18—29	2000	61	34	67	289	800	1200	400
		30—39	1900	59	33	63	274			
		40—59	1800	58	32	60	257			
II	1,6	18—29	2200	66	36	73	318	800	1200	400
		30—39	2150	65	36	72	311			
		40—59	2100	63	35	70	305			
III	1,9	18—29	2600	76	42	87	378	800	1200	400
		30—39	2550	74	41	85	372			
		40—59	2500	72	40	83	366			
IV	2,2	18—29	3050	87	48	102	462	800	1200	400
		30—39	2950	84	46	98	432			
		40—59	2850	82	45	95	417			

Дополнительно к норме, соответствующей

Беременные	+350	30	20	12	30	300	450	50
Кормящие (1—6 мес)	+500	40	26	15	40	400	600	50
Кормящие (7—12 мес)	+450	30	20	15	30	400	600	50

Нормы для лиц престарелого

Мужчины	60—74	2300	68	37	77	335	1000	1200	400
	75+	1950	61	33	65	280	1000	1200	400
Женщины	60—74	1975	61	33	66	284	1000	1200	400
	75+	1700	55	30	57	242	1000	1200	400

Примечание. Для женщин старше 50 лет во всех группах калций - 1000 мг/сут.

вещества, мг			Витамины									
Fe	Zn	I	C, мг	A, мкг	E, мг	D, мкг	B ₁ , мг	B ₂ , мг	B ₆ , мг	Ниацин, мг	Фолат, мкг	B ₁₂ , мкг
10	15	0,15	80	1000	10	2,5	1,6	2,0	2	22	200	3
10	15	0,15	80	1000	10	2,5	1,9	2,2	2	26	200	3
10	15	0,15	100	1000	10	2,5	2,1	2,4	2	28	200	3

18	15	0,15	70	800	8	2,5	1,1	1,3	1,8	14	200	3
18	15	0,15	70	800	8	2,5	1,1	1,3	1,8	14	200	3
18	15	0,15	80	1000	8	2,5	1,3	1,5	1,8	17	200	3
18	15	0,15	80	1000	8	2,5	1,5	1,8	1,8	20	200	3

физической активности и возрасту

20	5	0,03	20	200	2	10	0,4	0,3	0,3	2	200	1
15	10	0,05	40	400	4	10	0,6	0,5	0,5	5	100	1
15	10	0,05	40	400	4	10	0,6	0,5	0,5	5	100	1

и старческого возраста

10	15	0,15	80	1000	15	2,5	1,4	1,6	2,2	18	200	3
10	15	0,15	80	1000	15	2,5	1,2	1,4	2,2	15	200	3
10	15	0,15	80	800	12	2,5	1,3	1,5	2	16	200	3
10	15	0,15	80	800	12	2,5	1,1	1,3	2	13	200	3

Основные варианты режима питания, % от общей калорийности суточного рациона:

Питание	3-разовое	4-разовое
Первый завтрак	30	20—30
Второй завтрак	—	10—25
Обед	45—50	40—50
Ужин	25—20	20—15

Кроме общеукрепляющего влияния, отдельные компоненты правильно организованного питания могут выполнять в организме функции адаптогенов — радиопротекторов, снижающих неблагоприятное действие радиации.

Ведущим фактором детоксикации ядов (непосредственно в кишечнике, печени и головном мозге) является цитохром Р-450. Очевидно, что характерная недостаточность ресинтеза этого фермента (причины см. выше) в сочетании с дисфункцией кишечника является одной из причин подавления адаптации, роста патологических реакций на радиоактивность среды, снижение интеллекта, средней продолжительности жизни · · · реакций, характерных для радиационно-токсических территорий страны.

Белки пищи нормируются в разных странах мира, исходя из разных принципиальных подходов. В нашей стране количество белка в суточном рационе должно быть больше, чем количество, обеспечивающее азотистый баланс организма, в 2 раза — у детей и в полтора — у взрослого населения. Округленно эта величина составляет около 100 г для взрослого «стандартного» человека (рост 170 см, масса тела 70 кг, возраст от 20 до 40 лет). Около 55 % должно быть представлено белками животного происхождения, содержащими незаменимые аминокислоты (полноценные белки).

Из других групп продуктов только бобовые, особенно соя, содержат также полноценные белки. Только в этом случае будут выполняться его пластическое предназначение, обеспечиваться формирование и нормальное функционирование иммунной, нервной, эндокринной систем. Из растительных наиболее полноценны белки ржаного хлеба (мука грубого помола), овсяной, гречневой каши, бобовых. С возрастом (после 40 и тем более после 60 лет) количество белка должно снижаться до 80—85 г/сут при употреблении мясных рационов (по С. Брэггу) не более 3—4 раз в неделю. Нередкая реклама малой потребности в белках неправомерна.

Многолетние авторитетные исследования (Г. Фернандес, Р. Уолфорд и др., 1980) показывают, что снижение суммарной калорийности питания, но при сохранении его белковой ценности ведет к явному росту иммунной адаптивной готовности, достоверному росту средней продолжительности жизни.

Жиры, особенно при употреблении трудноокисляемых насыщенных жиров, являются фактором повышенного выхода свободных радикалов (реакции ПОЛ), избытка холестерина, снижения резистентности (адаптивности), повышенной ломкости сосудов. Своего рода антидотами, необходимыми для подавления этих реакций, являются растительные ненасыщенные жиры, содержащие *В*-цитостерин, фактор нормализации холестерина обмена. На растительные жиры в рационе должно приходиться не менее $\frac{1}{3}$ от общего количества жиров. Особое место в питании должны занимать фосфолипиды (к которым относится и холестерин). Жиры этой группы крайне необходимы для построения клеточных, ядерных и плазматических мембран и особенно мембран нейронов, а также для построения стероидных и половых гормонов, участвующих в обеспечении адаптивных функций нервной и эндокринной систем. Наибольшее количество фосфолипидов, включающих в свой состав аминспирт холин, необходимый для построения ацетилхолина — медиатора нервной системы, содержится в яйце (желток), из растительных продуктов — в бобовых (фасоль, соя).

Содержание, %, в продуктах:	Фосфолипиды	Холестерин
яйцах	3,4	0,57
бобовых	0,3—0,9	—
нерафинированных растительных маслах	1—2	—
сырах	0,5—1,1	0,27
рыбе	0,3—2,4	0,3
мясе	0,8	0,06—0,1

Холестерин, помимо общих функций фосфолирирования, участвует в обмене желчных кислот, синтезе витамина D. Избыточное употребление ведет к повышенному риску склеротических изменений, риску поломок сосудов при гипертонии (инфарктам, инсультам). Вопрос о выборе оптимального количества и состава жира в структуре питания остается открытым. Исследования (Р. Гуд, Э. Юнис, 1980) показывают, что избыточное употребление жиров ведет к повышению половой активности, росту детородных функций. При снижении потребления этих компонентов на фоне сохранения полноценности белкового питания достоверно растёт продолжительность жизни.

Минимальная смертность здесь прослеживается в группах населения с минимальным суммарным (60—70 г/сут) потреблением жиров, при $\frac{1}{3}$ жиров растительного происхождения.

Углеводы — основной энергетический материал обмена — подразделяются на моно- (глюкоза, фруктоза), полисахара (крахмал, гликоген) и грубоволокнистые пищевые углеводы — «клетчатку» (целлюлоза, лигнин и др.). Содержатся преимущественно в продуктах растительного происхождения. При меньшей по срав-

Травы и растения, повышающие общую устойчивость и радиорезистентность организма

Растение	Лечебные свойства и противопоказания	Формы применения и дозировка
Аралия маньчжурская	Повышает и нормализует функции центральной нервной системы при ее истощении (астеноневротические состояния), в том числе и радиационного происхождения. Противопоказан при гипертонии, нервной возбудимости, бессоннице	Настойка корня на 70%-ном спирте: 30—40 капель 2 раза в день
Женьшень	Снижает утомленность, улучшает кровоснабжение мозга, активизирует кровотворение. Противопоказания те же	Настойка корня: 15—20 капель 3 раза в день
Заманиха	Снимает астеноневротические состояния, тонизирует	Настойка на 40%-ном спирте: 30—40 капель 2—3 раза в день
Аралий корень	Нормализация функций истощенной нервной системы, лечение алкоголизма	Спиртовой экстракт: 20—30 капель 3 раза в день до еды
Лимонник китайский	Нормализация функций центральной нервной системы, сердца. Противопоказан при гипертонии, сердечных заболеваниях	Спиртовой экстракт: 20—30 капель 3 раза в день до еды
Родиола розовая	Повышение работоспособности и устойчивости организма к неблагоприятным факторам. Противопоказания: гипертония, заболевания сердца, лихорадка	Спиртовой экстракт: 5—10 капель 2—3 раза в день. Настойка: 20 г корней в 100 мл водки; 15 капель 2 раза до еды
Элеутерококк	Повышает умственную работоспособность, снимает утомляемость	Экстракт, по 2 мл за полчаса до еды
Аир обыкновенный	Тонизирует нервную систему. Повышает сопротивляемость к заболеваниям органов дыхания	Отвар: 15 г корня в 500 мл воды, 30 мин кипения. По 1 ст. ложке 3 раза в день

Боярышник	Усиливает кровоснабжение мозга, сердца, нормализует ритм работы сердца	Отвар: 20 г цветков в 200 мл воды. По 1 ст. ложке 3—4 раза в день. Плоды добавлять в компоты
Василек синий	Противовоспалительное, антимикробное действие, ускоряет выведение токсических веществ из организма	Настой: 10 г цветка в 200 мл кипятка. По 1/4 стакана 3 раза в день
Вахта трехлистная	Усиливает кроветворение, успокаивает	6—8 г листьев залить 200 мл кипятка, настаивать 15—20 мин. По 1/4 стакана 3 раза в день
Рябина	Усиливает функции кроветворения, ферментобразования	Настойка: 20 г на 200 мл водки. По 1 чайной ложке 3 раза в день
Тысячелистник обыкновенный	Кровоостанавливающее, противовоспалительное, антимикробное, ранозаживляющее действие	Настой: 1 чайная ложка на 400 мл воды. По 1 ст. ложке после еды
Чага (березовый гриб)	Радиозащитное, противовоспалительное, антиканцерогенное действие	Залить холодной водой, дать настояться 5 ч. Размягченную массу пропустить через мясорубку. 1 стакан измельченной массы залить 5 стаканами теплой (50°) воды, настоять 2 сут, процедить, отжать. Принимать по 1/2 стакана 6 раз в день за 30 мин до еды
Черника	Радиозащитное, противовоспалительное действие	Варенье, отвары
Девясил	Усиливает сопротивляемость, нормализует состояние центральной нервной системы, общеукрепляющее действие	Настойка измельченного корня на водке или кагоре в соотношении 1 : 10. По 20—30 капель 2—3 раза в день
Ель (молодые побеги), сосна (молодые побеги)	Радиозащитное действие (!!), противовоспалительное, общеукрепляющее действие	40 г молодых побегов, шишек, вскипятить в 200 мл воды, настаивать в течение часа. Пить порциями в 3—4 приема в сутки

Окончание табл. 7.6

Растение	Лечебные свойства и противопоказания	Формы применения и дозировка
Зверобой	Противовоспалительное, стимулирующее действие, восстановление тканей	Настойка 15 г в 200 мл воды. По 10—20 капель после еды
Земляника: ягоды листья	Усиливает кроветворение, радиозащитное действие Нормализует функции центральной нервной системы, улучшает работу сердца	1 ст. ложку (5 г) сушеных ягод, листьев залить 200 мл кипятка, настоять 8—10 ч, пить как чай
Калина обыкновенная	Предотвращение злокачественных опухолей (стохасти-ческих эффектов)	Отвар (настой) 15—20 г на 200 мл воды, на 3 приема в день
Облепиха	Концентрат витаминов, противовоспалительное дейст-вие, радиозащитное действие	Масло облепиховое. По 1 чайной ложке в день
Польнь горькая	Усиливает функции кроветворения	Настойка: 10 г на 200 мл 70%-ного спирта. По 15—20 капель в день за 30 мин до еды

нению с жирами энергетической ценности они легко усваиваются и, как «чистые» углерод-кислород-водородистые структуры, легко расщепляются (при нормальном цитохромном радикалацепторном обеспечении процесса) с эффективным выделением энергии до воды и углекислого газа.

Большую проблему (помимо пандемического перехода на моносахара и роста сахарного диабета) представляет отказ от грубоволокнистых составляющих питания. Грубая пища должна быть обязательным компонентом пищевого рациона. Целлюлоза (клетчатка) способна сорбировать воду с растворенными в ней токсикантами (детоксикация), разбухшая неперевариваемая масса (сбравшая в норме токсические метаболиты) является и эффективным раздражителем стенок толстого кишечника, обеспечивая его эффективную перистальтику и предупреждая длительный застой пищевого комка, его брожение, интоксикацию организма.

В совокупности с микрофлорой толстого кишечника, но только при наличии грубоволокнистых составляющих, в процессе микробного переваривания идет и эффективное образование ключевых адаптогенов, тохоферолов, филлохинононов, а также ряда незаменимых аминокислот. Источниками клетчатки является вся грубая растительная пища — хлеб из муки грубого помола (с остатком биологически активной зародышевой части зерен), каши (гречневая, овсяная), фрукты.

В ряде ситуаций — при массивной надфоновой токсичности среды характерного агрессивного спектра, стрессорных психоэмоциональных перегрузках, частой смене состава среды — необходима дополнительная фармакодиетическая коррекция реакций с использованием препаратов, поддающихся самостоятельному домашнему приготовлению (табл. 7.6).

К более мощным фармакологическим препаратам защиты относится группа зоотоксинов (яды змей), треоны, кортикостероиды, эстрогены, алкалоиды. Использовать их можно только при определенных показаниях (хроническое профессиональное переоблучение), не связанных со сформировавшейся радиоактивной загрязненностью среды.

7.3. Противорадиационная защита

Собственно противорадиационная защита населения радиоактивных территорий строится на трех основных принципах: *введение конкурентов, введение мишеней, ионная защита.*

Введение конкурентов и предупреждение накопления радионуклидов в организме при неизбежном риске их проникновения с водой, пищей, воздухом осуществимо через коррекцию питания. В основу положено свойство конкурентности обмена радиоактив-

ных веществ и их химических нерадиоактивных аналогов. И те, и другие вещества способны включаться в одни и те же метаболические процессы до точки насыщения реакций. После насыщения атомы (ионы) любого из конкурирующих веществ не включаются в обмен, биохимические структуры клеток. Если насыщение будет осуществлено за счет стабильных веществ, радиоактивные вещества в состав клеток тканей органов не включаются.

Так, для защиты щитовидной железы от ^{131}I необходимо насыщение организма обычным нерадиоактивным йодом, который, конкурируя со своим радиоактивным аналогом и находясь в более выгодном (количественном) положении, блокирует «вакантные» места поступления ^{131}I . В результате конкурентной блокады радионуклид, мигрирующий только в щитовидную железу, выводится из организма.

Конкурентами цезия являются калий, в меньшей степени натрий. Конкурентами стронция — кальций, в меньшей степени магний, медь. Поступление конкурентов ^{137}Cs и ^{90}Sr должно осуществляться через диету, с постоянным преобладанием в ассортименте продуктов, содержащих такие вещества. В дополнение могут применяться настои трав (употребляемые вместо чая), а также неспецифичные фармакологические препараты, такие, как оротат калия, аспаркам, панангин, доступный в любой аптеке, калий, магнийсодержащие минеральные воды. Продукты, содержащие основные конкуренты ^{137}Cs и ^{90}Sr — соответственно калий и кальций, приведены в табл. 7.7.

Выбирая либо рекомендуя в качестве радиозащитных препаратов (радиопротекторов) те или иные перечисленные в табл. 7.7 продукты, следует тем не менее помнить, что если они будут выращены на радиоактивной почве, то сыграют совершенно про-

Таблица 7.7

Конкурентсодержащие продукты питания, препятствующие накоплению ^{137}Cs и ^{90}Sr

Эффективность	Конкуренция ^{137}Cs		Конкуренция ^{90}Sr	
	Продукт	[K], мг/100 г	Продукт	[Ca], мг/100 г
Высокая	Какао порошок	2403	Сыр:	
	Фасоль	1100	Каунасский	1010
	Сухое молоко	1000	Литовский	1040
	Морская капуста	963	Российский	1075
	Горох	731	Советский	1000
	Драже	682	Тартусский	1040

Эффектив- ность	Конкуренция ^{137}Cs		Конкуренция ^{90}Sr	
	Продукт	[K], мг/100 г	Продукт	[Ca], мг/100 г
Высокая	Шоколад	543	Швейцарский	1064
	Картофель	568	Ярославский	869
	Палтус	500	Плавленный	680
	Щавель	500	Сухое молоко	919
	Урюк	500	—	—
	Чернослив	500	—	—
Достаточная	Толокно	251	Фасоль	150
	Овсяная крупа	292	Шоколад	187
	Сгущенное молоко	308	—	—
	Баранина	345	—	—
	Говядина	334	—	—
	Крольчатина	364	—	—
	Телятина	344	—	—
	Печень говяжья	250	—	—
	Колбасы:		—	—
	вареные	200 — 300	—	—
	копченые	300 — 400	—	—
	Цыплята	350	—	—
	Лещ	284	—	—
	Минтай	428	—	—
	Мойва	287	—	—
	Ставрида	350	—	—
	Треска	328	—	—
	Кальмар	321	—	—
	Килька	300	—	—
	Сазан	323	—	—
	Редис	357	—	—
	Свекла	288	—	—
	Помидоры	290	—	—

тивоположную роль, так как именно они будут избирательно накапливать указанные радионуклиды.

Из числа растений, которые также должны быть собраны на нерадиоактивных территориях, свойствами радиопротекторов обладают лопух (корневище), мята перечная (листья), солодка голая (корневище). Отвары либо настои этих высушенных растений можно употреблять как чай. Побочные эффекты здесь исключены.

Введение мишеней или принцип внутриклеточного гашения энергии фотонов (частиц) и соответственно подавление биологической агрессивности фактора реализуется за счет внесения в организм клетки металлов «мишеней» избирательного захвата (поглощения) энергии излучений ($E_n \sim Z^{3(4)}$). Закономерное смещение реакций внутриклеточного взаимодействия в сторону фотоэффекта (до 50—100 кэВ) ведет, как показывает анализ накопленных материалов, не только к достоверной защите, но и к эффекту стимула общих биологических, иммунных процессов клетки, организма.

Так, экспериментальное введение в организм мелкодисперсного порошка железа до облучения абсолютно летальной дозой резко повышает устойчивость лабораторных животных к радиационному фактору (средняя продолжительность жизни возрастает не менее, чем в два раза). Более эффективны в эксперименте полусинтетические казеиновые соединения поливалентных металлов. Их включение в метаболизм до введения ^{137}Cs ведет к резкому снижению выхода свободных радикалов и снижает тем самым разрушение липидного слоя мембран, блокаду тиоловых ферментов и другие радиационные поломки. Помимо захвата фотонов, не меньшее значение в радиозащитном эффекте здесь принадлежит и донорским добавкам (ионметаллов) цитохромной системе, гашению реакций ПОЛ. Подтверждением может служить введение в состав пищи экспериментальных животных солей кобальта с содержащей этот микроэлемент зеленой капустой. Последующее облучение абсолютно летальной дозой ведет тем не менее к выживаемости 15—60 % числа подопытных животных. Основные источники «мишеней» представлены в табл. 7.8.

Закономерным эффектом внутриклеточной фильтрации и снижения энергии излучений будет и подавление эффектов двуниевых (необратимых) разрывов ДНК с последующим необратимым генным дефектом, завершающимся формированием радиационно индцированного рака. К таким достоверно регистрируемым в эксперименте эффектам ведет включение в питание и метаболизм селена (и, несомненно, других металлов). На фоне «мишеней» эффекты от модельного воздействия факторов, характерных для последствий радиационных аварий, резко снижаются. Аналогичны реакции и при введении в организм естественных металл-

содержащих биологических субстратов, кобальт-, никель-, железо-, кремнийсодержащих соединений. При построении экспериментальных микроэлементсодержащих диет и особенно при их дополнительном витаминном обеспечении средняя продолжительность жизни облучаемых животных резко растет. Расчетное увеличение средней продолжительности жизни человека (при определенной схеме переноса результатов) достигает при таких диетах 6,5—7 лет.

Достоверные реакции защиты прослеживаются не только в острых, но и хронических экспериментах, о чем наглядно свидетельствует введение «азросила» — кремнийсодержащего препарата мышам, помещенным в среду с резко повышенным содержанием ^{137}Cs , ^{90}Sr . Внутриклеточный метаболизм препарата на протяжении 7 сут ведет к восстановлению иммунной и суммарной резистентности животных до нормальных значений. К аналогичным последствиям ведут и включенные в метаболизм металлсодержащие флавопротеиды (в том числе и пигменты).

Не менее иллюстративны противоположные реакции. Искусственное выращивание штаммов микрофлоры при резко ограниченном поступлении в клетку железосодержащих компонентов питания ведет к резкому повышению чувствительности к ра-

Таблица 7.8

Основные источники «мишеней»

Наименование продукта	Содержание, мкг на 100 г продукта		
	Fe	Co	Cu
Ячмень	7400	7,9	470
Овес	5530	8,0	600
Гречиха	8270	3,6	660
Чечевица	11 770	11,6	660
Фасоль	5940	18,7	580
Горох	7000	8,6	590
Мак	26 000	18,0	1771
Халва	26 000	—	—
Печень свиная	20 200	12,0	3000
Тетереvятина	6700	32,0	230
Печень цыплят	1300	15,0	404
Печень куриная	1750	15,0	386

диационным воздействиям. Хронический дефицит поступления железа в организм ведет к повышенной чувствительности населения к относительно низким дозам радиационных воздействий. Пробная коррекция питания детей на радиоактивных территориях введением в рацион железосодержащих продуктов (гречневая каша) на фоне контрольного питания с банальной (сложившейся в настоящем) железодефицитной диетой выявляет достоверные различия в суммарных показателях здоровья исследуемых групп детей.

К не менее эффективной группе «мишеней» относятся (З. Бак) серосодержащие (тиоловые) ферменты, повреждение которых описывается концепцией радиолита воды клеток, образования радикалов и блокадой тиоловых SH-групп посредством образования дисульфидных связей. Очевидно, что введение в клетку дополнительных тиоловых групп как акцепторов («мишеней» радикалов) должно вести к подавлению радиогенных реакций ПОЛ. Многолетние исследования (Э. Я. Граевский, 1969) выявили достоверную связь между содержанием в тканях тиолов и снижением радиочувствительности животных. Эффективность «мишеней» — перехватчиков побочных продуктов ПОЛ не снижается и при поступлении в организм таких тиолосодержащих белков, как гистамин, тирамин, триптамин. Защита резко усиливается при снижении оксигенации тканей (при «кислородном дефиците»). С излагаемых позиций это объяснимо как следствие устранения дефицита цитохромов при повышенном поступлении в клетку ведущего источника радикалов, несвязанного (при дефиците ферментов) кислорода. К числу достоверных нефармакологических разнотекторов этого ряда следует отнести продукты с максимальным содержанием серы (табл. 7.9).

К одной из наименее апробированной, но наиболее эффективной относится (доказанная в эксперименте) ионная защита (В. В. Спиридонов, 1976), о которой незаслуженно умалчивается как в научной, так и в популярной литературе. Автор считает, что

Таблица 7.9

Серосодержащие пищевые продукты

Продукт	[S], мг/100 г	Продукт	[S], мг/100 г
Пшеница	107	Мясо (говядина)	230
Какао	80	Почки (говяжьи)	200
Молоко	90	Индейка	250
Лук репчатый	65	Яйца (куриные)	180
Лисички	40	Рыба	180--200

разрушающим началом биологического действия радиации (на уровне клеток) является прежде всего разрушение нормального ионного потенциала внутриклеточных мембран — поля биологических реакций расщепления и синтеза клеточных структур. Немалую роль в этих процессах обмена играет упорядоченный мембранный транспорт (калий-натриевый перенос) ионов. Облучение вносит хаос в эту упорядоченность. В норме на любой биологической мембране преобладают отрицательные ионы, а ионный электрический потенциал любой здоровой клетки должен быть отрицательным. Положительный потенциал — атрибут больных клеток (с утраченной функциональной активностью, раковых). Во время и непосредственно после облучения на мембранах облучившихся клеток также преобладает положительный потенциал. Если его вовремя «снять» — действие радиации резко снижается. Сделать это можно, помещая организм в среду, насыщенную отрицательными ионами. Ионы воздуха, проникая в кровь через легочный кровоток, разносятся по всему организму, корректируя таким образом ионные потенциалы клеточных мембран. Для эффективной защиты этого ряда следует рекомендовать прогулки в чистом хвойном лесу либо специальную ионизацию воздуха, обеспечивающую выход отрицательных ионов.

Эффективность ионной защиты иллюстрируется и противоположными примерами. Известно, что нормальный транспорт электронов в клетках резко нарушается при мощных геомагнитных бурях. Частое искажение этого процесса в условиях Крайнего Севера, отличающегося высокой частотой геомагнитных бурь, ведет к нарушениям, близким к радиационным. Так, у норильчан эффекты пероксидного окисления липидов и разрушение мембран эритроцитов превышают контрольные (у новосибирцев) в три раза. В последующем искажения электронно-мембранных процессов выливаются в типичные для хронических радиационных воздействий изменения нервной и эндокринной систем, крови, иммунитета. Эффекты купируются соответствующим потреблением витаминов А, Е, и β-каротина.

К принципам радиационной защиты, ведущим в условиях профессиональных, но второстепенным при экосистемных воздействиях фактора, относится *защита временем, расстоянием, экранированием*.

Для осуществления *защиты временем* необходимо знать:

мощность дозы излучения от данного источника (например, от почвы);

дозу, принятую как допустимую для данной категории людей (п. 5.3);

реальное время пребывания вблизи источника облучения.

Задача *защиты временем* — расчет допустимой длительности пребывания вблизи источника (например, детей на улице).

Для решения ее необходимо:

выяснить, какова будет накопленная доза внешнего облучения при реальной длительности пребывания ребенка у источника — территории с известной (замеренной) мощностью γ -излучения; сравнить ее с допустимой (установленной) дозой;

снизить время пребывания до тех значений, при которых эта величина (доза, накопленная за год, например) будет допустима.

Пример. Мощность γ -излучения от почв поселка N составляет 50 мкР/ч; допустимая доза облучения 0,05 Р/год, среднесуточное время пребывания школьника на улице в году 6 ч.

Определяем, что мощность излучения за сутки составляет 12 000 мкР, в год — 438 000 мкР $\approx$ 0,44 Р. Мальчик, пребывая $\frac{1}{4}$ часть годового времени на улице, получает дозу 0,11 Р/год. Для снижения накопления дозы до допустимой необходимо уменьшить время пребывания мальчика на улице (у источника облучения) вдвое, предполагая, что помещение не является излучателем и источники внутреннего облучения отсутствуют.

Защита расстоянием. Для реализации этого принципа защиты необходимо знать состав облучения (виды ионизирующих излучений от источника радиации) и одну из важнейших характеристик фактора — длину пробега в воздухе. Цезий и стронций — основные источники радиации — являются мощными как γ -, так и β -излучателями. Пробег γ -квантов в воздухе исчисляется сотнями метров, поэтому в реальной обстановке, при пребывании школьника на улице, например, защита от γ -излучения малопродуктивна. Большую значимость этот принцип имеет при защите от β -частиц. Длина их пробега в воздухе достигает 2—3 м, но только для частиц с большими энергиями. Большая же часть бегущих электронов поглощается в приземном слое воздуха, как правило загрязненном взвесями пыли, что улучшает защиту.

Поэтому уже при нормальном вертикальном положении тела поглощенная доза внешнего (суммарного) облучения резко снижается. Если учесть склонность мальчиков, особенно младших классов, к играм, связанным с непосредственным соприкосновением с поверхностью Земли, то этим и можно объяснить их выявленную большую чувствительность к радиации.

Для реализации принципа защиты расстоянием необходимо максимально избегать игр, труда, спортивных занятий, связанных с горизонтальным положением тела на поверхности Земли. Защита временем, расстоянием должна вестись в сочетании с защитой экранированием.

Защита экранированием является наиболее эффективным способом защиты от внешнего γ -излучения. Мощность потока этого вида радиации снижается пропорционально квадрату расстояния (метры) от источника (поверхности Земли) и кратности ослабления излучения материалом, расположенным на пути потока кван-

тов, между источником и облучаемым (экраном). Кратность ослабления (эффективность защиты экраном) можно рассчитать по формуле:

$$D_n = 0,01 P_1 / (RK),$$

где D_n — поглощенная доза гамма-излучения, Р/год; P_1 — мощность излучения с поверхности Земли, мкР/ч; R — расстояние от поверхности Земли до источника излучения, м; K — кратность ослабления γ -излучения экраном (строительным материалом здания).

Пример. Мощность излучения с поверхности Земли в поселке N равна 50 мкР/ч. Принятая допустимая доза облучения равна 0,05 Р/год. Семья живет в кирпичном доме на первом этаже, поэтому величину R (расстояние от источника) можно не учитывать (принять равной единице). Кратность ослабления потока гамма-квантов «средним» строительным материалом равна 10.

При расчете получаем:

$$D_n = 50 \cdot 0,01 / 10 = 0,05 \text{ Р/год.}$$

Полученная величина укладывается в принятые «Нормы», но должна быть тем не менее снижена, поскольку дозы (см. предыдущий пример), получаемые вне помещения, значительно выше. В случае, если жилье будет расположено на высоте 3 м от уровня земли, на втором этаже (просчитайте самостоятельно) доза снизится в 9—10 раз (до 0,005 Р/год).

Расчеты показывают, что при равных размерах радиоактивной загрязненности местности жители сельских населенных мест, пригорода будут получать значительно большие дозы внешнего облучения по сравнению с городскими, проводя значительное время вне дома и проживая в деревянных одноэтажных зданиях.

Вопросы для самоконтроля

1. Что включается в медико-административные меры защиты?
2. Как происходит фармакодиетическая коррекция напряженности адаптационных энергетических реакций клеточного уровня?
3. Как осуществляется фармакодиетическое снижение риска повреждения клеточных мембран?
4. Каким образом происходит фармакодиетическая коррекция напряженности иммунной и нейроэндокринной систем?
5. Расскажите о противорадиационной защите введением стабильных конкурентов радионуклидов, загрязняющих среду.
6. Как выполняется противорадиационная защита введением мишеней квантово-корпускулярных излучений?
7. Что представляет собой ионная защита?
8. Охарактеризуйте защиту расстоянием, временем, экранированием.

Хроника некоторых событий, связанных с возникновением и развитием ядерной физики, а также радиационной гигиены и экологии

Год	Ученый, страна	Событие
1869	Д. И. Менделеев, Россия	Открытие Периодического закона строения и свойств вещества, положившее начало целенаправленному поиску расщепровки структуры атома, ядра, открытий предсказанных автором неизвестных ранее (в том числе радиоактивных) элементов
1896	А. Беккерель, Франция	Открытие проникающего в вещество самопроизвольного, не требующего предварительного накопления энергии (света, тепла, электрического заряда, нагревания) излучения от солей урана. Излучение оказалось более интенсивным непосредственно от металла и не снижалось на протяжении года, что указывало на скрытую в веществе постоянную новую энергию
1898	Пьер и Мария Кюри, А. Беккерель, Франция	Положено начало цепи открытий вероятных (по Менделееву), но неизвестных ранее радиоактивных элементов — Po, Ra, Th (Резерфорд, 1900), радиоактивного свинца (К. Гофман, 1901), короткоживущих изотопов (Резерфорд, 1904), завершившихся (А. Демпмер, 1935) открытием самопроизвольного нейтронного излучателя — урана-235
1902	Н. Фрибек, Канада	Накоплены данные о радиационных ожогах. Описан первый случай лучевого рака кожи
1904	Нагаока, Япония	Предложена протонно-электронная модель атома
1905	А. Эйнштейн, Германия	Математическое доказательство эквивалентности массы и энергии вещества ($E = mc^2$), предполагающее сосредоточение громадных энергий в ядрах атомов
1905	П. Кюри, Франция	Обобщены данные по практически обязательным для пионеров исследований и практики использования радиоактивности радиационным отчетам. Составлен эксперимент (на себе) по радиационным поражениям (аппликация радиоактивных веществ на кожу предплечья). Описана последовательность формирования рецидивирующих радиогенных трофических язв

1909	Д. Стремгольм, Швеция	Систематизированы радиоактивные вещества и их идентичные по химическим свойствам нерадиоактивные аналоги. Высказано предположение о вероятности перехода вещества из нестабильного в стабильное состояние
1911	Э. Резерфорд, Англия	Обоснована ядерно-орбитальная протонно-электронная модель атома, предложенная ранее Нагаока. Объединены (А. Брук, Голландия, Г. Мозли, Англия) порядковый номер элемента, протонная структура ядра, химические (электронно-валентные) свойства атома воедино связанные характеристики вещества
1913	Н. Бор, Англия	Выдвинуту предположение о существовании нейтронов, описана протонно-нейтронная модель ядра
1920	Э. Резерфорд, Англия	Обосновываются протонно-нейтронные различия строения ядер, определяющие наличие изотопов (на примере дейтерия), изомеров (И. В. Курчатов, 1935) и предполагающие возможность ядерного деления с высвобождением энергии (Н. Бор, 1936)
1928	Швейцария (Женева)	Формируется Международная комиссия по защите от рентгеновских лучей и радия, обобщавшая последствия и выдвинувшая теоретические положения радиационных воздействий: возможность смерти от излучений (Е. С. Лоидон, 1903), дегенерация половых функций в эксперименте (А. Шонберг, 1905) и у работников по производству рентгеновых трубок, торможение клеточного деления (Корнике, 1905), связь зависимости радиочувствительности и последствий радиационных поражений от скорости деления клеток облучаемых тканей (И. Бергонье, Л. Трибондо, 1906), связь с частотой дегенерации ядра (Ф. Дессаур, 1922), теория «мишени» и мутагенеза (Н. В. Тимофеев-Ресовский, 1928)
1932	Дж. Чедвик, Англия	Открытие нейтрона, позволившее в последующем осуществлять деление урана (Т. Ганн, Ф. Штрассман, Германия, 1938), теоретически описать цепную реакцию деления с выделением громадной энергии 200 МэВ на 1 ядро (Я. Б. Зельдович, И. Б. Харитон, 1939), подтвержденную в эксперименте (Т. Ганн, Германия, 1939)
1934	Э. Ферми, Италия	Описаны теоретические основы и закономерности ядерных превращений элементов группы урана при бомбардировках нейтронами
1936	Германия (Гамбург)	На памятникке одному из пионеров медицинской радиологии Г. Е. Альбере-Шонбергу, погибшему от лучевого рака, высечено 169 фамилий жертв радиационных поражений, в том числе Бергов, Левин-Дорн, Марин, Ирен, Фредерика Жолио-Кюри и др.

Год	Ученый, страна	Событие
1939	Ф. Перрен, Франция	Введено понятие критической массы радиоактивности вещества, предсказавшее создание атомного оружия
1940	Э. Ферми, США	Экспериментально осуществлен пуск цепной реакции в критической массе урана-238, обогащенного нейтронным излучателем, ураном-235. Осуществлена реакция выделения урана-235 из естественной смеси изотопов
1942	Э. Ферми, США	(Под трибунами университетского стадиона в Чикаго пущен первый в мире ядерный реактор, доказавший возможность осуществления управляемой цепной реакции и получения плутония, необходимого для создания атомной бомбы. Строятся пять военных реакторов в штатах Тенесси, Вашингтон (1943), проводится первое испытание атомного оружия (1945) в Лос-Аламосе (Алемогордо)
1945	США (Пентагон)	Первое преднамеренное разрушение городов Хиросима — 06.08.45 г. (убито и ранено свыше 140 тыс. жителей) и Нагасаки — 08.08.45 г. (убито и ранено свыше 75 тыс. жителей).
1945	Россия	Первое глобальное вмешательство в радиационно-экологическое равновесие среды Создана первая специальная радиологическая лаборатория в НИИ гигиены труда и профессиональных заболеваний АМН СССР с последующей реорганизацией в сектор радиационной гигиены
1946	И. В. Курчатов, Россия	Пущен первый в Европе и Азии ядерный реактор Ф-1
1949	США, Россия, Англия, Франция, Китай	Развертываются продолжавшиеся до 1963 г. наземные ядерные испытания на полигонах в штате Невада (США, Англия), под Семипалатинском, на о. Новая Земля (Россия), Лобнор (Китай). Строятся предприятия по производству и хранению ядерного оружия, отводятся места захоронения отходов ядерного производства (Сибирь, Северные моря, глубоководные впадения Тихого океана, отработавшие шахты и др. Глобальное загрязнение среды оценивается в 26 МКв по ^{137}Cs , 20 МКв по ^{90}Sr
1950	Швейцария (Женева)	Реорганизация основанной в 1928 г. комиссии по радиационной защите (МКРЗ). Анализ последствий воздействия радиационной загрязненности среды на 284 тыс. жителей Хиро-

1953	Россия	сумы, Нагасаки. Выявление незначительной «избыточной» лейкемии. Отказ от соматотропных радиогенных реакций при воздействии малых доз. Принятие концепции порога соматических реакций, предельно допустимых доз радиационных воздействий и стохастических маловероятных беспороговых канцерогенных и генетических действий малых доз радиации через повреждение генов типа клеток (теория «мишеней»)
1954	Россия (Обнинск)	Принят первый в стране официальный документ по нормированию радиационных воздействий
1955	Н. В. Тимофеев-Ресовский, Россия	Пушина первая в мире АЭС, положившая начало ядерной энергетике мира и включению радиационного фактора в состав плановых допустимых загрязнений среды. К 2000 г. ориентировочное число работающих энергетических реакторов равно 350 при 13%-ном вкладе в суммарную мощность вырабатываемой электроэнергии
1957	Россия (Южный Урал, ПО «Маяк»)	Положено начало радиационной экологии. Впервые выявлено радиогенное расслоение эволюционно согласованных внутрибиocenозных межвидовых взаимодействий
1957	Англия (Уиндскейл)	Тепловой взрыв ядерных хранилищ. Радиоактивное загрязнение Челябинской, Свердловской, Тюменской области. Образование «Восточно-Уральского радиоактивного следа» общей площадью 23 тыс. км ² , дополняемого просачиванием в среду радиоактивности могильников радиоактивных отходов
1957	Россия (Ф. Г. Кротков, Россия)	Авария на АЭС. Цезий-стронциевое загрязнение среды
1960	США	Организация общероссийской системы подготовки врачей по вопросам радиационной безопасности. Создание первой в стране кафедры на базе Московского института усовершенствования врачей и постановка исследований в области радиационной гигиены
1961	США	Национальной лабораторией зарегистрирована достоверно повышенная частота лейкемий и раковых опухолей в группах японского населения, перенесших ядерную бомбардировку
		Авария на национальной станции испытаний ядерных реакторов на энергетическом реакторе SL-1 с расплавлением топлива, гибелью операторов и выбросом радиоактивности в среду. Начало развернутой кампании по исследованиям «эффектов Цетко» — связи радиоактивности с гибелью лесов, ростом нарушений здоровья, дефицитом интеллекта школьников, преступностью и др.

Год	Ученый, страна	Событие
1971	Э. Штернгласс, США	Обнаружено 100-кратное превышение фоновой радиоактивности среды на территории, прилегающей к АЭС Шиппнг-порта (р. Огайо). Установлена связь роста рака с радиоактивной загрязненностью. Выявлены аналогичные ситуации при эксплуатации нескольких десятков маломощных исследовательских реакторов университетов страны
1979	Англия (Уиндскейл)	Аварийный выброс в среду ^{137}Cs и ^{90}Sr от заводов по переработке ядерного топлива
1979	США (Три-Майл-Айленд)	Авария на АЭС с радиоактивным загрязнением среды и расчетной поглощенной дозой порядка 1300 чел.·Зв. Прослежена задержка регрессии младенческой смертности в Англии и США, характерной для других стран, на загрязненных от радиоактивных выбросов территориях
1980	Франция (Сант-Лаурент)	Выброс радиоактивных продуктов в окружающую среду без превышения дозового предела для населения, но потребовавшего необходимости контроля уровня загрязнения продуктов питания
1986	Россия	Авария на Чернобыльской АЭС. Радиоактивная загрязненность с плотностью $> 1 \text{ Ки/км}^2$ на территории 12 областей с числом жителей 2 млн 860 тыс. человек. Глобальное загрязнение среды. Появление радионуклидов аварийного происхождения в Швеции, Финляндии, Польше, Германии, Италии (27 — 30 апреля); Франции, Бельгии, Голландии, Англии, Греции (2 — 3 мая); Израиле, Турции, Кувейте, Японии, Китае, Индии, Канаде и США (5 — 6 мая). Послужила причиной появления официальных данных о скрываемой дочерней радиоактивной загрязненности ряда городов (в том числе Москвы) от маломощных исследовательских реакторов, мест непланового захоронения радиоактивных отходов, НИИ и др. Начало кампаний по консервации радиационных, в том числе и ядерно-энергетических, технологий
1989	Испания (Банделлос)	Выброс в окружающую среду радиоактивных продуктов выше допустимого суточного уровня

Элементы физических представлений

Атом — конечная структура вещества, сохраняющая его химические свойства. По модели Резерфорда-Бора (1913) атом состоит из незначительной по массе электронной оболочки диаметром 0,1 нм, в центре которой, в малом объеме диаметром 10 фм и составляющем 10^{-4} диаметра атома, сосредоточена основная масса вещества с плотностью $10^8/\text{см}^3$.

Электрон — элементарная частица, открытая Томпсоном в 1897 г. Число электронов и структура электронных оболочек атомов соответствует протонной структуре ядра, местоположению в Таблице Менделеева — атомному номеру (Z) вещества. Внешняя, легко изменяемая по числу электронов, валентная электронная оболочка определяет химические свойства вещества. Масса орбитального (движущегося) электрона $m_e = 10^{-27}$ г. Масса покоя равна $9 \cdot 10^{-28}$ г. Заряд электрона ($1,6 \cdot 10^{-19}$ кл) принят равным -1 .

Протон — частица ядра, открытая Резерфордом в 1911 г. Масса протона более чем в 1500 раз превышает m_e и равна $1,6725 \cdot 10^{-24}$ г при равных по величине, но противоположных по знаку зарядах. Суммарный протонный заряд ядра (атомный номер, Z) уравнивается зарядом электронов. При утрате электрона с внешней электронной оболочки атом приобретает положительный заряд, превращаясь в химически агрессивный ион. Ионами отрицательного знака в веществе являются свободные (не связанные с орбитами атомов) электроны.

Нейтрон — не имеющая заряда частица ядра, открытая в 1932 г. Дж. Чедвиком. Размер и масса нейтрона несколько выше (на $2,5 m_e$) размера и массы протона. Рассматривается как нестабильная совокупность равных по величине отрицательно и положительно заряженных частиц. При испускании электрона нейтрон превращается в протон. Считается начальной (составляющей первичное протоно-нейтронное облако) частицей эволюции вещества во Вселенной. Время жизни в свободном состоянии 16 мин. В ядре, в составе протоно-нейтронных пар стабилен. Сумма масс протонов и нейтронов ядра называется массовым числом (A). Z вещества пишется слева знака вещества, внизу, A — слева знака вещества, сверху.

Мезон — разновидность адрона (элементарной частицы ядра) с массой, составляющей 200 m_e . Осуществляют сильные внутриядерные взаимодействия, формируя стабильные протоно-нейтронные пары, нуклоны. Ядра атомов элементов с порядковым номером до 20 стабильны только при четном (нуклонном) соотношении элементарных частиц. В ядрах с большим порядковым номером число нейтронов увеличивается, и стабильность осуществляется за счет дополнительных (более слабых) межнейтронных мезонных взаимодействий. После определенного порога дополнительных (внеядерных) нейтронов ядро становится нестабильным — радиоактивным.

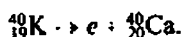
Радиоактивность. Ядра, имеющие одинаковый порядковый номер, но разные, как правило, за счет избыточного числа нейтронов, массовые числа, называются изотопами. Изотопы (радионуклиды), дополнительная внеядерная масса ядер которых превышает границы связывающих (адроновых) сил, распадаются, превращаясь в более стабильные изотопы. Распад сопровождается выделением энергии в виде фотонных и корпускулярных излучений и называется радиоактивностью. Различают пять типов радиоактивного распада:

1. *Радиоактивный (многоступенчатый) α -распад*, характерный для «радиационных часов» планеты, отсчитывающих время ее образования и эволюции урана, радия, тория:



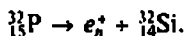
протекает с выбросом из ядра атома ядер гелия (α -частиц) с энергией порядка 6 МэВ и последующим γ -излучением из вновь сформировавшихся «остывающих» ядер. Образовавшийся радон ($^{222}_{86}\text{Rn}$) повторно излучает α -частицы, превращаясь в полоний, завершающий α -распад которого ведет к образованию стабильного свинца.

2. *Электронный β -распад* характерен для большинства естественных, а также ряда искусственных радионуклидов, относящихся к группе ядерно-энергетических загрязнителей среды. Один из нейтронов, составляющих нестабильную нейтроно-нейтронную пару, выбрасывает (на примере $^{40}_{19}\text{K}$) электрон с энергией порядка 0,5 МэВ, преобразуясь в протон и меняя тем самым Z вещества:



Ядро «остывающего» образовавшегося стабильного кальция (в структуре ядра появился протон, взаимодействие которого со свободным ядерным нейтроном ведет к формированию нуклона) испускает γ -квант.

3. *Позитронный β -распад*, при котором массовое число остается неизменным, характерен для распространенного в лабораторной практике радиоактивного фосфора:



Аннигиляция позитрона с одним из электронов среды ведет к высвобождению энергии в виде γ -квантов.

4. *K-захват (захват орбитального электрона ядра)* — превращение, характерное, как и в предыдущем случае, для лабораторных «университетских» загрязнителей среды:



Возбужденное, захватившее электрон ядро является здесь источником характеристического (рентгеновского) излучения.

5. *Деление ядер*, характерное для радиоактивных элементов с большими массовыми числами (урана, плутония и др.), происходит под воздействием (захвата ядром) медленных нейтронов. Естественное деление урана, судя по исследованиям в урановых рудниках Окло в Габоне (Африка), происходило около 1,8 млрд лет назад, при concentra-

ции ^{235}U — нейтронного излучателя в смеси металлов порядка 3 % (вместо современных 0,7 %). На достоверность таких реакций указывает и равномерное распределение в «дораднационной» среде стронция-88, циркония-90, образующихся при делении урана-235.

При делении ядра происходит выброс громадных энергий всех спектров и образование осколков ядерного деления:



которые с избыточным числом нейтронов в ядре претерпевают несколько последовательных β -распадов:



до превращения в стабильный изотоп циркония.

Среднее распределение энергии, МэВ, при делении одного ядра тяжелого элемента:

Кинетическая энергия нейтронов	5
Кинетическая энергия продуктов деления	165
Энергия γ -излучения	8
Энергия нейтрона	11
Энергия распада продуктов деления	11
Итого	200

Радиоактивный распад, независимо от его вида, вещества и состояния среды, в которых происходят ядерные превращения (температуры, давления, химических и биологических взаимодействий), подчиняется экспоненциальному закону: число распадающихся в данный момент времени ядер пропорционально общему количеству нестабильных ядер в веществе, что ведет к снижению скорости распада по мере снижения их числа (или за равные промежутки времени распадаются равные доли атомов). Период полураспада (T) — время, за которое радиоактивность загрязненной среды снижается вдвое при соответствующем снижении скорости процесса. (Заметим, что радиоактивность и скорость распада лишь стремятся к нулю, никогда не достигая этой величины).

Величина радиоактивности определяется количеством радиоактивных распадов за определенный период. Единица радиоактивности в системе СИ — беккерель (Бк). 1 Бк — количество радиоактивного вещества, в котором происходит одно ядерное превращение в секунду. Внесистемной (но распространенной) единицей является кюри (Ки). 1 Ки — количество радиоактивного вещества, в котором происходит $3,7 \cdot 10^{10}$ ядерных превращений в 1 с. Для обозначения больших либо меньших величин, производных от указанных единиц, используются следующие приставки:

экса (Э) — 10^{18}	санти (с) — 10^{-2}
пэта (П) — 10^{15}	милли (м) — 10^{-3}
тера (Т) — 10^{12}	микро (мк) — 10^{-6}
мега (М) — 10^6	нано (н) — 10^{-9}
кило (к) — 10^3	пико (п) — 10^{-12}
деци (д) — 10^{-1}	фемто (ф) — 10^{-15}

Определенным образом скорость распада связана с массой вещества (табл. П.2.1). Чем выше эта величина, тем в меньшей массе заключена радиоактивность. Такая закономерность показывает, что ничтожный по массе радиоактивный выброс (^{131}I , например) при авариях на АЭС может вести к формированию массивной, но недолгосрочной радиоактивной загрязненности среды.

Ионизирующее излучение, испускаемое в процессе распада, состоит из потока частиц и квантов электромагнитных излучений, которые проходя через вещество, приводят к ионизации и возбуждению его атомов и молекул. Основными характеристиками излучений (табл. П.2.2 и П.2.3) являются: энергия, сообщаемая частице (фотону) при выбросе из ядра, длина пробега в воздухе (от источника), глубина проникновения в биологическую ткань (от точки начала взаимодействия) и относительная интегративная величина, коэффициент качества (КК), характеризующий биологическую агрессивность данного излучения по сравнению с эталонным при равных поглощенных дозах (за единицу принята величина эталонного γ -излучения от радия).

Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом биологических тканей, несмотря на различие первичных механизмов взаимодействий, однотипно и сводится к «выбиванию» электронов электронных оболочек атомов (молекул) вещества. Реакции, характерные для реальных радиационно-экологических ситуаций, могут быть описаны через фотоэффект, Комптон-эффект и эффект образования пар.

Фотоэффект характерен для фотонов с энергией порядка 40 кэВ при постепенном (экспоненциальном) снижении его доли в сумме взаимодействий с ростом энергии фотонов до 1,02 МэВ и выше, где вероятность этого типа реакций близится к нулю. До 90—99 % фотонов при фотоэффекте рассеиваются в биологической ткани, возбуждая электронные оболочки и химическую активность молекул. Часть фотонов (1—10 %) при взаимодействии с внешней (валентной) орбитой срывает электрон, сообщая ему кинетическую энергию, равную примерно половине начальной энергии фотона (от 20 до 90 кэВ при взаимодействии с излучением от радионуклидов ядерно-энергетического происхождения). Энергия таких фотоэлектронов (а также β -частиц аналогичных энергий) до-

Таблица П.2.1

Связь радиоактивности вещества с массой и периодом полураспада

Радионуклид	Период полураспада	Масса активности 1 Ки, г	Активность 1 г радионуклида, Ки
^{40}K	$1,32 \cdot 10^9$ лет	$1,5 \cdot 10^5$	$6,8 \cdot 10^{-6}$
^{235}U	$7,04 \cdot 10^8$ лет	$4,8 \cdot 10^5$	$2,1 \cdot 10^{-6}$
^{90}Sr	29,12 лет	$6,9 \cdot 10^{-3}$	$1,45 \cdot 10^2$
^{137}Cs	30,0 лет	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$8,7 \cdot 10^2$
^{131}I	8,04 сут	$8,1 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^5$

Характеристики ионизирующих излучений

Излучение	Энергия, МэВ	Длина пробега в воздухе, м	Глубина проникновения в биологические ткани, мм	Коэффициент качества (КК)
α - (потoki ядер гелия, вторичное излучение при взаимодействии с нейтронами)	4	0,025	0,031—0,037	20
	8	0,07	0,9—1,5	20
	10	0,11	1,2—1,3	20
Нейтронное	0,02—0,1	100n	100n	3
	0,1—10			10
β - (потoki электронов либо позитроно-ядерного происхождения)	0,5	0,6	1,5—1,8	1
	1	3,9	4,4—5,5	1
	2	8,7	9,0—10,0	(3)

статочна для вторичного рассеянного возбуждения и химической активации молекулярных структур.

Комптон-эффект, доля которого близится к нулю при 40 кэВ и преобладает (90—99 %) при энергиях фотонов > 1 МэВ, заключается в разрушении двух-трех электронных оболочек атома (молекулы) на один фотон. Энергию фотона перехватывают электроны, продолжающие движение квантов в среде с энергией, равной половине от начальной энергии фотона. Такие электроны (и аналогичные ему β -частицы высоких энергий) сталкиваются в среде (тканях), как правило, с 10^3 — 10^4 молекулами по треку пробега. Большая часть таких молекул ионизируется и,

Таблица П.2.3

Характеристики квантовых излучений

Излучение	Энергия, МэВ	Коэффициент передачи энергии		Коэффициент качества (КК)
		в воздухе	в биологических тканях	
γ - (рентгеновское излучение)	0,1	0,85	0,039	1
Фотонное «остывающих» ядер	0,5	0,09	0,032	
Аннигиляции, при торможении частиц	1	0,06	0,029	

в случае недостаточной электронной (отрицательно-ионной) насыщенности клеточной среды, теряет свою начальную структуру вследствие случайных внутримолекулярных «сшивок».

Эффект образования пар характерен для фотонов с энергией, перешагивающей за границу 1,02 МэВ (максимум при энергиях 10 МэВ) и маловероятен от типовых излучений ядерно-энергетического происхождения. Фотон, не взаимодействуя с электронной оболочкой, проникает в ядро, возбуждение которого ведет к выбросу электроно-позитронной пары, ее аннигиляции и вторичному мощному гамма-излучению, ведущему к цепи эффективных молекулярных разрушений облученной ткани.

Энергия электронов в «пакетах» взаимодействия с фотонами, кэВ:

От рентгеновского и вторичного космического излучения	—	—	—	—	30	20	10
От источников ²²⁶ Ra и дочерних реакций	208,6	116,7	69,9	44,3	29,8	22,1	15,5
От ¹³⁷ Cs	238,8	131,9	77,1	48,6	32,4	22,7	16,5
Гамма-излуче- ние при ядер- ных взрывах	693,7	302,3	190,9	107,8	64,9	41,6	17,7

указывает на рост риска разрушения биологических структур при включении в среду техногенных радиоактивных излучателей.

Нейтронное излучение, мощность потока которого растет с подъемом на высоту, продвижением к полюсам и местам залежей урановых руд, не взаимодействует с электронными оболочками молекул, что резко увеличивает проникающую способность и биологическую эффективность этого составляющего фоновых радиационных воздействий. Столкновение нейтронов с ядрами характеризуется здесь большим разнообразием реакций и зависит от структуры ядер реагирующих молекул, энергии нейтронов и других особенностей совокупности реакций, ведущих к образованию составного ядра либо прямым ядерным реакциям.

Включение нейтрона в состав ядра при его столкновении с частицей переводит ядро в сильно возбужденное состояние. Существование образовавшегося (составного) ядра $\sim 10^{-17}$ с завершается испусканием одного или нескольких γ -квантов и заряженных частиц (электронов, протонов) — в зависимости от структуры ядра и энергии взаимодействия.

При прямых ядерных реакциях (характерных для нейтронов с энергией > 20 МэВ) нейтрон сталкивается и взаимодействует с одним из нуклонов ядра либо вовлекает в процесс все ядро с последующим его движением в среде. Взаимодействие возбужденных ядер сопровождается выделением высоких энергий, упругими соударениями, рассеянием нейтронов ядрами среды и радиационным захватом нейтронов.

При упругих соударениях нейтрон теряет часть своей энергии, которая переходит в кинетическую энергию ядра отдачи (приобретающего в среде взаимодействия свойства α -частицы).

Радиационный захват нейтронов ядрами ведет к формированию короткоживущих радионуклидов (в естественных условиях преимущественно ^{14}C и трития).

В целом нейтроны, эффективно проникая в биологическое вещество, инициируют цепь диффузных вторичных корпускулярных и квантовых излучений от ядер взаимодействия, конечный эффект которых описывается через приведенные реакции электронных оболочек.

Степень опасности радиационных воздействий оценивается по величине дозы излучения. Различают экспозиционную, поглощенную и эквивалентную дозы, которые, в свою очередь, в зависимости от их отношения к отдельному органу, организму в целом, группам людей, подразделяются на эффективные индивидуальные и коллективные.

Экспозиционная доза — доза фотонного излучения, ведущая при прохождении через воздух в условиях электронного равновесия к формированию суммарного электронного заряда ионов (одного знака), отнесенного к массе (объему) облученного воздуха. Единицы измерения: в СИ — кулон на килограмм (Кл/кг), внесистемная — рентген (Р): $1\text{Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$.

Поглощенная доза — средняя энергия ионизирующего излучения (любого состава), переданная массе вещества. Принятая (предпочтительная) единица в СИ — грей (Гр). 1 Гр — это доза ионизирующего излучения, передающая (сообщающая) энергию в 1 Дж (джоуль) массе вещества в 1 кг. Внесистемная единица — рад. 1 рад — доза ионизирующего излучения, передающая энергию 100 эрг массе вещества 1 г. 1 Гр = 100 рад.

Соотношение экспозиционных и поглощенных доз: $1\text{Р} = 0,93 \text{ рад} = 0,93 \cdot 10^{-2} \text{ Гр}$ (для биологической ткани).

Эквивалентная доза — произведение поглощенной дозы ионизирующего излучения на соответствующий (средний, в случае многоспектральных воздействий) коэффициент качества (КК) Единица измерения: в СИ — Зиверт (Зв). 1 Зв = 1 Гр · КК; внесистемная — бэр (биологический эквивалент рад). 1 бэр = 1 рад · КК. 1 Зв = 100 бэр.

Расчет эквивалентных доз хронических экосистемных воздействий по принятым коэффициентам (см. табл. П.2.2) вызывает сомнения вследствие равенства принятых величин КК для фотонов разных энергий. Различия тем не менее прослеживаются уже на физическом уровне взаимодействий (табл. П.2.4). Очевидно, что количество фотонов, идущих на

Таблица П.2.4

Число фотонов, необходимое для формирования дозы в 1 сГр

Источник	Энергия, кэВ	Число, млн
Рентгеновское и фоновое излучение	30	208
^{226}Ra и дочерние продукты распада	596	105
^{137}Cs	662	94
γ -излучение при ядерном взрыве	1608	388

формирование одной и той же дозы, разное, и изучение ядерно-энергетического происхождения эффективнее фоновых воздействий, как минимум на порядок.

Для оценки ущерба здоровью при неравномерном (в том числе и внутреннем) облучении человека радионуклидами с избирательной тропностью к тем или иным тканям введено понятие эффективной эквивалентной дозы, необходимой для оценки риска формирования злокачественных новообразований (стохастических эффектов). Эффективная эквивалентная доза $H_{эфф}$ рассчитывается по величине произведения эквивалентной дозы H_T , полученной органом, на принятый взвешенный коэффициент W_T , равный отношению ущерба облучения отдельного органа к ущербу облучения всего тела при равных эквивалентных дозах:

$$H_{эфф} = \sum W_T H_T.$$

Значения W_T для:

половых желез	0,25
молочных желез	0,15
красного костного мозга	0,12
легких	0,12
щитовидной железы	0,03
костей	0,03
остальных органов	0,3
всего тела	1

Для оценки ущерба здоровью от стохастических эффектов при облучении населения (персонала) используют величину коллективной эффективной дозы, равную произведению индивидуальных доз E_i на число лиц N_i , подвергшихся облучению:

$$S = \sum E_i N_i.$$

Принятая единица коллективной эквивалентной дозы — человеко-зиверт (чел. · Зв).

Термины и определения, используемые в Нормах радиационной безопасности (НРБ-99 СП 2.6.1.758-99 и СанПиН 2.6.1.802-99)

Авария радиационная проектная — авария, для которой проектом определены исходные и конечные состояния радиационной обстановки и предусмотрены системы безопасности.

Автоматизированное рабочее место (АРМ) рентгенолога — программно-аппаратный комплекс, обеспечивающий сбор, цифровую обработку, визуализацию и архивирование медицинских рентгенологических изображений.

Активность (A) — мера радиоактивности какого-либо количества радионуклида, находящегося в данном энергетическом состоянии в данный момент:

$$A = dN/dt,$$

где dN — ожидаемое число спонтанных ядерных превращений из данного энергетического состояния за время dt . Единица активности — беккерель (Бк).

Использовавшаяся ранее внесистемная единица активности — кюри (Ки) — составляет $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк.

Активность минимально значимая (МЗА) — активность открытого источника ионизирующего излучения в помещении или на рабочем месте, при превышении которой требуется разрешение органов госсанэпиднадзора на использование этих источников, если при этом также превышено значение минимально значимой удельной активности.

Активность минимально значимая удельная (МЗУА) — удельная активность открытого источника ионизирующего излучения в помещении или на рабочем месте, при превышении которой требуется разрешение органов госсанэпиднадзора на использование этого источника, если при этом также превышено значение минимально значимой активности.

Активность удельная (объемная) — отношение активности A радионуклида в веществе к массе m или объему V вещества:

$$A_m = A/m \text{ или } A_V = A/V.$$

Единица удельной активности — беккерель на килограмм, Бк/кг. Единица объемной активности — беккерель на метр кубический, Бк/м³.

Активность эквивалентная равновесная объемная (ЭРОА) дочерних продуктов изотопов радона — ^{222}Rn и ^{220}Rn — взвешенная сумма объемных активностей короткоживущих дочерних продуктов изотопов радона ^{210}Po (RaA); ^{214}Pb (RaB); ^{214}Bi (RaC) и ^{212}Pb (ThB); ^{212}Bi (ThC) соответственно:

$$(\text{ЭРОА})_{\text{Rn-222}} = 0,10 A_{\text{RaA}} + 0,52 A_{\text{RaB}} + 0,38 A_{\text{RaC}},$$

$$(\text{ЭРОА})_{\text{Rn-220}} = 0,91 A_{\text{ThB}} + 0,09 A_{\text{ThC}},$$

где A_i — объемные активности дочерних изотопов радона.

Аппарат рентгеновский — установка, включающая рентгеновский излучатель, электрическое питающее устройство, систему регулирования режима работы рентгеновской трубки, приемник излучения и штативные устройства.

Блок рентгенооперационный — подразделение рентгеновского отделения лечебно-профилактического учреждения, в котором хирургическое вмешательство проводится в сочетании с рентгенологическим исследованием.

Вещество радиоактивное — вещество в любом агрегатном состоянии, содержащее радионуклиды с активностью, на которые распространяются требования настоящих Норм и Правил.

Взвешивающие коэффициенты для отдельных видов излучения при расчете эквивалентной дозы (W_R) — используемые в радиационной защите множители поглощенной дозы, учитывающие относительную эффективность разных видов излучения в индуцировании биологических эффектов.

W_R^* для:

фотонов любых энергий	1
электронов и мюонов любых энергий	1
нейтронов с энергией:	
< 10 кэВ	5
от 10 до 100 кэВ	10
от 0,1 до 2 МэВ	20
от 2 до 20 МэВ	10
> 20 МэВ	5
протонов с энергией > 2 МэВ, кроме протонов отдачи	5
α -частиц, осколков деления тяжелых ядер	20

* Все значения относятся к падающему на тело излучению, а в случае внутреннего облучения — к испускаемому при ядерном превращении.

Взвешивающие коэффициенты для тканей и органов при расчете эффективной дозы (W_T) — множители эквивалентной дозы в органах и тканях, используемые в радиационной защите для учета различной чувствительности разных органов и тканей в возникновении стохастических эффектов радиации:

Гонады	0,20	Печень	0,05
Костный мозг (красный)	0,12	Пищевод	0,05
Толстый кишечник	0,12	Щитовидная железа	0,05
Легкие	0,12	Кожа	0,01
Желудок	0,12	Клетки костных	
Мочевой пузырь	0,05	поверхностей	0,01
Грудная железа	0,05	Остальное	0,05

Вмешательство — действие, направленное на снижение вероятности облучения, дозы или неблагоприятных последствий облучения.

Группа критическая — группа лиц из населения (не менее 10 человек), однородная по одному или нескольким признакам — полу, возрасту, социальным или профессиональным условиям, месту проживания, рациону питания, которая подвергается наибольшему радиационному воздействию от данного источника излучения.

Дезактивация — удаление или снижение радиоактивного загрязнения с какой-либо поверхности или из какой-либо среды.

Доза поглощения (D) — величина энергии ионизирующего излучения, переданная веществу:

$$D = de/dm,$$

где de — средняя энергия, переданная ионизирующим излучением веществу, находящемуся в элементарном объеме, а dm — масса вещества в этом объеме.

Энергия может быть усреднена по любому определенному объему, и в этом случае средняя доза будет равна полной энергии, переданной объему, деленной на массу этого объема. В СИ поглощенная доза измеряется в джоулях, деленных на килограмм (Дж/кг), и имеет специальное название — грей (Гр). Использувавшаяся ранее внесистемная единица рад равна 0,01 Гр.

Доза в органе или ткани (D_T) — средняя поглощенная доза в определенной ткани или органе человеческого тела:

$$D_T = (1/m_T) \int_{m_T} D dm,$$

где m_T — масса ткани или органа; D — доза поглощенная элементом массой dm .

Доза эквивалентная ($H_{T,R}$) — поглощенная доза в органе или ткани $D_{T,R}$, умноженная на соответствующий взвешивающий коэффициент для данного вида излучения W_R :

$$H_{T,R} = D_{T,R} W_R.$$

При воздействии N разных видов излучения с разными взвешивающими коэффициентами эквивалентная доза определяется как среднее арифметическое эквивалентных доз для этих видов излучения:

$$H_T = \sum H_{T,R} / N.$$

Единица эквивалентной дозы — зиверт (Зв).

Доза эффективная (E) — величина, используемая как мера риска возникновения отдаленных последствий облучения всего тела человека и отдельных его органов и тканей с учетом их радиочувствительности. Она представляет сумму произведений эквивалентной дозы в органах и тканях на соответствующие взвешивающие коэффициенты:

$$E = \sum_T W_T H_T.$$

Единица эффективной дозы — зиверт (Зв).

Доза эквивалентная $H_T(\tau)$, или эффективная $E(\tau)$, ожидаемая при внутреннем облучении — доза за время τ после поступления радиоактивных веществ в организм:

$$H_T(\tau) = \int_{t_0}^{t_0 + \tau} H_T(t) dt; E(\tau) = \sum_T W_T H_T(\tau),$$

где t_0 — момент поступления, $H_T(t)$ — мощность эквивалентной дозы к моменту времени t в органе или ткани T .

Когда τ не определено, его следует принять равным 50 годам для взрослых и $(70 - t_0)$ — для детей.

Доза эффективная (эквивалентная) годовая — сумма эффективной (эквивалентной) дозы внешнего облучения, полученной за календарный год, и ожидаемой эффективной (эквивалентной) дозы внутреннего облучения, обусловленной поступлением в организм радионуклидов за этот же год.

Единица годовой эффективной дозы — зиверт (Зв).

Доза эффективная коллективная — мера коллективного риска возникновения стохастических эффектов облучения; она равна сумме индивидуальных эффективных доз. Единица эффективной коллективной дозы — человеко-зиверт (чел. · Зв).

Доза предотвращаемая — прогнозируемая доза вследствие радиационной аварии, которая может быть предотвращена защитными мероприятиями.

Загрязнение радиоактивное — присутствие радиоактивных веществ на поверхности, внутри материала, в воздухе, в теле человека или в другом месте, в количестве, превышающем уровни, установленные настоящими Нормами и Правилами.

Загрязнение поверхности неснимаемое (фиксированное) — радиоактивные вещества, которые не переносятся при контакте на другие предметы и не удаляются при дезактивации.

Загрязнение поверхности снимаемое (нефиксированное) — радиоактивные вещества, которые переносятся при контакте на другие предметы и удаляются при дезактивации.

Заключение санитарно-эпидемиологическое — документ, удостоверяющий соответствие (или несоответствие) санитарным правилам и выданный в установленном порядке.

Захоронение отходов радиоактивных — безопасное размещение радиоактивных отходов без намерения последующего их извлечения.

Зона наблюдения — территория за пределами санитарно-защитной зоны, на которой проводится радиационный контроль.

Зона радиационной аварии — территория, на которой установлен факт радиационной аварии.

Источник ионизирующего излучения (в рамках данного документа — источник излучения) — радиоактивное вещество или устройство, испускающее или способное испускать ионизирующее излучение, на которое распространяется действие настоящих норм и правил.

Источник излучения природный — источник ионизирующего излучения природного происхождения, на которое распространяется действие настоящих норм и правил.

Излучатель рентгеновский — рентгеновская трубка, размещенная в защитном кожухе с фильтром и коллимирующим устройством (диафрагмой).

Излучение рентгеновское — фотонное излучение, генерируемое в результате торможения ускоренных электронов на аноде рентгеновской трубки.

Источник излучения техногенный — источник ионизирующего излучения, специально созданный для его полезного применения или являющийся побочным продуктом этой деятельности.

Источник радионуклидный закрытый — источник излучения, устройство которого исключает поступление содержащихся в нем радионуклидов в окружающую среду в условиях применения и износа, на которые он рассчитан.

Источник радионуклидный открытый — источник излучения, при использовании которого возможно поступление содержащихся в нем радионуклидов в окружающую среду.

Категория радиационного объекта — характеристика объекта по степени потенциальной опасности объекта для населения в условиях его нормальной эксплуатации и при возможной аварии.

Кабинет рентгеновский диагностический — совокупность специально оборудованных помещений, в которых размещено подразделение рентгеновского отделения лечебно-профилактического учреждения, использующее рентгеновское излучение в целях диагностики заболеваний.

Кабинет рентгеновский компьютерной томографии (РКТ) — совокупность специально оборудованных помещений, в которых размещено подразделение рентгеновского отделения лечебно-профилактического учреждения, использующее рентгенокомпьютерный томограф для диагностики заболеваний.

Комната управления рентгеновского кабинета — помещение, в котором располагаются дистанционные системы управления рентгеновским аппаратом и ведется наблюдение за состоянием пациента во время выполнения рентгенологических исследований.

Квота — часть предельной дозы, установленная для ограничения облучения населения от конкретного техногенного источника излучения и пути облучения (внешнее поступление с водой, пищей и воздухом).

Класс работ — характеристика работ с открытыми источниками ионизирующего излучения по степени потенциальной опасности для персонала, определяющая требования по радиационной безопасности в зависимости от радиотоксичности и активности нуклидов.

Контроль радиационный — получение информации о радиационной обстановке в организации, в окружающей среде и об уровнях облучения людей (включает дозиметрический и радиометрический контроль).

Место рабочее — место постоянного или временного пребывания персонала для выполнения производственных функций в условиях воздействия ионизирующего излучения в течение более половины рабочего времени или двух часов непрерывно.

Мощность дозы — доза излучения за единицу времени (секунду, минуту, час).

Население — все лица, включая персонал, вне работы с источниками ионизирующего излучения.

Облучение — воздействие на человека ионизирующего излучения.

Облучение аварийное — облучение в результате радиационной аварии.

Облучение медицинское — облучение пациентов в результате медицинского обследования или лечения.

Облучение планируемое повышенное — планируемое облучение персонала в дозах, превышающих установленные основные пределы доз.

с целью предупреждения развития радиационной аварии или ограничения ее последствий.

Облучение потенциальное — облучение, которое может возникнуть в результате радиационной аварии.

Облучение природное — облучение, которое обусловлено природными источниками излучения.

Облучение производственное — облучение работников от всех техногенных и природных источников ионизирующего излучения в процессе производственной деятельности.

Облучение профессиональное — облучение персонала в процессе его работы с техногенными источниками ионизирующего излучения.

Облучение техногенное — облучение от техногенных источников как в нормальных, так и в аварийных условиях, за исключением медицинского облучения пациентов.

Обращение с радиоактивными отходами — все виды деятельности, связанные со сбором, транспортированием, переработкой, хранением и (или) захоронением радиоактивных отходов.

Объект радиационный — организация, где осуществляется обращение с техногенными источниками ионизирующего излучения.

Органы государственного надзора за радиационной безопасностью — органы, которые уполномочены Правительством Российской Федерации или ее субъектов надзирать за радиационной безопасностью.

Отделение рентгеновское — совокупность специально оборудованных помещений, в которых размещено подразделение лечебно-профилактического учреждения, использующее рентгеновское излучение для диагностики и (или) лечения заболеваний.

Отходы радиоактивные — не предназначенные для дальнейшего использования вещества в любом агрегатном состоянии, в которых содержание радионуклидов превышает уровни, установленные настоящими Нормами и Правилами.

Паспорт радиационно-гигиенический организации — документ, характеризующий состояние радиационной безопасности в организации и содержащий рекомендации по ее улучшению.

Паспорт радиационно-гигиенический территории — документ, характеризующий состояние радиационной безопасности населения территории и содержащий рекомендации по ее улучшению.

Паспорт санитарный — документ, разрешающий организации в течение установленного времени проводить регламентированные работы с источниками ионизирующего излучения в конкретных помещениях, вне помещений или на транспортных средствах.

Персонал — лица, работающие с техногенными источниками излучения (группа А) или находящиеся по условиям работы в сфере их воздействия (группа Б).

Предел дозы (ПД) — величина годовой эффективной или эквивалентной дозы техногенного облучения, которая не должна превышаться в условиях нормальной работы. Соблюдение предела годовой дозы предотвращает возникновение детерминированных эффектов, а вероятность стохастических эффектов сохраняется при этом на приемлемом уровне.

Предел годового поступления (ПГП) — допустимый уровень поступления данного радионуклида в организм в течение года, который при монофакторном воздействии приводит к облучению условного человека ожидаемой дозой, равной соответствующему пределу головной дозы.

Радиационная авария — потеря управления источником ионизирующего излучения, вызванная 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.

Радиационная безопасность населения — состояние защищенности настоящего и будущего поколения людей от вредного для их здоровья воздействия ионизирующего излучения.

Работа с источником ионизирующего излучения — все виды обращения с источником излучения на рабочем месте, включая радиационный контроль.

Работа с радиоактивными веществами — все виды обращения с радиоактивными веществами на рабочем месте, включая радиационный контроль.

Рентгенография — метод рентгенологического исследования, заключающийся в получении одного или нескольких статических изображений на бумажных или пленочных носителях (рентгеновских снимках).

Рентгенография цифровая — метод рентгенологического исследования, заключающийся в получении рентгеновских изображений (снимков) с применением цифрового преобразования рентгенологической информации.

Рентгенотерапия — метод лечения заболеваний путем воздействия на патологический очаг рентгеновского излучения.

Рентгеноскопия — метод рентгенологического исследования, заключающийся в получении многопроекционного динамического изображения на флюоресцентном экране или экране монитора.

Рентгенотомография компьютерная — метод рентгенологического исследования, заключающийся в получении послойного цифрового рентгеновского изображения с использованием специальной аппаратуры и компьютера.

Риск радиационный — вероятность возникновения у человека или его потомства какого-либо вредного эффекта в результате облучения.

Санитарно-защитная зона — территория вокруг источника ионизирующего излучения, на которой уровень облучения людей в условиях нормальной эксплуатации данного источника может превысить установленный предел дозы облучения населения.

Санпропускник — комплекс помещений для смены одежды, обуви, санитарной обработки персонала, контроля радиоактивного загрязнения кожных покровов, средств индивидуальной защиты, специальной и личной одежды персонала.

Саншлюз — помещение между зонами радиационного объекта для предварительной дезактивации и смены дополнительных средств индивидуальной защиты.

Средство индивидуальной защиты — средство защиты персонала от внешнего облучения, поступления радиоактивных веществ внутрь организма и радиоактивного загрязнения кожных покровов.

Уровень вмешательства (УВ) — уровень радиационного фактора, при превышении которого следует проводить определенные защитные мероприятия.

Уровень контрольный — значение контролируемой величины дозы, мощности дозы, радиоактивного загрязнения и т.д., устанавливаемое для оперативного радиационного контроля с целью закрепления достигнутого уровня радиационной безопасности, обеспечения дальнейшего снижения облучения персонала и населения, радиоактивного загрязнения окружающей среды.

Устройство (источник), генерирующее ионизирующее излучение — электрофизическое устройство (рентгеновский аппарат, ускоритель, генератор и т.д.), в котором ионизирующее излучение возникает за счет изменения скорости заряженных частиц, их аннигиляции или ядерных реакций.

Эффекты излучения детерминированные — клинически выявляемые вредные биологические эффекты, вызванные ионизирующим излучением, в отношении которых предполагается существование порога, ниже которого эффект отсутствует, а выше — тяжесть эффекта зависит от дозы.

Эффекты излучения стохастические — вредные биологические эффекты, вызванные ионизирующим излучением, не имеющие дозового порога возникновения, вероятность возникновения которых пропорциональна дозе, а тяжесть проявления не зависит от дозы.

Флюорография — метод рентгенологического исследования, заключающийся в получении фотоснимка рентгеновского изображения с флюоресцентного экрана.

Словарь основных терминов и понятий

А

Абиотические факторы среды — (абиотические — безжизненные) неживые (физические и химические) факторы окружающей среды.

Авария — внезапное разрушение технических устройств или строительных сооружений, или нарушение режима работы, или течения каких-либо процессов. Часто авария создает угрозу жизни или здоровья человека, других живых существ и их сообществ (биогеоценозов), являясь экологически опасным событием.

Авторегуляция в природе — взаимодействие в природной системе, основанное на прямых и обратных функциональных связях, ведущее к динамическому равновесию или саморазвитию всей системы.

Агент — химический, физический, минералогический или биологический фактор, воздействие которого способно вызвать нежелательные эффекты в организме.

Адаптация - 1) эволюционно возникающее приспособление организмов к условиям среды, выражающееся в изменении их внутренних и внешних особенностей (биол.); 2) любое приспособление органа, функции или организма к изменяющимся условиям среды (мед.).

Адаптационный синдром — совокупность общих защитных реакций организма человека или животных, способствующих восстановлению нарушенных равновесий.

Адаптационный эффект — эффект повышения функциональных способностей организма как целого и/или его способность противостоять какой-нибудь нагрузке.

Аккумуляция — накопление химического соединения в организме, органах или тканях в результате воздействия его повторных доз.

Факторы, вовлеченные в процесс аккумуляции, включают избирательное связывание химического соединения молекулами тканей, концентрацию жирорастворимых химических соединений в жировых тканях организма, отсутствие или замедление метаболизма и медленное выведение. А. — это эффект масс-баланса, когда поступление превышает выведение.

Активность (А) — мера радиоактивности какого-либо количества радионуклида, находящегося в данном энергетическом состоянии в данный момент времени. Единица — беккерель (Бк).

Активность минимальная значимая (МЗА) — активность открытого источника ионизирующего излучения в помещении или на рабочем месте, при превышении которой требуется разрешение органов госсанэпиднадзора на использование этого источника.

Алгоритм — последовательность определенных операций, необходимая и достаточная для перехода от имеющегося состояния к заданному варианту возможного будущего.

Аномалия — отклонение от нормы или среднего значения какой-либо величины в ту или иную сторону.

Антагонизм — эффект комбинированного действия, менее выраженный, чем ожидаемый при простой суммации. Взаимное противодействие.

Антропогенный — возникающий под влиянием или при участии человека.

Антропогенная нагрузка — степень прямого или косвенного воздействия людей, их хозяйственной деятельности на природу в целом или на ее отдельные *экологические компоненты*.

Антропогенное загрязнение — возникающее в результате биологического существования и хозяйственной деятельности людей, в том числе их прямого или косвенного влияния на интенсивность природного загрязнения.

Антропогенные факторы среды — факторы окружающей среды, возникновение которых обусловлено деятельностью человека, вызывающие изменения природных комплексов.

Ареал — область распространения любой систематической группы организмов — популяции, вида, семейства и т.д.

Ареал экологический — регион, где может обитать вид при наличии подходящих для него условий.

Аутоэкология — раздел экологии, изучающий действие различных факторов среды на отдельные популяции и виды.

Б

Баланс экологических компонентов — количественное сочетание экологических компонентов, обеспечивающих экологическое равновесие.

Банк данных — элемент информационной системы, где хранится собранная и систематизированная информация в виде, удобном для выдачи потребителю.

Бедствие экологическое — любое изменение природной среды, ведущее к ухудшению здоровья населения или затруднению в ведении хозяйства.

Безопасность — особая характеристика предметов и событий, означающая отсутствие или существенное ограничение опасности. **Экологическая безопасность** — безопасность по отношению к природе.

Безотходная технология — технология, обеспечивающая получение продуктов без отходов (или с малыми отходами) — экологическая стратегия любого производства; включает комплекс мероприятий: утилизацию выбросов, комплексное использование сырья, организацию производств с замкнутым циклом (без сброса сточных вод и выбросов в атмосферу вредных веществ).

Биогеохимическая провинция — территория, характеризующаяся повышенным или пониженным содержанием одного или нескольких химических элементов в почве, воде, а также в организмах обитающих на этой территории животных и растений. Может быть *естественной* (природной) или *искусственной*, возникающей вблизи крупных промыш-

ленных комплексов, выбрасывающих в окружающую среду те или иные компоненты.

Биогеохимия — отрасль геохимии, изучающая геохимические процессы, происходящие в биосфере при участии организмов. Рассматривает роль организмов в процессе миграции, распределения, расселения и концентрации химических элементов в земной коре, выявляет *биогеохимические провинции*.

Биогеоценоз — сложная природная система — участок земной поверхности, обладающий совокупностью однородных природных компонентов (климат, горные породы, почва, режим увлажнения, сообщества растений, животных и мир микроорганизмов), имеющий свою особую специфику взаимодействия этих слагающих ее компонентов и определенный тип обмена веществом и энергией. Иногда используется как синоним *экосистемы*. Отличие состоит в том, что б. — конкретная территориальная единица (*биоценоз*), соответствующая низшим единицам территориального подразделения *биосферы*.

Биоиндикатор — организм, вид, популяция или сообщество, по наличию или состоянию которого можно судить о свойствах среды, в том числе о присутствии и концентрации загрязнений.

Биоклиматология — раздел биологии, изучающий влияние климато-географических факторов на живые организмы.

Биологический мониторинг — 1) периодический или систематический отбор проб у человека и других биологических объектов для анализа концентраций загрязнителей, продуктов обмена и биотрансформации, результаты которого могут быть сразу же применены на практике; обычно используется для оценки воздействия, но может использоваться и для оценки эффекта; 2) контроль за содержанием вредных веществ и продуктов их метаболизма в биосредах (кровь, моча, волосы и др.) с целью определения их интегрального воздействия на организм и возможной степени его опасности; 3) оценка биологического статуса популяций и сообществ организмов при наличии риска с целью обеспечения их защиты и выявления ранних признаков возможных опасностей для здоровья человека.

Биом — крупные наземные экосистемы или макроэкосистемы, такие, как тундра, тайга, степь, пустыня.

Биомасса — сухой вес всех органических веществ, содержащихся в организмах экосистемы.

Биометеорология — раздел метеорологии, изучающий влияние погоды на живые организмы, в частности на организм человека.

Биоритм — автономный процесс периодических чередований колебаний интенсивности и характера физиологических процессов и реакций, протекающих в живых организмах.

Биосфера — нижняя часть атмосферы, вся гидросфера и часть (верхняя) литосферы Земли, населенные живыми организмами, «область существования живого вещества» (В.И. Вернадский); самая крупная экосистема Земли.

Биота — вся совокупность организмов (растений, животных, микробов) экосистемы (от лат. *bios* — жизнь).

Биотическая структура экосистемы — набор различных категорий организмов в экосистеме.

Биотический круговорот — малый круговорот веществ, возникший с появлением жизни на Земле и осуществляемый в процессе жизнедеятельности живых организмов (*продуцентов, консументов, редуцентов*); в основе его — процессы синтеза и разложения органических веществ.

Биотоп — совокупность условий среды, в которых обитает биоценоз (*bios* — жизнь, *topos* — место).

Биохора — территориальное подразделение биосферы, охватывающее группу пространственно объединенных *биотопов*.

Биоценоз (*bios* — жизнь, *kionos* — сообщество) — сообщество живых организмов, совокупность популяций различных видов микроорганизмов, растений, животных, населяющих определенный биотоп; термин ввел К. Мебиус (1877).

В

Вид биологический — основная структурная единица в системе живых организмов; подчинен роду.

Видовое разнообразие — многообразие (число) видов в биоценозе определенной экосистемы.

Воздействие антропогенное — сумма прямых и опосредованных влияний человечества на окружающую среду.

Возмещение вреда, причиненного здоровью граждан неблагоприятным воздействием окружающей природной среды — возмещение затрат на восстановление здоровья, потерь в зарплате в связи со снижением трудоспособности, неполученных доходов в связи с упущенными профессиональными возможностями и т.д. (см. Закон РФ «Об охране окружающей природной среды»).

Воспитание экологическое — воздействие на сознание людей с целью выработки социально-психологических установок и активной гражданской позиции по отношению к природе.

Воспроизводство среды, окружающей человека, — комплекс мероприятий, направленных на поддержание параметров среды в пределах, благоприятных для существования человека.

Вред окружающей природной среде экологический — негативные изменения состояния окружающей природной среды, выразившиеся в загрязнении окружающей природной среды, истощении ее ресурсов, разрушении экологических систем, нарушении обмена веществ и энергии, гармонического развития общества и природы.

Время риска — временная вероятность возникновения негативных изменений показателей состояния здоровья населения (или отдельных социальных групп) в связи с неблагоприятными изменениями качества среды его обитания.

Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) — организация объединения наций, деятельность которой направлена на борьбу с особо опасными болезнями, разработку международных санитарных правил. Основана в Женеве в 1946 г.

Всемирный день окружающей среды (5 июня) — учрежден по предложению делегаций Японии и Сенегала на Конференции ООН по окружающей среде, состоявшейся 5 - 16 июня 1972 г. в Стокгольме (Швеция). Отмечается во всем мире ежегодно для привлечения внимания мировой общественности к проблемам охраны окружающей среды.

Выброс - кратковременное или за определенное время (час, сутки) поступление любых загрязнителей в окружающую среду из определенного источника (промышленного комплекса, предприятия и т.д.).

Г

Газы природные — невозобновляемые горючие ископаемые, образующиеся в земной коре; основной компонент — метан (примерно 98 %), а также этан, пропан, бутан, пентан; мировые запасы составляют около 10^{15} м³.

Генотип — совокупность всех локализованных в хромосомах генов организма, его наследственная материальная основа. Определяет норму реакции организма в изменяющихся условиях внешней среды.

Геогигиена — научная дисциплина, исследующая медицинские аспекты глобальных последствий деятельности человека; прямые воздействия на его здоровье и опосредованные — через изменение *экосистем*.

Геосистема — природная система, состоящая из взаимообусловленных компонентов, принадлежащих лито-, гидро-, атмо- и биосфере, функционирующая и развивающаяся во времени как единое целое. Г. — понятие территориально неопределенное («от болотной кочки до географической оболочки»), в отличие от природно-территориального комплекса (ПТК), подразумевающего принадлежность к территориальной единице определенного иерархического уровня.

Геохимическая провинция — территория, характеризующаяся повышенным или пониженным содержанием в горных породах, почве и воде одного или нескольких химических элементов, что может обуславливать возникновение геохимической эндемии.

Геоэкология - наука о взаимодействии географических (*природно-территориальных комплексов, геосистем*), биологических (*биоценозов, биогеоценозов экосистем*) и социально-производственных систем. Особое внимание г. обращает на антропогенные процессы *опустошения земель*, разработку рекомендаций по рациональному природопользованию и охране природы.

Гигиена — отрасль медицины, изучающая влияние окружающей человека среды и производственной деятельности на здоровье людей и разрабатывающая оптимальные, научно обоснованные требования к условиям жизни и труда населения. Г. в отличие от экологии человека ограничивается местами его непосредственного обитания и работы (жилище, предприятие, населенное место и т.п.), включает общую, коммунальную, социальную, радиационную гигиену и другие разделы.

Гигиеническое нормирование — обоснование и установка безопасных для человека уровней содержания вредных веществ в природных средах

(воздухе, воде, почве); критерии г. н. — предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в окружающей среде.

Гигиено-эпидемиологическая диагностика (массовых экологически обусловленных изменений здоровья населения) — выявление показателей изменения состояния здоровья населения (популяции, социальной группы) в связи с изменением качества среды обитания — при использовании метода эпиданализа и гигиенической оценки опасности вредных факторов среды обитания.

Глобальное загрязнение — фоновобносферное загрязнение среды физическими, химическими или биологическими агентами, обнаруживаемыми вдали от их источников и практически в любой точке планеты.

Гомеостаз — свойство организма поддерживать свои параметры и физиологические функции в определенном диапазоне, основанное на устойчивости внутренней среды организма по отношению к возмущающим воздействиям внешней среды.

Госсанэпиднадзор — система динамического комплексного наблюдения государственными органами санэпидслужбы за обеспечением санитарно-эпидемиологического благополучия населения, включающая сбор, анализ и оценку информации о состоянии здоровья и среды обитания, а также контроль за соблюдением санитарных правил, норм и гигиенических нормативов в целях принятия управленческих решений по рационализации и повышению эффективности профилактических и противоэпидемических мероприятий.

Группа риска — социальная группа населения, на которую оказано (или может быть оказано) наибольшее воздействие неблагоприятными факторами среды обитания (имеет или может иметь критическое отклонение состояния здоровья от контрольного уровня).

Д

Деграляция окружающей природной среды — разрушение или существенное нарушение экологических связей в природе, обеспечивающих обмен веществ и энергии внутри природы, между природой и человеком, вызванное деятельностью человека без учета законов развития природы.

Деграляция почвы — постепенное ухудшение свойств почвы, вызванное изменением условий почвообразования в результате естественных причин (наступление лесов или сухой степи) и хозяйственной деятельности человека (неправильная агротехника, загрязнение и т.д.).

Динамическое равновесие — состояние относительного равновесия экологических систем, находящихся под действием внешних и внутренних сил, при котором их основные характеристики остаются в пределах допустимых границ, сохраняется возможность их дальнейшего нормального существования и развития.

Доза — количество или концентрация нежелательного вещества или энергии. Мера количества вещества, полученного организмом человека или животного.

Доза пороговая — наименьшая доза, вызывающая изменения на уровне организма, выходящие за пределы физиологических реакций.

Доза предельно допустимая (ПДД) — максимальное количество вредного агента, проникновение которого в организмы или их сообщества еще не оказывает на них пагубного влияния. Устанавливаются ПДД единовременные и за определенное время (час, день, рабочую неделю и т.д.).

Е

Емкость экологическая — количественно выраженная способность среды обитания существовать без ущерба для ее компонентов под влиянием антропо- или техногенной нагрузки.

Естественный биоценоз -- биотическое сообщество, не подвергавшееся антропогенному изменению.

Естественное загрязнение атмосферы — загрязнение атмосферы, обусловленное природными процессами.

Ж

Живучесть экосистемы — способность *экосистемы* выдерживать резкие изменения *абиотической среды*, массовые размножения или исчезновения отдельных видов, *антропогенные нагрузки*.

Жизнеобеспечение — совокупность мероприятий, необходимых для создания условий сохранения жизни, здоровья и работоспособности людей в определенных обстоятельствах.

З

Зависимость доза—эффект — зависимость между дозой и величиной непрерывного эффекта у индивидуума или в популяции, представляющего биологическое изменение, измеренное в градуированной шкале тяжести (степени выраженности). Связь между дозой и средней выраженностью (количественной) качественно определяемого эффекта на здоровье группы организмов.

Загрязнение — привнесение в среду или возникновение новых, обычно не характерных для нее физических, химических или биологических агентов, превышение в рассматриваемое время естественного среднесного-летнего уровня концентраций агентов в среде.

Загрязнение физическое -- загрязнение, связанное с изменением физических параметров среды: температурно-энергетических (тепловое, термальное), волновых (световое, шумовое и электромагнитное), радиационных (радиационное или радиоактивное).

Закон минимума Либиха — относительное действие экологического фактора на организм тем сильнее, чем больше он приближается к минимуму; например, рост растений зависит от тех питательных веществ,

содержание которых минимально (не применим к неустойчивым системам с меняющимися значениями факторов). Сформулирован Ю. Либихом (1840).

Закон ноосферы (В. И. Вернадского) — положение В. И. Вернадского о превращении биосферы, согласно которому на современном уровне развития человеческой цивилизации она неизбежно превращается в ноосферу, т.е. в сферу, где разум человека играет в развитии природы важнейшую роль.

Закон толерантности — сформулирован В. Шелфордом (1913) расширяет закон минимума Либиха: фактором, лимитирующим процветание организма, может быть как минимум, так и максимум экологического фактора, диапазон между которыми определяет величину толерантности (выносливости) организма к данному экологическому фактору.

«Законы» экологии В. Коммонера — 1) все связано со всем; 2) все должно куда-то деваться; 3) природа «знает» лучше; 4) ничто не дается даром.

Здоровье — состояние полного физического, душевного и социального благополучия, а не только отсутствие болезней и физических дефектов (из Устава ВОЗ).

Земля — 1) охраняемый законом природный объект, представляющий в широком смысле всю планету, территорию со всеми ее естественными компонентами; 2) в узком смысле, согласно действующему земельному законодательству, — поверхностный почвенный слой, выполняющий экологические, экономические, культурно оздоровительные функции.

Зима ядерная — модельно прогнозируемое резкое и длительное общеземное похолодание, могущее возникнуть в случае войны с применением термоядерного оружия; механизм возникновения з.я. -- экранирование поверхности планеты от прихода солнечного излучения. Глобальная экологическая катастрофа, ведущая к самоуничтожению человека.

Зона жилая (селитебная) — район населенного пункта, исключительно для размещения жилья.

Зона рекреационная — часть пространства окружающей среды, используемая для отдыха и туризма населения.

Зона экологического риска — места на поверхности суши и в акваториях океана, где человеческая деятельность может создать опасные экологические ситуации (зоны подводной добычи нефти, участки моря, опасные для проходящих танкеров, и др.).

И

Иерархия экосистем — функциональное соподчинение экосистем различного уровня организации.

Изменение среды необратимое — перемена в средообразующих компонентах или их сочетаниях, которая не может быть компенсирована в ходе природных восстановительных процессов.

Инверсия — состояние атмосферы, вызванное образованием слоя теплого воздуха, препятствующего подъему относительно холодного воз-

духа. Приводит к задержке и накоплению в приземном слое загрязнений, которые могли бы в обычных условиях рассеяться в атмосфере, и создает условия для воздействия их повышенных концентраций на население.

Индикация загрязнения — выявление загрязнителей в природной среде или в отдельных ее компонентах и установление их количественного и качественного составов.

Инфильтрация — просачивание воды с земной поверхности в почву и материнские породы.

Ионизирующая радиация — любое излучение, состоящее из частиц или квантов энергии, способных вызвать прямую или непрямую ионизацию. К первым относятся электроны, протоны, альфа-частицы и др., обладающие достаточной кинетической энергией для того, чтобы вызывать ионизацию. Ко вторым — нейтроны, фотоны и т.д., которые способны инициировать ядерные превращения.

К

Канцерогенез — происхождение или индуцирование рака, вероятнее всего, в результате многоступенчатого процесса.

Канцерогенный риск — возрастание вероятности развития рака у индивидуума на протяжении всей его жизни как результат воздействия потенциального канцерогенеза.

Канцерогенный эффект — возникновение злокачественных новообразований при воздействии факторов окружающей среды.

Картографирование экологическое — раздел экологии, основная задача которого — отражение на карте результатов специальных съемок по оценке состояния компонентов природной среды и хозяйственного освоения территории.

Катастрофа экологическая — аномалия, возникающая в природе и приводящая к особо неблагоприятным экономическим последствиям или массовым болезням населения определенного региона, а также авария технического устройства, в результате которой происходят крайне неблагоприятные изменения в среде.

Качество жизни — 1) совокупность условий, обеспечивающих (или необеспечивающих) комплекс здоровья человека — личного и общественного, т.е. соответствие среды жизни человека его потребностям, интегрально отражаемое средней продолжительностью жизни, мерой здоровья людей и уровнем их заболеваемости (физической и психической), стандартизованных для данной группы населения; 2) соответствие среды жизни социально-психологическим установкам личности.

Качество окружающей человека среды — понятие экологическое, антропоцентрическое, отражающее субъект-объективные отношения. Критерий — состояние его здоровья. К.о.ч.с. — относительное понятие, так как одно и то же ее состояние может быть охарактеризовано как неодинаковое по качеству для разных групп населения (дети, взрослые, аборигены, мигранты и др.).

Класс — совокупность сущностей, объединенных наличием у всех минимум одного общего признака, значимого в заданном контексте.

Климат — многолетнее устойчивое сообщество, развившееся в результате смены последовательных сукцессионных стадий.

Климат — многолетний закономерно повторяющийся режим погоды, присущий данной местности.

Комплекс — совокупность сущностей, объединенных относительно устойчивыми взаимосвязями, более значимыми, нежели с окружающей средой, и создающими возможность проявить свойства отдельных сущностей, которые не могут проявиться вне данного объединения, или получить эффект благодаря снижению недостаточных для этого возможностей отдельных сущностей, входящих в данную совокупность.

Консументы — потребители органического вещества — животные и некоторые виды растений.

Контаминант, загрязняющее вещество (агент) — 1) любое химическое соединение или материал, который проникает в систему (окружающую среду, организм человека, пищу и др.), где он в норме не обнаруживается; 2) любой физический фактор или химическое, биологическое или радиоактивное вещество, обнаруживаемое в воде, почве, воздухе или продуктах питания и в норме не являющееся компонентом среды или обнаруживаемое в повышенных концентрациях вследствие человеческой деятельности.

Кризис экологический — напряженное состояние взаимоотношений между человечеством и природой, характеризующееся несоответствием развития производительных сил и производственных отношений в человеческом обществе ресурсо-экологическим возможностям биосферы.

Кризис экосистемы — ситуация в окружающей среде в результате действия катастрофических природных или антропогенных факторов.

Кризисные экологические ситуации — пространственно значительные и глубокие нарушения экологического равновесия, приводящие экосистемы в критическое состояние с возможной последующей гибелью.

Критерий экологический — признак, на основании которого дается оценка, определение или классификация экологических систем, процессов и явлений.

Критический уровень загрязнения — загрязнение окружающей среды вредными веществами, превышение которого ведет к разрушению природной среды и причинению вреда здоровью человека.

Круговорот веществ — закономерное многократное участие веществ в процессах и явлениях в био-, атмо-, гидро-, литосфере.

Ксенобиотик, чужеродное вещество — химическое соединение, не присутствующее в норме в окружающей среде, например синтетический пестицид; химическое загрязнение (поллютант).

Л

Лес — охраняемый законом природный объект, составная часть окружающей природной среды, большая совокупность древесно-кустарниковой растительности, произрастающей на землях лесного, природ-

но-заповедного фондов и оказывающая средозащитное, климато-регулирующее, оздоровительное влияние на окружающую среду.

Летальный синтез — образование в процессе метаболизма высокотоксичных соединений из нетоксичных или малотоксичных веществ.

Лимитирующий фактор — экологический фактор, наиболее удаленный от своего оптимального значения и ограничивающий жизнедеятельность организма или экосистемы; с помощью л. ф. регулируется состояние организмов и экосистем.

М

МАГАТЭ — Международное агентство по атомной энергии.

Медико-географическая карта — карта с обозначениями, характеризующими территориальные особенности влияния географической среды на состояние здоровья населения.

Медицина экологическая — комплексная научная дисциплина, рассматривающая все аспекты воздействия окружающей человека среды на его здоровье с центром внимания к факторам, непосредственно ведущим к заболеваниям «среды».

Метеолабильность — повышенная чувствительность организма к смене климата и погоды; наблюдается чаще у лиц с хроническими заболеваниями, при переутомлении; проявляется в виде метеопатических реакций.

Метеорология — наука об атмосфере и происходящих в ней процессах.

МКРЕИ — Международная комиссия по радиационным единицам и измерениям.

МКРЗ — Международная комиссия по радиационной защите.

Модельные исследования — моделирование в эксперименте проявлений влияния на подопытных животных; биологические тест-системы последствия использования населением отдельных объектов среды обитания, содержащих подозрительный фактор воздействия.

Мониторинг — система долгосрочных наблюдений, оценки, контроля и прогноза состояния и изменения объектов. Принято делить на базовый (фоновый), глобальный, региональный и импактный (в особо опасных зонах и местах), а также по методам ведения и объектам наблюдения (авиационный, космический) окружающей человека среды.

Мутаген — фактор окружающей среды, способный вызвать в организме изменения наследственных свойств.

Н

Нагрузка антропогенная — степень прямого и косвенного воздействия людей и их хозяйства на природу в целом или на ее отдельные экологические компоненты и элементы.

Нарушение экологическое — 1) отклонение от обычного состояния (нормы) экосистемы иерархического уровня организации (от биосферы до биосферы). Н.э. может произойти в одном из экологических ком-

понентов или в экосистеме в целом, быть причинно внешним для рассматриваемой экосистемы или внутренним для нее, иметь антропогенный или естественный характер, быть локальным, региональным или глобальным. Подразумевается, что если н.э. недостаточно для того, чтобы привести к необратимому разрушению экосистемы, то последнее способно самовосстановиться до относительно прежнего состояния.

Ниша — экологическое понятие, включающее не только физическое пространство, занимаемое организмом, но и функциональную роль организма в сообществе и его положение относительно градиентов внешних факторов.

Ниша экологическая — совокупность территориальных и функциональных характеристик условий обитания, соответствующих требованиям, предъявляемым к среде видом, т.е. диапазоном условий, в которых популяция живет и воспроизводит себя; функциональный статус организма в сообществе и экосистеме; термин предложил Р.Джонсон (1910)

НКДАР ООН — Научный комитет по действию атомной радиации Организации Объединенных Наций, созданный в 1955 г. решением Генеральной ассамблеи ООН.

Ноосфера — буквально «мыслящая оболочка», сфера разума, высшая стадия развития биосферы, связанная с возникновением и развитием в ней человечества, когда разумная человеческая деятельность становится главным определяющим фактором развития (В. И. Вернадский, 1994).

О

ОБУВ (ориентировочный безопасный уровень воздействия) — временный норматив содержания вещества в атмосферном воздухе или в воздухе рабочей зоны, рассчитанный экспресс-экспериментальными методами прогнозирования точности.

Озоновый экран — слой атмосферы, расположенный на высоте от 10 до 50 км, с концентрацией озона, в 10 раз превышающей ее у поверхности Земли; задерживает проникновение к земной поверхности излучения, губительного для всего живого.

Окружающая природная среда — естественная среда обитания человека, биосфера, служащая условием, средством и местом жизни человека и других живых организмов; в широком смысле включает природу как систему естественных экологических систем и окружающую среду как преобразованную в результате деятельности человека часть естественной среды.

Окружающая среда — 1) среда обитания и производственной деятельности человека, включающая условия труда, быта, отдыха, питания и содержащая факторы химической, физической, биологической и социальной природы; 2) вода, воздух, земля и все растения, человек и животные, обитающие в определенном месте, а также взаимосвязи между ними; 3) совокупность всех внешних условий и воздействий, которым подвержена данная система (или организм).

Оптимум экологический — наиболее благоприятные условия для существования определенного вида животных, растений и т.д.

Оружие экологическое — любое физическое, химическое или биологическое средство, наносящее материальный урон, снижающее обороноспособность и приводящее к ухуашению здоровья противника через изменение природной среды.

Отходы — остатки сырья, материалов, полуфабрикатов, иных изделий и продуктов, образующиеся в процессе производства продукции или ее потребления, утратившие свои потребительские свойства.

Охрана окружающей природной среды — системы государственных и общественных мер, направленных на обеспечение гармоничного взаимодействия общества и природы.

Оценка экологическая — определение состояния среды или степени воздействия на нее каких-то факторов.

П

Парниковый эффект — свойство атмосферы пропускать солнечную радиацию, но задерживать земное излучение, способствуя аккумуляции тепла нашей планеты.

ПДВ (предельно допустимый выброс веществ в атмосферу) — научно-технический норматив, устанавливаемый для каждого загрязнителя и источника выброса, выполнение которого обеспечивает соблюдение ПДК на селитебной территории населенного пункта с учетом выбросов соседствующих предприятий.

ПДК (предельно допустимая концентрация) — максимальное количество вредного вещества в единице объема или массы, которое при ежедневном воздействии в течение неограниченного времени не вызывает болезненных изменений в организме и неблагоприятных наследственных изменений у потомства; условная, эталонная, реперная (отсчетная) величина, установленная в экстремальных, строго регламентированных лабораторных условиях; единица, которой измеряют степень опасности загрязнения объектов окружающей среды.

ПДН (предельно допустимые нормы) — предельно-допустимые нормы антропогенной нагрузки на природную среду, устанавливаемые с учетом емкости природной среды и ее ресурсowego потенциала.

ПДУ (предельно допустимый уровень) — нормативное значение поступления и содержания радиоактивного вещества в организме, его концентрации в воде и воздухе, рассчитанное на основании ПДД.

Пестициды — ядохимикаты для защиты растений от вредителей, болезней, сорняков.

Пищевая цепь — перенос энергии пищи от ее источника — растений через ряд организмов поеданием одних организмов другими («кто кого ест»). Взаимоотношения в пищевой цепи просты, и в нее вовлечено небольшое число организмов.

Пораженные группы — индивидуумы и популяции, подверженные воздействию химических веществ, радиации или микроорганизмов в окружающей среде, благоприятному или неблагоприятному влиянию от предполагаемых мер и решений по регулированию риска.

Порог — доза или уровень экспозиции, ниже которой не обнаруживается значительный неблагоприятный эффект. Для канцерогена такого уровня воздействия не существует.

Пороговая доза — при которой тот или иной эффект только начинает проявляться. Пороговые дозы для любого эффекта могут быть разными у разных индивидуумов и в разное время.

Преступление экологическое — преднамеренное злостное нарушение окружающей человека природной среды, противоречащее государственным законам, национальным интересам или международным соглашениям. Во многих странах относится к уголовным преступлениям.

Приемлемый (допустимый) риск — 1) уровень риска развития серьезного неблагоприятного эффекта в определенном регионе, который не требует принятия дополнительных мер предосторожности, так как не меняет условия жизни в данном месте; 2) вероятность наступления событий, негативные последствия которого настолько незначительны, что ради получаемой выгоды от источника этого фактора риска человек, группа людей или общество в целом готовы пойти на риск.

Природно-территориальный комплекс (ПТК) — исторически сложившаяся и пространственно обособившаяся единая система, образованная множеством взаимосвязанных и взаимодействующих элементов атмосферы, гидро-, лито- и биосферы.

Природные ресурсы — в широком смысле все природные блага, предназначенные для удовлетворения экологических, экономических, культурно-оздоровительных потребностей человека и общества; в узком — естественные источники удовлетворения потребностей материального производства (земельные, водные, лесные ресурсы, минеральные ресурсы).

Прогноз экологический — предсказание поведения экосистем, определяемое естественными процессами и воздействием на них человека.

Программа ООН по окружающей (человека) среде — UNEP (United Nation Environment Program) — межправительственная Программа, начатая по инициативе Стокгольмской Конференции ООН по окружающей среде (1972) и решению Генеральной Ассамблеи ООН (1973), посвященная наиболее острым проблемам современного экологического кризиса: опустыниванию планеты, деградации почв, обезлесению Земли; резкому ухудшению качества и уменьшению количества пресных вод, загрязнению Мирового океана и т.д. В Программе участвуют представители 58 государств мира, избираемые Генеральной Ассамблеей ООН раз в три года. Штаб-квартира UNEP находится в Найроби (Кения).

Программа «Человек и биосфера» (ЧИБ) или МАВ (Man and Biosphere) — международная научно-исследовательская программа — 2 ЮНЕСКО (продолжение Международной биологической программы), направленная на решение ряда экологических вопросов, сформулированных в виде отдельных 14 подпрограмм — проектов (в основном о влиянии человека на экосистему и обратном влиянии экосистем на человека). Принята в 1970 г., работы начаты в 1971 г. В работе участвуют около 90 стран.

Продуценты — организмы, осуществляющие фотосинтез, т.е. процесс превращения воды и двуоксида углерода в органические вещества (сахара) с выделением кислорода и использованием световой энергии солнца.

Просвещение экологическое — воспитание экологического мировоззрения — глубокого понимания факта тесной связи человечества с экологическими процессами в природе.

Р

Равновесие экологическое — баланс естественных и измененных человеком экологических компонентов и природных процессов, приводящий к длительному существованию экосистемы данного вида.

Радиационная экология — раздел экологии, изучающий влияние радиоактивных веществ (нуклидов) на организм, распределение и миграцию нуклидов в ценоэкосистемах.

Радиоактивное загрязнение — радиоактивные вещества, находящиеся на поверхности различных объектов в количествах, превышающих величины, установленные действующими нормами и правилами.

Размещение отходов — складирование отходов на поверхности Земли, захоронение их на установленной глубине от поверхности Земли.

Распространение информации о риске — 1) деятельность, направленная на эффективное доведение общественности и населению в целом сообщений и стратегий, предназначенных для предупреждения воздействий, неблагоприятных эффектов на здоровье и снижение качества жизни; 2) взаимный процесс обмена информацией и мнением о риске между специалистами по оценке риска, лицами, регулирующими риск, средствами массовой информации, заинтересованными группами и общественностью в целом.

Римский клуб — международная неправительственная экологическая научная организация, созданная итальянским экономистом А. Печчеи (1968); объединяет около 100 человек (в том числе нескольких лауреатов Нобелевской премии) из более 30 стран мира; деятельность направлена на выработку тактики и стратегии разрешения многих глобальных экологических проблем, которые представлены в нескольких «Докладах».

Риск — 1) статистическое понятие, определяемое как ожидаемая частота или вероятность нежелательных эффектов, возникающих от воздействия данной опасности; 2) вероятность повреждения (травмы), заболевания или смерти при определенных обстоятельствах; 3) вероятность, что неблагоприятный эффект будет иметь место у индивидуума, группы или в экологической системе при воздействии определенной дозы или концентрации опасного агента.

С

Санитарно-гигиенические нормы — показатели санитарно-гигиенических условий и качества окружающей среды человека, соблюдение которых обеспечивает для него условия существования, благоприятные для жизни и безопасные для здоровья.

Самоочищение — естественное разрушение загрязнителя в среде в результате природных физических, химических и биологических процессов.

Санитарно-экологическая оценка (эколого-гигиеническая оценка) территории (населенных пунктов) — изучение механизмов связи (причинно-следственной связи) изменений состояния здоровья населения (социальной группы) определенной территории и качества среды его обитания (окружающей среды) с использованием гигиенических, эпидемиологических, клинических, токсикологических, химико-аналитических и других методов исследования.

Синэкология — раздел экологии, изучающий сообщества организмов (биоценозы, экосистемы).

Скрининг — биологическая или химическая экспресс-оценка и контроль потенциально вредных промышленных выбросов и отходов; отбор и анализ комплексных проб отходов и выбросов промышленных предприятий для целей мониторинга, а также медико-биологическая оценка состояния здоровья населения, проживающего на потенциально опасной территории и обследования больших групп людей с целью выявления лиц с определенным заболеванием.

Смог — 1) сочетание пылевых частиц и капель тумана; 2) термин, широко используемый для обозначения видимого загрязнения воздуха любого характера.

Социально-гигиенический мониторинг — система организационных, социальных медицинских санитарно-эпидемиологических, научно-технических, методологических и иных мероприятий по организации наблюдения за состоянием санитарно-эпидемиологического благополучия населения, его оценке и прогнозированию изменений, установлению, предупреждению, устранению или уменьшению факторов вредного влияния среды обитания на здоровье человека.

Среда обитания — совокупность факторов окружающей среды, с которыми индивидуум непосредственно контактирует в процессе своей жизнедеятельности.

Стабильность экологическая — способность *экосистемы* противостоять внутренним *абиотическим факторам среды* и *антропогенным* воздействием.

Стандарты качества окружающей природной среды — единые требования, правила, нормативы, предъявляемые органами государства к деятельности предприятий, учреждений, организаций, граждан в интересах охраны природы, рационального использования природных ресурсов, обеспечения экологической безопасности общества.

Стресс — 1) состояние напряжения организма — совокупность физиологических реакций, возникающих в организме животных и человека (возможно и у растений) в ответ на воздействие неблагоприятных или, наоборот, исключительно благоприятных факторов — холода, голода, психических и физических травм, облучения, кровопотери, инфекции, радости, полового возбуждения и т. п.; отличают большое число форм с.: антропо-, биогенный, культурный, шумовой и др.; 2) напряженное состояние экосистемы, испытывающей повреждающее воздействие необычных природных и антропогенных факторов, проявляющееся в изменении энергетических процессов, круговорота биогенных веществ и структуры сообщества. Одним из следствий с. служит увеличение доли выносимой из экосистемы

или неиспользованной в ней продукции и усиление горизонтального переноса веществ. Длительное состояние с. грозит экосистеме разрушением.

Сукцессия — последовательная смена во времени одних биоценозов другими на определенном участке земной поверхности. При отсутствии нарушений с. завершается возникновением сообщества, находящегося в равновесии со средой, — *климакса*.

Т

Территория риска (зона опасности) — территория, в пределах которой может проявляться или проявляется действие (острое, хроническое) вредных факторов на население, в результате чего изменяется (или может измениться) состояние здоровья людей.

Техногенез — процесс изменения природных комплексов под воздействием производственной деятельности человека.

Техногенные факторы — элементы техногенных форм воздействия человека на природные компоненты, обуславливающие возникновение и развитие явлений техногенеза.

Техногенные экосистемы — значительно измененные или возникшие под влиянием техногенных факторов природные, а также культурные экосистемы.

Техносфера — 1) часть биосферы, коренным образом преобразованная человеком в технические и техногенные объекты (здания, дороги, механизмы и т.п.); 2) часть биосферы (по некоторым представлениям, со временем вся биосфера), преобразованная людьми с помощью прямого или косвенного воздействия технических средств в целях наилучшего соответствия социально-экономическим потребностям; 3) практически замкнутая регионально-глобальная будущая технологическая система утилизации и реутилизации вовлекаемых в хозяйственный оборот природных ресурсов, рассчитанная на изоляцию хозяйственно-производственных циклов от природного обмена веществ и потока энергии.

У

Управление риском — 1) процесс принятия решений, использующий результаты оценки риска для обоснования регулирующих действий в отношении загрязнения окружающей среды с позиций технического, научного, социального, экономического и политического характера; 2) процесс принятия решений с рассмотрением информации политической, социальной, экономической, технической, а также по оценке риска с целью разработать, проанализировать и сравнить управленческие подходы и выбрать оптимальные решения; 3) объединение трех основных процедур: сравнительной характеристики риска, контроль воздействия и мониторинга риска.

Урбанизация — социально-демографический процесс, характеризующийся ростом численности городского населения, увеличением количества крупных и сверхкрупных городов.

Урбанизация территории — процесс преобразования естественных ландшафтов в искусственной (антропогенной), развивающейся под влиянием городской застройки.

Условия жизни человека — количественное соотношение потребностей человека с социальными, антропогенными и природными факторами, возможность их удовлетворения.

Устойчивость экологических природных систем — способность популяции, сообщества или экосистемы сохранять свою структуру и функциональные особенности при воздействии внешних факторов.

Ущерб от загрязнения среды — фактические и возможные убытки народного хозяйства, связанные с загрязнением среды, а также потери, обусловленные ухудшением здоровья населения, сокращением длительности трудового периода и жизни людей.

Ф

Фактор антропогенный — элементы разных форм хозяйственной деятельности человека, оказывающие воздействие на природные компоненты (рельеф, атмосферу, живое вещество и т.д.), участвующие в формировании антропогенных ландшафтов.

Фактор риска — провоцирующий или увеличивающий риск развития определенного заболевания; некоторые факторы могут являться наследственными или приобретенными, но в любом случае их влияние проявляется при определенных условиях.

Фактор среды — любой фактор, рассматриваемый с учетом какого-то объекта или явления, принимаемого за центральный в наблюдаемой совокупности.

Функция риска — зависимость между риском ущерба объекту воздействия и концентрацией воздействующих на него загрязнителей атмосферного воздуха.

Х

Характеристика риска — заключительный этап оценки риска, объединяющий три предшествующие фазы процедуры оценки риска (идентификацию опасности, оценку воздействия и установление зависимости доза—ответ) для определения характера и вероятности неблагоприятных эффектов и выработки в конечном итоге количественного заключения о доле людей или особей, пострадавших в популяции, подверженной воздействию; описание природы и величины риска для человека.

Хвостохранилище — замкнутый или полужамкнутый (полужамкнутость возникает при создании земляной или подобной ей плотине, через которую частично инфильтруется жидкость) бассейн для хранения жидких хвостов.

Хвосты — отходы (обычно подразумеваются жидкие или газообразные), возникающие при обогащении полезных ископаемых или других технологических процессов. «Лисьи хвосты» — выбросы, содержащие хлор.

Цена экологическая — цена, возникающая в результате необходимости экономических вложений на нейтрализацию прямых, опосредованных и косвенных экологических последствий данной формы хозяйственной деятельности.

Экологическая безопасность — состояние защищенности жизненно важных экологических интересов человека, прежде всего прав на чистую, здоровую, благоприятную для жизни окружающую природную среду (ст. п. 1 ст. Закона РФ от 25 марта 1982 г. «О безопасности»).

Экологическая культура — использование окружающей природной среды на основе познания естественных законов развития природы, с учетом ближайших и отдельных последствий изменения природной среды под влиянием человеческой деятельности.

Экологическая система (экосистема) — природная система, в которой живые организмы и среда их обитания объединены в единое функциональное целое через обмен веществ и энергии, тесную причинно-следственную взаимосвязь и зависимость слагающих ее экологических компонентов.

Экологическая среда человека — см. *Окружающая среда*.

Экологические права человека — право на чистую, здоровую, благоприятную для жизни окружающую природную среду, на использование природной среды для удовлетворения своих экономических, эстетических, духовных потребностей (ст. 11 Закона).

Экологические фонды — внебюджетные фонды, создаваемые за счет обязательных отчислений с предприятий, других источников для решения природоохранных задач, восстановления потерь в природной среде, оздоровления окружающей природной среды. Создаются при исполнительных органах власти города, района, области, края, республики, федерации.

Экологическое право — совокупность правовых норм, регулирующих общественные отношения в сфере взаимодействия общества и природы.

Экологическое преступление — общественно опасное, виновное деяние, посягающее на установленный в Российской Федерации экологический правопорядок, экологическую безопасность общества, причиняющее вред окружающей природной среде и здоровью человека.

Экологическое нарушение — отклонение от обычного состояния экосистемы любого иерархического уровня организации, а также любое временное или постоянное отклонение условий жизни от благоприятных для человека.

Экологическое нормирование — нормирование любого антропогенного воздействия на экосистему в пределах экологической емкости, не приводящего к нарушению механизмов саморегуляции; основные критерии при определении экологической нагрузки: ненарушение биологи-

ческого (производственно-деструкционного) баланса, стабильности и разнообразия экосистемы.

Экология — 1) интегрированная фундаментальная наука о составе, структуре, свойствах, функциональных особенностях и эволюции систем надорганизменного уровня, популяционных экосистем и биосферы; изучает основные фундаментальные закономерности: поток энергии, циркуляцию химических элементов; 2) «это познание экономики природы, одновременное исследование взаимоотношений всего живого с органическими и неорганическими компонентами среды, включая непременно неантагонистические и антагонистические взаимоотношения контактирующих животных и растений. Одним словом, экология — наука, изучающая все сложности взаимосвязи и взаимоотношения в природе, рассматриваемые Дарвиным как условия борьбы за существование» (Э. Геккель).

Экология социальная — научная дисциплина, рассматривающая взаимоотношения в системе «общество — природа»; изучает взаимодействие и взаимосвязи человеческого общества с природной средой и разрабатывает научные основы рационального природопользования, которые предлагают охрану природы и оптимизацию жизненной среды человека.

Экология человека — комплексная дисциплина, исследующая общие законы взаимоотношения биосферы и антропосистемы человека, его групп, популяций и индивидуумов, влияние природной среды на человека и группы людей.

Эколого-правовая ответственность — обязанность претерпевать неблагоприятные последствия в случае нарушения природоохранительного законодательства.

Эколого-правовое воспитание — овладение экологической и юридической культурой, знания экологического законодательства и умение его правильного применения.

Эколого-экономическая ответственность — вид социальной ответственности. В отличие от эколого-правовой (юридической) ответственности наступает не по факту правонарушения, а по факту причинения правомерного вреда. Выражается во взыскании в бесспорном порядке денежных сумм в качестве компенсации за причиненный вред: платежи предприятий за загрязнение окружающей природной среды (выбросы, сбросы и захоронение вредных веществ).

Экосистема — 1) природный комплекс животных, растений и элементов среды их обитания (вода, воздух, почва), связанных между собой обменом веществ и энергией, экосистемы могут быть различных типов — лесной массив, озера и т.д.; 2) элементарная функциональная единица биосферы; система, включающая все организмы (биоценоз) на данном участке (биотопе) и взаимодействующая с физической средой таким образом, что поток энергии создает определенную трофическую структуру, видовое разнообразие и круговорот веществ внутри системы; термин введен А. Тенсли (1935).

Радиоактивная загрязненность территорий Российской Федерации от аварии на Чернобыльской АЭС

Район	Населенный пункт максимальной радиоактивной загрязненности среды	Загрязненность, Кв/км ²		Средний эквивалент доз, мЗв
		¹³⁷ Cs макс./средн./мин.	⁹⁰ Sr	
Брянская область				
Брасовский	Летча, Добрик, Новый Добрик, Зуево	3,59/1,21/0,33	0,025	0,22
Брянский, Выгоничский	Глиннишево, Добрунь, Старые Умысличи, Журиничи, Выгоничи	0,74/0,29/0,08	0,04	0,056
Гордеевский	Гордеевка, Поконов, Кожаны, Криштопов ручей, Мирный, Галыницина, Ширяевка, Литовк	37,7/12,0/1,42	0,25	3,87
Дубровский, Дятьковский, Жирятинский, Жуковский	Пупково, Большая Жуковка, Хизовка, Литуха, Верешевка, Ольшаница, Песурь	3,49/0,8/0,15	0,04	0,22
Злынковский	Барки, Савичка, Свищерки, Чута, Злынка, Кривой Сад, Муравихе, Мелвешья, Савицкий Лог и др.	38,7/22,7/1,54	1,15	3,17
Карачевский, Клетянский	Висельино, Слобода, Жданов	1,49/0,76/0,18	0,03	0,08
Климовский	Важница, Курганья, Глубочка, Команка, Новосергеевка, Ольховка, Побожьева, Литоновка, Покровская	13,93/5,7/0,16	0,21	1,5
Клинцовский	Калинин, Буян, Гута-Корещкая, Землица, Кожиха, Унеча, Лядовка, Ветрин, Поплавы, Чахов, Кипень, Рожковский и др.	26,38/10,7/0,54	0,18	1,8

Район	Населенный пункт максимальной радиоактивной загрязненности среды	Загрязненность, Кв/км ²		Средний эквивалент доз, мЗв
		¹³⁷ Cs макс./средн./мин.	⁹⁰ Sr	
Комаричский Красногорский	Палогощь, Черново Бабруевка, Заборка, Озерщина, Николаевка, Ялище, Макаричи, Новодрожжувелье, Еловка и др.	3,5/1,4/0,4 101,6/14,7/1,78	0,027 0,707	0,02 2,01
Мглинский, Навлинский	Киселевка, Харковка, Алешинка, Литовая	1,7/0,27/0,11	0,02	0,07
Новозыбковский	Верещаки, Грозный, Рассадники, Красная Заря, Рудня, Былинковка и др.	21,8/17,03/5,16	0,47	3,28
Погарский, Почепский, Рогнеденский, Севский	Калиновка, Чайковичи, Вара, Гол- роднище, Перегон, Майский, Лило- вое, Прирубки и др.	5,7/0,21/0,11	0,04	0,20
Стародубский	Крутая Буда, Комаковка, Лужки, Ялионка, Солова, Нетровка, Ойст- рица, Криницы и др.	6,61/1,67/0,67	0,06	0,34
Суземский, Суражский	Веселый Чай, Васильевка, Выдре- евка	1,47/0,55/0,12	0,02	0,08
Трубчевский, Унечен- ский	Красная Ель, Любел, Белая Береза, Рябчевск, Лучки, Макарезко, Поршня, Сосновка, Жеча	2,18/0,77/0,11	0,03	0,16
Калужская область				
Думиничский	Хатьковский	2,19/1,7/0,71	—	0,2
Жидиринский	Иночка, Коренево, Кресты, Овсо- рок, Зикеево, Белые Ямы, Щигры, Высокий Холм и др.	9,9/2,83/0,51	0,21	0,36

Кировский, Козельский, Куйбышевский	Хряпкино, Слободки, Верхние По- зищи, Шелновка	1,8/0,96/0,22	0,07	0,14
Людилевский	Войлово, Гряда, Мосеевка, Рома- новка, Крыница	4,6/2,1/0,61	0,04	0,18
Малоярославский, Ме- морский, Перемышль- ский, Сухоинический	Никольск, Головино, Староселье, Литицы	1,36/0,4/0,10	0,039	0,04
Хвастовичский	Берестна, Высокое, Колодясы, Краснежский, Буда, Красная Гора, Шишовка, Ловатянка и др.	11,84/3,62/0,38	0,11	0,63
Сухловский	Орловка	1,15/0,52/0,18	—	0,03
Курская область				
Дмитриевский	Галицино-Кузнецовка, Ямный, Ка- менка, Таракановка	1,91/0,37/0,13	—	0,04
Железнодорожный	Басово, Колесниково, Сухарево, Гнань, Толстовка и др.	3,58/2,48/0,77	—	0,25
Золотухинский, Насто- ренский, Колышевский	Золухино, Васильевка, Петровка	0,67/0,45/1,12	—	0,04
Поныровский, Фатеж- ский, Хомутовский, Ши- гровский	Городища, Карпуневка, Попыри, Хутор Завидный, Бугры, Самохва- ловка, Марков	2,31/1,31/0,30	—	0,13
Ленинградская область				
Волосовский, Кингисеп- ский, Лужский	Бегунищи, Гомонтово, Марково, Местново, Крикково, Сиса, Монастырки, Остров, Усть-Луга	2,45/1,38/0,55	—	0,14
Орловская область				
Болоховский	Фатнево, Боровое, Луново, Кучки, Новый Смет и др.	4,23/3,07/1,74	0,31	0,4

Район	Населенный пункт максимальной радиоактивной загрязненности среды	Загрязненность, Кг/км ²		Средний эквивалент доз, мЗв
		¹³⁷ Cs макс./средн./мин.	⁹⁰ Sr	
Верховский, Глазуновский, Дмитриевский, Должанский	Горбуновка, Воронино, Брусовец, Лубянка, Кожарник, Красная Стрелица	2,5/1,7/0,53	—	0,17
Залегощенский, Знаменский, Корсаковский, Краснозорецкий, Кромский	Зыбино, Верхнее скворецье, Дола, Михайловский, Усово, Долгое, Березовец, Софийские Выселки	5,21/1,17/0,14	0,28	0,12
Липецкий, Новосельский, Новодеревеньковский, Покровский	Гапюрово, Леханово, Лопатино, Верхние Прилепы, Подьяковлево, Горка, Петровский	3,01/1,14/0,31	—	0,11
Свердловский	Домнища, Федоровка, Давыдово	5,63/3,1/0,82	0,59	0,5
Сосковский, Троснянский, Урицкий, Шаблыкинский	Поевка, Дубрава, Лебедиха, Лужок, Черноды, Ломвец	3,09/1,15/0,55	—	0,15
Рязанская область				
Кораблинский, Милославский, Михайловский, Рязский, Старожилковский, Сколюнский	Жаркое, Нертино, Малые Выселки, Врунебацкое, Садовое, Трухачевка, Малая Дорожная, Николаевка и др.	3,97/1,97/0,58	—	0,19
Тульская область				
Арсеньевский	Ивановка, Большое Захарово, Липиново, Савинково, Мокрое	6,38/4,37/2,52	—	0,44

Белевский	Беляево, Зайцево, Шмидт, Бобринки, Гамово и др.	10,92/4,34/0,26	0,1	0,43				
Богородский, Веневский, Воловский, Донской Горсовет, Ефремовский, Каменский, Киреевский, Новомосковский, Одоевский	Горка, Городок, Красная горка, Горный, Донской, Северо-Задонск, Краснополюе, Сатинка, Черная Грязь, Мясновка	7,64/2,5/0,74	—	0,25				
Плавский	Никольское, Новая Локна, Средние Мармыжки, Плавское Запечье, Новая Слобода, Орликово	13,10/5,9/1,15	0,12	0,6				
Суворовский, Теплоогаревский, Узловский, Чернский, Щеканский	Цыгановка, Бутыркин, Поддубный, Крутой Верх, Каменецкий, Партизан, Новая Слобода, Львово, Пушкино, Пирогово	8,51/2,75/0,4	0,1	0,3				
Распределение числа населенных пунктов по величине плотности загрязнения среды ^{137}Cs и среднегодовой эффективной дозе								
Область	Число населенных пунктов	Плотность загрязнения ^{137}Cs			Эффективная доза, мЗв			
		< 1	1—5	5—15	> 15	< 1	1—5	> 5
Брянская	1784	931	421	279	153	1290	492	2
Калужская	403	141	196	66	0	379	24	0
Орловская	477	189	270	18	0	477	0	0
Тульская	354	67	213	74	0	345	9	0
Ленинградская	71	17	54	0	0	71	0	0
Курская	327	194	133	0	0	327	0	0
Рязанская	251	69	182	0	0	251	0	0
Итого	3667	1608	1469	437	153	3140	525	2

Глава I

1. К естественному радиационному фону относятся равномерно распределенные в среде радионуклиды, возраст которых совпадает с возрастом Земли, а также видоизмененные при прохождении через атмосферу космическое излучение. Взаимодействие фоновых излучений с веществом экосистемного метаболизма, и прежде всего с его наиболее активными (микроэлементными) звеньями, ведет к инициации и стимулу обменных процессов биосферы.

2. К радионуклидам естественного радиационного фона относятся калий-40 (^{40}K), уран-238 (^{238}U), торий и продукты распада урана, тория (радий, радон, торон и др.). Первичным геологическим источником радионуклидов является верхний слой литосферы (граниты, песчаники, сланцы). При взаимодействии с начальными звеньями обмена экосистем радионуклиды литосферы включаются в активный метаболизм, мигрируя в почву, растительность, животный мир.

К наиболее «мягким» излучателям фона относится калий-40, фотоны и β -частицы которого взаимодействуют с веществом по типу фотоэффекта. Благодаря химическим свойствам радионуклида включается в метаболизм клеточных мембран (ионный калийнатриевый «насос», проведение нервного импульса, возбудимость нервных клеток). Преимущественное содержание радионуклида отмечается в клетках с максимальной функциональной нагрузкой на мембраны: эритроцитов, нервной, мышечной, кроветворной тканей. Изотоп не накапливается в организме. Время двукратного снижения его активности за счет выведения из организма и радиоактивного распада 58 сут. Среднегодовая поглощенная доза от ^{40}K на организм 170—190 мкГр (17—19 мбэр).

К более эффективным (по ОБЭ) многоспектральным (α -, β -, γ -) излучателям с энергиями α -частиц порядка 5 МэВ, относятся уран, торий и продукты их распада. Спектр излучений (с наиболее эффективным, но незначительным по длине пробега α -компонентом), а также кальций-подобная схема миграции с локальным накоплением в костях предполагают избирательную высокоэффективную активацию процессов гемопоэза, стимул функций структур головного мозга, гонад.

Содержание урана и наиболее эффективного дочернего продукта его распада — радия — достигает в костях 5—10 пКи/г, в мягких тканях в сто — тысячи раз ниже. Лучевые нагрузки от излучений этого ряда (урана, радия, тория) с учетом относительной биологической эффективности спектра излучений достигают 162 мбэр/год в пересчете на весь организм. Из них 90—95 % приходится на ткани мозга, эндокринных желез, гонад, кроветворных органов. Из организма излучатели практически не выводятся.

К короткоживущим газообразным химически инертным звеньям естественного радиационного фона (звенья распада радия, тория) отно-

сятся радон (^{222}Rn), торон (^{220}Tn), эманулирующие в воздух из минералов, минералосодержащих строительных материалов, почв, накапливающиеся в подвалах, погребках, первых этажах домов, ванных комнатах. Максимальных концентраций газы (мощные α -излучатели с энергией частиц порядка 5 МэВ) достигают в почвенных порах, воздействуя на зародышевый материал растений, корневые системы; в метаболизм (организма, растений) не включаются. Доза на воздухоносные пути (мембраны альвеол) человека зависит от условий проживания. Максимальные лучевые нагрузки, характерные для жителей стран с длительным холодным периодом и жильем из каменно-кирпичного, бетонного строительного материала, достигают 100—1000 мбэр/год.

3. Космическое излучение подразделяется на первичное (до взаимодействия с атмосферой и экранами планеты) и вторичное, достигающее поверхности Земли после взаимодействия с магнитными полями, протонными поясами (экранами), газами атмосферы (кислородом, азотом). Первичное излучение состоит из потока частиц (обломков ядер) высоких энергий (до 100 ЭэВ). При взаимодействии с атмосферой энергия частиц растрачивается:

на взаимодействие с ядрами газов атмосферы и образование короткоживущих радионуклидов, трития (^3H), углерода (^{14}C), вносящих в последующем незначительный вклад в фоновую радиоактивность;

химическую активацию газов (азота, кислорода), с последующим образованием озонового слоя атмосферы.

Поверхности Земли достигают фотонное (функция взаимодействия первичных космических излучений с веществом атмосферы) и нейтронное излучения. Дозы фотонного излучения, нейтронной компоненты и их суммарная относительная биологическая эффективность растут с подъемом на высоту и перемещением к полюсам. Средние значения фоновых радиационных воздействий в средних широтах колеблются в пределах 300 мбэр, с подъемом на высоту 5 км возрастают более чем в 10 раз.

4. Фоновые космические излучения и расчетные лучевые нагрузки на жителя растут с перемещением на север (юг) от экватора в 1,3 (30°) и 1,8 (50°), достигая 0,8—4,5 бэр/год при перемещении к полюсу в сочетании с подъемом на высоту. Мощность таких радиационных нагрузок снижается в результате экранирования стенами и крышами жилищ, общее время пребывания в которых резко растет с перемещением от экватора к полюсам. Вместе с тем сами жилища, а также сжигание топлив, необходимых для отопления в холодный период года, ведут к увеличению лучевых нагрузок и смещению спектра излучений в сторону более эффективных (по ОБЭ) радиационных воздействий. В целом годовые радиационные нагрузки превышают естественные фоновые в 1,5—2 раза и более при резком росте α -излучений в составе воздействий и смещении лучевых нагрузок на легкие (радон, аэрозоли с сорбированными α -излучателями).

5. Основными долгоживущими радионуклидами антропогенного (ядерно-энергетического) происхождения являются цезий-137 (^{137}Cs), стронций (^{90}Sr), плутоний (^{239}Pu , ^{240}Pu). Скорость радиоактивного распада этих

излучателей ниже сложившейся скорости накопления в среде, что ставит их в разряд постоянных факторов экосистем. Плановыми (контролируемыми) источниками их поступления в среду являются ядерные реакции, используемые как в мирных (АЭС), так и в военных (ядерное оружие, испытания) целях.

Цезий (^{137}Cs) относится к ведущим дополнительным экологически новейшим радиоактивным составляющим среды. суммарное содержание которого в экосистемах северного полушария планеты (6 ГКи/год) превышает состоявшийся аварийный выброс от Чернобыльской АЭС. По метаболическим характеристикам близок к калию, но в отличие от естественного радиационного аналога, ^{40}K , является мощным эффективным γ -излучателем и источником β -частиц высоких энергий. Помимо изменений спектра эволюционно сформировавшихся радиационных воздействий (преимущественно на мембранные структуры клеток), отличается меньшей обменной подвижностью, накапливаясь в организме (тканях) до предела насыщения, превышающего суточное поступление в 30 раз.

Стронций (^{90}Sr), как и ^{137}Cs , является экологически новейшим метаболитом. Величина планового поступления в среду в 1,5—2 раза ниже по сравнению с цезием. По характеру миграции в экосистемах, организмах близок к естественным аналогам уран-ториевого ряда. В спектр излучений вносит нехарактерный для естественных аналогов поток β -частиц высоких энергий. Выводится из организма крайне плохо. Современные фоновые (равномерно распределенные) радиационные нагрузки от обоих излучателей крайне незначительны, ≤ 5 мкбэр/год.

Плутоний (^{239}Pu , ^{240}Pu) и обязательные спутники загрязнения, нептуний ($^{237-239}\text{N}$), америций ($^{237-242}\text{Am}$), кюрий ($^{238-250}\text{Cm}$). Величины их поступления в среду составляют сотые доли от поступлений цезия и стронция. Характер миграции не исследован. По химическим свойствам, спектру и энергетическим характеристикам сходны с естественными аналогами уран-ториевого ряда. Но вследствие вероятности формирования нерастворимых микроконгломератов, покрытых оксидной пленкой, возможны точечные облучения слизистых воздухоносных путей в больших микролокальных дозах.

Глава 2

1. К территориям с резко повышенными внешними лучевыми нагрузками на население относятся заселенные горные районы, плоскогорья Закавказья, Карпат, Италии, Альпийского пояса, Памира (Китай, Монголия, Таджикистан, Афганистан), Гималаев (Индия), северных широт (Норвегия, Дания, Исландия) и др. В целом на территориях с повышенным фоном внешних радиационных воздействий проживает 1 % населения Земли. Спектр радиации здесь смещен в сторону максимально проникающего в вещество, высокоэффективного при взаимодействии с биологическими началами, нейтронного излучения, превышающего «нормы» средних равнинных широт в десятки—сотни раз. Районы тем не менее обжиты и считаются более здоровыми по сравнению с равнинными

территориями средних широт, отличаются более высокой заоровой детородной функцией коренного населения, а также большим разнообразием растительности. Периодически, с 11-летним циклом, резкое повышение излучений такого спектра (солнечная активность) испытывает все население планеты. Реакции при этом крайне противоположны.

2. К территориям с резко повышенной естественной радиоактивностью среды относятся территории с аномальной структурой земной коры, титанической и вулканической активностью, и связанным с этим проникновением радиоактивности в верхние слои литосферы, почву, биоценоотический метаболизм. Наиболее известными районами высокой радиоактивности среды являются монацитные районы Керала (Индия), Рио-де-Жанейро (Бразилия), сланцевые и гранитные районы Франции, Урала, Тувы (Восточная Сибирь), ряд аналогичных районов Африки, Америки, Юго-Восточной Азии. Расчетные лучевые нагрузки на население превышают здесь фоновые величины в 5—10 раз и более. До 30 % доз внутреннего облучения формируется от α -активных излучателей группы U — Th с преимущественными лучевыми нагрузками на гонады, кроветворные ткани, мозг. Продолжительность жизни населения таких районов тем не менее выше средних, характерных для страны, значений. В эволюционном плане именно эти территории являлись местами наиболее эффективного видообразования.

3. Начало массивному радиоактивному загрязнению среды испытаниям ядерного оружия было положено США (общее число взрывов 1085, из них 205 в атмосфере) и последовавшему за ними СССР (общее число взрывов 715, из них 215 в атмосфере). Определенный вклад в радиационную деформацию среды внес Китай (35 ядерных взрывов, из них 22 в атмосфере) и в меньшей степени — Англия, Франция. К территориям с повышенной локальной загрязненностью среды от выпадений радиоактивных осадков (цезия, стронция, плутония, радиоактивного йода и др.) после испытаний относятся штаты Невада, Нью-Мексико (более 2 млн чел.), Семипалатинский полигон, Алтайский край, Новая Земля (около 3 млн чел.), некоторые районы Памира (несколько тысяч человек). Помимо испытаний в военных целях, ядерные взрывы использовались для геологической (нефть, газ) разведки. Общее число таких взрывов в США 27, в нашей стране — 115. Взрывы признаны нерентабельными и прекращены. Радиоактивная загрязненность среды прилегающих к полигонам редко заселенных территорий по цезию-137 составляет 0,07—0,1 Ки/км², от глобальных выпадений — порядка (1—6) мКи/км².

4. Работа атомных электростанций ведет к загрязнению среды радионуклидами того же состава, что и при ядерных взрывах. В нормальном режиме электростанция средней мощности выбрасывает в среду около 0,2 мКи/год активных радиационных метаболитов (цезия-137, стронция и др.). В мире в настоящее время работает свыше 500 мощных ядерно-энергетических блоков (суммарный выброс в среду активных метаболитов в норме равен ~1 Ки/год) и примерно такое же количество исследовательских и узкоцелевых реакторов. Работа АЭС связана тем не менее с авариями, с частотой, близкой к одной аварии в год. Каждая из них сопровождается дополнительным загрязнением среды, превышающим

нормальный (допустимый) режим загрязнения среды минимум в сотни раз, в радиусе от 50 до 500 км (Уиндс-Кейл, Англия) от реактора. Равномерное кумулятивное фоновое загрязнение среды от таких источников происходит преимущественно в северном полушарии планеты. При микролокальных (в экосистемных масштабах) концентрациях фактора в промышленных центрах промышленно развитых стран (Нью-Йорк, Дрезден, Шиппенгорт и др.).

5. К военным источникам радиоактивного загрязнения среды относятся военно-морские базы АПЛ, ядерные центры России, США, Англии, Франции, Китая, выполняющие отработку технологий, перезарядку ядерных зарядов, пуск реакторов, захоронение отходов. Местоположение таких баз (побережья морей, бухты, заливы, малозаселенные территории) указывает на риск микролокального загрязнения среды ядерным топливом (ураном, плутонием), продуктами их распада и деления (цезием, стронцием и др.) при минимальном воздействии на население. Загрязнение незначительно, за исключением аварии на военном-ядерном центре России «Челябинск-40» («Маяк») в 1957 г. охватившей территорию с населением 3 млн 548 тыс. чел. (Челябинская, Тюменская, Свердловская области). Площадь территорий с загрязнением среды активностью свыше 0,1 Ки/км² по стронцию-90 (основному радионуклиду взрыва) составила 23 тыс. км² с численностью населения 270 тыс. чел.

6. Авария на ЧАЭС является крупнейшей аварией в мире, эквивалентной локальной ядерной войне. Первичный выброс в среду цезия-137 составил 2 мКи, йода-131, стронция, плутония и других радионуклидов — 20 мКи. Глобальным выпадениям радиоактивных осадков были подвержены практически все страны Европейского континента, Средней Азии. Но наиболее массивны загрязнения России, Украины, Беларуси. Суммарная площадь территорий, загрязненных в катастрофически громадных размерах, > 40 Ки/км², составила 7000 км² (2000 км² в России). Срочно эвакуировалось свыше 130 тыс. чел. Для экстренной (неэффективной) дезактивации территорий было снято около 200 тыс. м² грунта, заасфальтировано 2500 км дорог. Общая площадь Cs — Sr — Pu-загрязненности России свыше 1 Ки/км² составила 147 тыс. км² с 4270 населенными пунктами и общей численностью населения порядка 3 млн чел. Треть населения (783 тыс.) — дети. В Беларуси аналогичным последствиям подвержены 20 % населения, на Украине — 30 %. Наиболее подверженными радиационным воздействиям в России оказались Брянская, Калужская, Тульская, Воронежская области.

Глава 3

1. Большая часть радиоактивных газо-аэрозольных выбросов ядерных установок попадает в тропосферу с последующим вовлечением в формирование облаков, сорбцией аэрозолями воздушных масс и выпадением с осадками либо «сухими» гравитационными осадками в составе

дисперсных (преимущественно техногенных) частиц. Скорость осаднения подчиняется экспоненциальному закону с периодом полуосаждения 20--40 сут.

Осаждение частиц, ушедших в стратосферу (испытания ядерного оружия, авария на ЧАЭС), происходит крайне медленно вследствие постоянных горизонтальных воздушных течений по параллелям, вовлекающих в движение радиоактивные аэрозоли со скоростью порядка 100 км/ч, и постоянных турбулентных токов от подлежащих плотных воздушных масс, препятствующих осаднению. Наибольшая часть постепенных осаднений происходит на широтах 40—50° при максимуме выпадений весной — в начале лета. Накапливаемые дозы от атмосферных загрязнений от АЭС крайне невелики: $(0,1 \div 30) \cdot 10^{-3}$ чел. · Гр на 1 МВт выбрасываемой энергии.

2. Инертные радиоактивные газы, преимущественно кrypton-85 (^{85}Kr), не поддаются радиационной очистке и выбрасываются в атмосферу при эксплуатации ядерных энергетических установок, переработке ядерных топлив в количествах 400 Ки (14,8 гБк) на 1 МВт вырабатываемой электроэнергии. Радиационная нагрузка от воздействия фактора незначительна и составляет 7 чел. · мкГр на 1 МВт электроэнергии. Вместе с тем диффузное (нехарактерное для естественных радиоактивных газов) накопление криптона в атмосфере и соответственно диффузная ионизация воздуха — причина резко повышенной ионной сорбции токсических (сульфатных и нитратных) загрязнителей воздушными мелкодисперсионными каплями воды атмосферы с последующим ростом «кислых» туманов, дождей и, как следствие, хронической ингаляции, падением иммунитета, ростом респираторных заболеваний, ухудшением репродуктивных функций жителей (преимущественно промышленных городов). В экосистемном плане диффузная ионизация воздушных масс и связанная с этим повышенная седиментационная активность воздуха ведут и к изменениям радиационного баланса Земли, диффузному росту температуры атмосферы, температурным инверсиям с последующим изменением климата.

3. Почвенные процессы обмена относятся к числу начальных (интимных) звеньев многофакторных экосистемных процессов, меняющихся при незначительных, в том числе и радиационных, изменениях среды. Уровни организации, а следовательно, и радиочувствительности активных биологических начал почв (сапрофитных одноклеточных, растений, червей, насекомых) чрезвычайно разны. Поэтому внесение в почву дополнительного биологически активного радиационного фактора, с последующим расслоением ответов «повреждения — стимулы», может проявиться резким нарушением экосистемного гомеостаза. Почва, кроме того, является начальным звеном миграции радионуклидов по биологическим цепям с неизбежной конечной кумуляцией в организме человека.

Различают горизонтальную и вертикальную миграции радионуклидов в почвах. Горизонтальная миграция характерна для радионуклидов свежих радиоактивных загрязнений, до включения в звенья почвенного метаболизма. Скорость такой миграции, характер перераспределения связаны с выпадением осадков, таянием снега, зависит от рельефа местно-

сти (скопление в низинах и «самоочищение» высоко расположенных участков почв).

Вертикальная миграция зависит от радиационной емкости почв (ее сорбционной емкости, химических свойств, определяющих скорость образования нерастворимых соединений с радионуклидами, биологической поглотительной активности, скорости включения в состав микрофлоры и дальнейшие звенья обмена). Наибольшей радиационной емкостью обладают чернозем, почва лесной подстилки, наиболее выраженной по отношению к калиевому аналогу почвенного метаболизма цезия. Стронций, кальциевый аналог обмена, плохо захватывается живой (активной) компонентой почв и значительно быстрее мигрирует в глуболежащие слои.

Наиболее мощная составляющая миграции — биогенная концентрация радионуклидов. Скорость ее зависит от степени экосистемной «новизны», растворимости радиационного фактора и его соединений, влажности, температуры почв, концентрации ионов в почвенной среде. Максимальная скорость включения радионуклидов в биогенный метаболизм характерна для слабощелочных и нейтральных почв; в кислых почвах радионуклиды «консервируются» на более долгосрочные периоды. Наиболее доступен для корневых систем почв ^{90}Sr . Коэффициент перехода ^{137}Cs в сельскохозяйственные культуры ниже. Переходу радионуклидов из органической формы в минеральную (с последующим резким снижением миграции по биологическим цепям) способствует глубокая вспашка почв. Блокаде почвенного метаболизма способствует внесение в почву нерадиоактивных конкурентов почвенного метаболизма радионуклидов — кальция, калия. Интегральный показатель почвенной миграции радионуклидов — период полуочищения корнеобитаемых слоев от радионуклидов цезия и стронция максимален для дерново-подзолистых (характерных для загрязненных районов России) почв и равен 129 годам; для чернозема, а также торфяных почв эта величина значительно ниже (порядка 30 лет).

К наиболее массивным почвенным метаболитам, длительно сохраняющимся в поверхностных почвенных слоях, относится плутоний. Излучатель регистрируется в виде «горячих частиц» диоксида плутония, диаметром 10 мкм и активностью частиц порядка 1 мБк. Регистрируемое в почвах соотношение радионуклидов $\text{Cs} : \text{Sr} : \text{Pu} = 1 : 0,1 : 0,0012$, формируемых эффективных доз $1 : 0,25 : 0,01$.

4. Водная поверхность Земли, площадь которой составляет $\frac{2}{3}$ общей земной поверхности, является ведущим акцептором глобальных радиоактивных загрязнений воздушной среды. В морские воды попадает до 80 % радиоактивных загрязнений от непосредственного осаждения на поверхность и со стоками талых, дождевых, речных вод, со взвешенными и растворенными радионуклидами. Практический интерес представляет поведение радионуклидов в прибрежных водах, лагунах, водных пространствах над континентальным шельфом, с глубиной ≤ 1 км.

До 70 % поступающих на водную поверхность радионуклидов содержатся здесь в верхних слоях воды, поглощаясь обязательным составляю-

шим водных экосистем — фито-, зоопланктоном. Скорость обмена и коэффициент накопления радионуклидов этим звеном водной радиационной миграции достигают 10 000. Высокая пролиферативная активность клеточной массы с последующим осаждением ее омертвевшего звена ведет к эффективному захвату 99 % загрязняющих поверхностную водную среду радионуклидов и их переходу в донные отложения.

Около 20--30 % радиоактивных загрязнений находятся на глубине до ≥ 700 м. Миграция (и естественная дезактивация водной среды) осуществляется здесь по более высоким, но менее эффективным трофическим цепям, с меньшими (в десятки — сотни раз) коэффициентами накопления радионуклидов в теле рыб. В донных отложениях характер миграции близок к почвенному. Коэффициенты накопления радионуклидов наиболее велики для высших водных растений, моллюсков.

5. Скорость миграции радионуклидов в пресных водоемах значительно выше, что связано с постоянным солевым дефицитом, характерным для биомассы этой среды. Пресноводные одноклеточные, как и планктон морей, являются основным звеном естественной биологической дезактивации воды. Процесс протекает здесь значительно быстрее и как следствие радиационной биологической стимуляции сорбционной способности биосистем. Время полуточищения непроточных водоемов средних широт от цезий-стронциевых загрязнений среды составляет 10—20 лет. В реках процесс протекает с большей (в десятки — сотни раз) скоростью, усиливаясь стоком загрязнений в морские воды. Накопление радионуклидов в донных отложениях пресных водоемов в отличие от морей невелико, превышает радиоактивность воды в 5—10 раз.

Накопление радионуклидов в подземных ненапорных грунтовых водах незначительно вследствие задержки радионуклидов в почвах. В напорные артезианские воды радионуклиды ядерно-энергетического происхождения не проникают.

6. Различие реакций экосистем и ее составляющих на радиоактивность, в том числе и от радионуклидов ядерно-энергетического происхождения, связано, как правило, с фоновой токсической техногенной загрязненностью среды. Такие различия требуют учета размеров и эффективности фоновых воздействий на экосистемы. Наиболее агрессивными, устойчивыми в среде и накапливающимися в пищевых экологических цепях в той же кратности, что и радионуклиды, являются: пестициды (ДДТ), тяжелые металлы, газоаэрозольные выбросы от сжигания топлив (особенно диоксид серы, оксиды азота, 3,4-бенз(а)пирен).

Отличительной особенностью экосистемного метаболизма загрязнителей этого ряда является их способность при переходе из первичного звена миграции в последующие превращаться в новые, более токсичные формы.

Наиболее массивно загрязнение среды диоксидом серы, время существования которого в атмосфере равно 2--3 ч. При взаимодействии с водой (влажность воздуха) SO_2 переходит в более агрессивную серную кислоту, сульфаты. Суммарный среднегодовой выброс токсиканта составляет 150 млн т. Загрязненность атмосферы в России превышает ПДК в 5—10 раз, представляя угрозу закислению водоемов, гибели планк-

тона (ведущего звена дезактивации водной среды), изменениям спектра солнечной радиации и др.

Пестициды, содержащиеся в почвах страны в количествах 3—5 кг/га, помимо нейротропной, канцерогенной, генетической опасности вносят существенный вклад в разрушение экологического равновесия экосистем за счет деградации (гибели) начальных популяционных звеньев метаболизма биоценозов.

Тяжелые металлы, выбрасываемые в атмосферу, осаждаясь, деформируют экосистемный метаболизм почв, поверхностных вод. Техногенное содержание метаболитов в среде превышает естественное в сотни—тысячи раз. В экосистемные процессы ежегодно вовлекается до 400 Гг тяжелых металлов. Первичным звеном миграции, как и в радиационном экосистемном метаболизме, являются почвенная, водная, сапрофитная микрофлора, переводящая металлы в органические легко подвижные структуры. Последствия таких массивных воздействий, характерных для 50 % территорий России, аналогичны патологическим реакциям на резко повышенную радиоактивность среды.

3,4-бенз(а)пирен содержится в воздушной среде городов в концентрациях, превышающих ПДК в 5—10 и более раз, является внеконкурентным канцерогеном современной среды.

Последствия воздействия всей совокупности фоновых техногенных факторов среды аналогичны последствиям хронических радиационных воздействий в дозах, превышающих принятые ПД.

Глава 4

1. Ионизирующее излучение при прохождении через биологические ткани избирательно (согласно физическим законам взаимодействия с веществом) поглощается активными центрами клеточных ферментов, кобальтом, никелем, медью, железом. Такие взаимодействия при малых дозах и адаптированном спектре ионизирующих излучений лежат в основе активизации ферментов (цитохромов) и курируемых ими энергетических процессов клетки (транспорт кислорода в биологических цепях ресинтеза АТФ). Резкое увеличение дозы, смещение спектра излучений в сторону ≥ 1 МэВ и выше сопровождается разрушением ферментных структур этого ряда, нарушением ферментного транспорта биологического окислителя, выходом его в клеточную среду (в том числе и в виде биологически агрессивного атомарного кислорода), реакциями пероксидного окисления липидов клеточных мембран (ПОЛ), разрушениями ДНК. Компенсаторное смещение энергетических процессов на анаэробное дыхание сопровождается массивным выходом токсических метаболитов в клетку.

Параллельно цитохромному эффекту, в том числе и вследствие реакций ПОЛ, в клетке в таких условиях идет разрушение мембран с последующим подавлением их дренажно-детоксикационных функций при параллельном накоплении эндогенных токсических метаболитов, резком нарушении барьерной, рецепторно-сигнальной активности и закономер-

ном выходе клеточных популяций из-под гуморального (сигнального) контроля.

Накопление в клетке токсических метаболитов, выход свободных радикалов, непосредственное попадание квантов (частиц) высоких энергий в ДНК и повреждение генетического кода клетки ведут к нарушениям процессов генетически контролируемого синтеза клеточного вещества (белка), превращая тем самым клетку в иммуночужеродную структуру. Фиксация повреждения ДНК и конкурентность поврежденной клетки лежат в основе онкогенеза, формирования наследственной патологии (стохастические эффекты).

2. Сохранение согласованности функций клеток, межклеточных взаимодействий, циклов роста, деления, отмирания, постоянства внутренней среды органов и систем осуществляются благодаря постоянному надзору и вносимым коррекциям, выполняемым иммунной, нервной, эндокринной системами организма.

Повышенная частота периодических клеточных поломок, появления чужеродного белка, нехарактерных мембранных сигналов ведет к повышенной напряженности иммунных реакций (Т-лимфоцитарного надзора). Постоянная (истощающая) напряженность таких реакций (при хроническом воздействии фактора и особенно на фоне техногенного дефицита иммунных функций) ведет к повышенному риску воспалительных процессов (ОРЗ, пневмонии, нефриты, уретриты, ЛОР-патология).

Повышенная сигнальная напряженность нервной и эндокринной систем, непосредственно связанных с иммунной системой, благодаря рецепторным полям в стенках сосудов эпирезарного кровотока при однотипности межсистемности «языка» связи в совокупности с непосредственными реакциями клеток систем на воздействие радиации, ведет к нарушениям нейроэндокринной регуляции гомеостаза. Закономерные здесь искажения межнейронных (и последующих межсистемных) связей, рассогласование нейро-эндокринных регуляторных реакций проявляются повышенным риском расстройства поведения, сна, судорожных припадков, амнезией, неадекватных аффектов, депрессии интеллекта и др. Частота таких реакций в группе ликвидаторов аварии превышает спонтанную частоту в 10 раз.

Повышенный риск таких нарушений прослеживается у детского населения радиоактивных территорий, особенно у детей, перенесших тератогенные радиационные травмы. Частота нейро-эндокринных расстройств превышает здесь фоновую (спонтанную) в два раза.

3. Популяция — население, заселяющее определенное пространство с характерным климато-географическим, микроэлементным, радиационным составом среды и с определенными ферментно-гормональными (адекватными составу среды) генетически фиксированными особенностями обмена (популяционным фенотипом). Резкая смена состава среды и особенно факторов стационарности экосистем (микроэлементного, радионуклидного состава почв, спектра внешних радиационных воздействий и др.) ведет к адаптационной напряженности реакций нервной, иммунной, эндокринной систем регуляции гомеостаза (популяционный стресс) с последующей коррекцией обмена и, в случае постоянства вновь

сформировавшейся среды, генетической фиксацией фенотипа. Динамика процесса однотипна со стрессорными реакциями отдельного организма, но растянута минимум на 10—15 лет для окончательной коррекции обмена (и на пять — шесть поколений для его окончательной генетической фиксации).

4. Повышенная частота клеточных обменных и структурных генетических поломок (стохастические эффекты) являются фактором естественного отбора клеточного уровня, завершающегося формированием устойчивости как клеточных, так и организменных популяций, на фоне временно повышенной частоты онкологических заболеваний и наследственных дефектов. Максимальный риск таких реакций (количественная оценка стохастических эффектов) принят равным $2 \cdot 10^{-3} \text{ Зв}^{-1}$ (или $2 \cdot 10^{-5} \text{ бэр}^{-1}$) — вероятность формирования рака со смертельным исходом, равная двум шансам из 1 тыс. при накоплении дозы в 1 Зв, и двум — из 100 тыс. при накоплении дозы в 1 бэр. Повышенная частота таких реакций как функций временной напряженности адаптационных систем наглядно иллюстрируется (А. М. Кузин) снижением наследственных дефектов и частоты онкопатологии при достоверном росте средней продолжительности жизни и здоровья в популяциях, заселяющих территории с резко повышенным уровнем радиационных воздействий.

5. Экосистемные реакции на радиационную деформацию среды не систематизированы. Ряд исследований указывает на рост видового разнообразия растительности, средней продолжительности жизни, функциональной активности животных и человека, проживающих в зонах повышенного радиационного фона. Аналогичная (новейшая) радиационная обстановка на территориях с мощным токсичным фоном ведет к крайне противоположным реакциям (гибель лесов, повышенная частота генетических дефектов у новорожденных, повышенная заболеваемость, деградация интеллекта). Системные исследования, проведенные Н. В. Тимофеевым-Ресовским, указывают на расслоение симбиотической согласованности функциональной активности составляющих биоценозов: увеличение скорости роста и функциональной активности низших биологических видов на фоне угнетения пролиферации высших форм растений, животных. Такие реакции подтверждаются на территориях с загрязнением среды $> 40 \text{ Ки/км}^2$. Реакции тем не менее будут развиваться по типу «экологического стресса» с последующей нормализацией экосистемных взаимодействий, на что указывает ряд прослеженных в динамике данных по состоянию биоценозов на территориях, радиоактивных от аварий и ядерных испытаний.

Глава 5

1. Первая попытка исследований по выяснению допустимых радиационных воздействий была предпринята П. Кюри в 1911 г., завершившись введением в практику первых критериев радиационной безопасности, «пороговой эритемной дозы» 340 Р, вызывавшей легкое покраснение, исчезающее через 24 ч, с повторной непродолжительной эритемой

спустя 7—10 сут. В последующем, в связи с использованием более жестких, проникающих в биологические ткани излучений и накоплением знаний о повреждении процессов обмена, генетического материала клеток, ростом профессионального радиационного риска, дозы были снижены в 10 раз (35 Р/год, Женева, 1928 г.). В 1940-х гг. вследствие противоречий в измерении лучевых профессиональных нагрузок доза снижается до 15 Р/год. В 1948 г. в связи с накоплением данных об обширных контингентах лиц, испытывавших как острое (Хиросима, Нагасаки), так и хроническое (урановые рудники, подготовка ядерного топлива, ядерные реакторы, аварии, испытания ядерного оружия) радиационное воздействие, доза снижается до 5 бэр/год. Изменяется понятие радиационно-безопасной дозы, трактовавшейся ранее как «толерантная» или «переносимая» без предположения последствий как для организма, так и для его потомства. Вводится понятие предельно допустимой дозы (ПДД), которая «не должна вызывать значительных повреждений в любой момент времени от начала радиационных воздействий на протяжении всей жизни». Процесс реорганизации и коррекции представлений о ПДД был практически завершен к 1958 г. и утвержден в документах, принятых на Международном конгрессе радиологов. Документы по радиационной безопасности, соответствующие международным требованиям, были приняты в нашей стране в 1960 г. В стране была организована «Национальная комиссия по радиационной защите», непосредственно связанная с международной комиссией (МКРЗ), расположенной в Женеве.

2. Основы радиационной безопасности документального принятия ПДД радиационных воздействий построены с учетом возраста, пола, профессиональной деятельности, числа облучаемых и доли облучаемых по профессиональной принадлежности от общего числа населения страны. Допустимые радиационные воздействия предусматривают полное исключение радиогенных соматических реакций (нарушение сопротивляемости, нервно-психического статуса организма) и минимальную величину стохастических эффектов, не выходящих за пределы аналогичных рисков от воздействия других факторов среды. Допустимость радиационного фактора обосновывается и социально-экономическими категориями, по соотношению «польза—вред» от радиационных и однотипных по конечной цели нерадиационных технологий, например, получения электроэнергии тепловыми и атомными электростанциями, диагностики заболеваний пропедевтическими и рентгенологическим приемами; инициации синтеза химическими и радиационными катализаторами.

3. Нормы радиационной безопасности, принятые в России в 1999 г. (НРБ-99), предусматривают следующие принципы радиационной безопасности:

непревышение допустимых пределов индивидуальных доз облучения граждан от всех источников ионизирующего излучения (принцип нормирования);

запрещение всех видов деятельности по использованию источников ионизирующего излучения, при которых полученная для человека и общества польза не превышает риска возможного вреда, причиненного

сформировавшейся среды, генетической фиксации фенотипа. Динамика процесса однотипна со стрессорными реакциями отдельного организма, но растянута минимум на 10—15 лет для окончательной коррекции обмена (и на пять — шесть поколений для его окончательной генетической фиксации).

4. Повышенная частота клеточных обменных и структурных генетических поломок (стохастические эффекты) являются фактором естественного отбора клеточного уровня, завершающегося формированием устойчивости как клеточных, так и организменных популяций, на фоне временно повышенной частоты онкологических заболеваний и наследственных дефектов. Максимальный риск таких реакций (количественная оценка стохастических эффектов) принят равным $2 \cdot 10^{-3} \text{ Зв}^{-1}$ (или $2 \cdot 10^{-5} \text{ бэр}^{-1}$) — вероятность формирования рака со смертельным исходом, равная двум шансам из 1 тыс. при накоплении дозы в 1 Зв, и двум — из 100 тыс. при накоплении дозы в 1 бэр. Повышенная частота таких реакций как функций временной напряженности адаптационных систем наглядно иллюстрируется (А. М. Кузин) снижением наследственных дефектов и частоты онкопатологии при достоверном росте средней продолжительности жизни и здоровья в популяциях, заселяющих территории с резко повышенным уровнем радиационных воздействий.

5. Экосистемные реакции на радиационную деформацию среды не систематизированы. Ряд исследований указывает на рост видового разнообразия растительности, средней продолжительности жизни, функциональной активности животных и человека, проживающих в зонах повышенного радиационного фона. Аналогичная (новейшая) радиационная обстановка на территориях с мощным токсичным фоном ведет к крайне противоположным реакциям (гибель лесов, повышенная частота генетических дефектов у новорожденных, повышенная заболеваемость, деградация интеллекта). Системные исследования, проведенные Н. В. Тимофеевым-Ресовским, указывают на расслоение симбиотической согласованности функциональной активности составляющих биоценозов: увеличение скорости роста и функциональной активности низших биологических видов на фоне угнетения пролиферации высших форм растений, животных. Такие реакции подтверждаются на территориях с загрязнением среды $> 40 \text{ Ки/км}^2$. Реакции тем не менее будут развиваться по типу «экологического стресса» с последующей нормализацией экосистемных взаимодействий, на что указывает ряд прослеженных в динамике данных по состоянию биоценозов на территориях, радиоактивных от аварий и ядерных испытаний.

Глава 5

1. Первая попытка исследований по выяснению допустимых радиационных воздействий была предпринята П. Кюри в 1911 г., завершившись введением в практику первых критериев радиационной безопасности, «пороговой эритемной дозы» 340 Р, вызывавшей легкое покраснение, исчезавшее через 24 ч, с повторной непродолжительной эритемой

спустя 7—10 сут. В последующем, в связи с использованием более жестких, проникающих в биологические ткани излучений и накоплением знаний о повреждении процессов обмена, генетического материала клеток, ростом профессионального радиационного риска, дозы были снижены в 10 раз (35 Р/год, Женева, 1928 г.). В 1940-х гг. вследствие противоречий в измерении лучевых профессиональных нагрузок доза снижается до 15 Р/год. В 1948 г. в связи с накоплением данных об обширных контингентах лиц, испытывавших как острое (Хиросима, Нагасаки), так и хроническое (урановые рудники, подготовка ядерного топлива, ядерные реакторы, аварии, испытания ядерного оружия) радиационное воздействие, доза снижается до 5 бэр/год. Изменяется понятие радиационно-безопасной дозы, трактовавшейся ранее как «толерантная» или «переносимая» без предположения последствий как для организма, так и для его потомства. Вводится понятие предельно допустимой дозы (ПДД), которая «не должна вызывать значительных повреждений в любой момент времени от начала радиационных воздействий на протяжении всей жизни». Процесс реорганизации и коррекции представлений о ПДД был практически завершен к 1958 г. и утвержден в документах, принятых на Международном конгрессе радиологов. Документы по радиационной безопасности, соответствующие международным требованиям, были приняты в нашей стране в 1960 г. В стране была организована «Национальная комиссия по радиационной защите», непосредственно связанная с международной комиссией (МКРЗ), расположенной в Женеве.

2. Основы радиационной безопасности документального принятия ПДД радиационных воздействий построены с учетом возраста, пола, профессиональной деятельности, числа облучаемых и доли облучаемых по профессиональной принадлежности от общего числа населения страны. Допустимые радиационные воздействия предусматривают полное исключение радиогенных соматических реакций (нарушение сопротивляемости, нервно-психического статуса организма) и минимальную величину стохастических эффектов, не выходящих за пределы аналогичных рисков от воздействия других факторов среды. Допустимость радиационного фактора обосновывается и социально-экономическими категориями, по соотношению «польза—вред» от радиационных и однотипных по конечной цели нерадиационных технологий, например, получения электроэнергии тепловыми и атомными электростанциями, диагностики заболеваний пропедевтическими и рентгенологическим приемами; инициации синтеза химическими и радиационными катализаторами.

3. Нормы радиационной безопасности, принятые в России в 1999 г. (НРБ-99), предусматривают следующие принципы радиационной безопасности:

непревышение допустимых пределов индивидуальных доз облучения граждан от всех источников ионизирующего излучения (принцип нормирования);

запрещение всех видов деятельности по использованию источников ионизирующего излучения, при которых полученная для человека и общества польза не превышает риска возможного вреда, причиненного

дополнительным к естественному фону облучением (принцип обоснования);

поддержание на возможно низком и достижимом уровне с учетом экономических и социальных факторов индивидуальных доз облучения и числа облучаемых лиц при использовании любого источника ионизирующего излучения (принцип оптимизации).

НРБ-99 распространяются на следующие виды воздействия ионизирующего излучения на человека:

облучение персонала и населения в условиях нормальной эксплуатации техногенных источников ионизирующего излучения;

облучение персонала и населения в условиях радиационной аварии;

облучение работников промышленных предприятий и населения природными источниками ионизирующего излучения;

медицинское облучение населения.

Дозовые пределы радиационных воздействий:

	На персонал (группа А)	На население (группа Б)
Эффективная доза за год (в среднем из любых последовательных 5 лет)	20 мЗв, но < 50 мЗв (5 бэр)	1 мЗв, но < 5 мЗв (2,5 бэр)
Эквивалентная доза, накопленная за год:		
в хрусталике	150 мЗв (15 бэр)	15 мЗв (1,5 бэр)
в коже	500 мЗв (50 бэр)	50 мЗв (5 бэр)
в кистях и стопах	500 мЗв (50 бэр)	50 мЗв (5 бэр)

Для женщин в возрасте до 45 лет, работающих с источниками ионизирующего излучения, введены дополнительные ограничения: эквивалентная доза на поверхности кожи нижней части живота не должна превышать 1 мЗв/мес, а поступление радионуклидов в организм не должно превышать за год $1/20$ предела годового поступления для персонала. При этом эквивалентная доза облучения плода за 2 мес невыявленной беременности не должны превысить 1 мЗв.

Планируемое повышенное облучение при ликвидации аварии выше установленных дозовых пределов может быть разрешено только в тех случаях, когда нет возможности принять меры, исключающие их превышение, и может быть оправдано только спасением жизни, предотвращением дальнейшего развития аварии и облучения большого количества людей. Планируемое повышенное облучение допускается только для мужчин старше 30 лет при их добровольном письменном согласии и знании о возможных дозах облучения и риске для здоровья.

Для населения радиоактивных территорий приняты дополнительные, контролируемые госсаннадзором, нормы (ВДУ-92), ограничивающие радиоактивность продуктов питания, из расчета допустимого (по НРБ-96) уровня внутренних лучевых нагрузок. Удельная активность, нКи/л, не должна превышать: воды -- 50, хлеба -- 16, молока -- 10, мяса -- 20.

4. Нормирование радиационного фактора с учетом реакций экосистем представляет серьезную и нерешенную проблему. Считается, что

максимальным накопителем радионуклидов, загрязняющих среду, и максимально радиочувствительным (критическим) звеном биоценозов является человек. Ввиду этого (во многом оправданного) положения, принятые НРБ, являются правомерными для переноса на экосистемы в целом. Вместе с тем в ряде ситуаций экосистемного метаболизма радионуклидов, критическим звеном могут быть труднопредсказуемые без специальных исследований виды и их совокупности. Так, скорость накопления радионуклидов елью, сосной в 20 раз превышает скорость накопления радиационного фактора человеком, что лежит, по всей вероятности, в болезненности хвойных лесов, прилегающих к АЭС (регистрируемой в промышленных центрах США, Европы). Чрезвычайно большие лучевые нагрузки, по сравнению с человеком, формируются на радиационных территориях у оленей, лосей, коров при свободном выпасе, что связано с максимальным накоплением радионуклидов в травах.

Сравнивая предельные радиационно-гигиенические дозы с радиационно-экологическими, следует иметь в виду, что при разработке антропогенных норм радиационных воздействий в них закладывается высокий коэффициент запаса: доза, вызывающая непосредственные соматические радиогенные реакции у человека, в 100—1000 раз выше принятых ПДД. Экологические разработки, указывающие на размеры «радиологической емкости» экосистем, отсутствуют. Поэтому основным ориентиром допустимых пределов радиоактивности среды должны оставаться «Нормы радиационной безопасности» с учетом регистрируемых и расчетных величин лучевых нагрузок при нахождении в составе радиоактивно загрязненного биоценоза.

Глава 6

1. Радиационно-защитные меры по профилактике последствий радиационных аварий подразделяются на три последовательных этапа:

начальный — в период угрозы и первые часы выброса радионуклидов в окружающую среду;

первичный — ликвидации последствий аварии в условиях состоявшегося выброса и осадения радионуклидов на землю;

проведения и завершения работ по ликвидации аварии и ее последствий.

Действия в период угрозы и на протяжении первых часов от момента аварии должны включать:

экстренное оповещение работников аварийного объекта и находящихся вблизи предприятий, жителей прилегающих территорий, администрации, МЧС России, Госкомприроды о потенциальной либо состоявшейся опасности радиоактивного загрязнения среды;

проведение анализа радиоактивного состава загрязнений, высоты газозеролистного выброса, направления и скорости его перемещения, прогноза развития радиационной обстановки на территориях риска радиационных загрязнений среды;

предупреждение населения и администрации территорий повышенного радиационного риска о возможных последствиях с целью подготовки к принятию мер радиационной защиты.

Второй этап первичной ликвидации последствий аварии должен включать:

обязательный радиационно-дозиметрический контроль за состоянием среды и территорий повышенного радиационного риска;

первичные меры защиты, исключающие выход населения из жилищ, мест работы, герметизацию и влажную уборку, вытяжную вентиляцию, с целью предупреждения проникновения и осаждения аэрозолей внутри помещений;

организацию приема калия йодида для профилактики поражений щитовидной железы радиоактивным йодом.

Третий этап проводится после выпадений радиоактивных осадков и строится с учетом степени радиационного загрязнений среды и зонирования территорий с учетом расчетных лучевых нагрузок на население: I зона — радиационного контроля (1—5 мЗв/год); II зона ограниченного проживания (5—20 мЗв/год), III зона добровольного отселения (20—50 мЗв/год); IV зона отчуждения (свыше 50 мЗв/год). Население, проживающее на таких территориях (особенно в III—IV зонах), не должно пользоваться местными водоисточниками, продуктами питания, лесом без предварительного радиометрического контроля и разрешения от санитарной службы. На территории должны проводиться плановые мероприятия по дезактивации среды.

2. Полная дезактивация радиоактивных территорий предполагает снятие верхних слоев почв непосредственно после радиационных осадений до глубины 10—15 см с последующим захоронением срезов в могильниках для радиоактивных отходов. После аварии на ЧАЭС такая дезактивация была предпринята в 600 населенных пунктах на территории общей площадью 7000 км². В качестве экранов, поглощающих потоки ионизирующих излучений от загрязненных почв (*защита экранированием*), дезактивированные поверхности застилалась гравием, песком, наносился асфальт, что вело к 10-кратному снижению мощности дозы. Экранированием (гравием, асфальтом либо пластиковыми покрытиями) были защищены 25 000 км дорог. В целом было дезактивировано около 7000 домов и учреждений, снято 200 000 м³ почв.

3. Частичная дезактивация биологическим методом направлена на фиксацию радиоактивного загрязнения на предупреждение водной, воздушной (выветривание) миграции радионуклидов. Осуществляется высеиванием многолетних трав на загрязненные почвы, что ведет к эффективному «вытягиванию» радионуклидов мощной корневой системой растений из почв. Скашивание и в последующем сжигание и захоронение золы таких трав в незначительных объемах оказалось наиболее эффективным методом как локализации (фиксация радиоактивности корневой системой трав), так и дезактивации наиболее массивных радиоактивных загрязнений среды.

4. К механическому методу частичной дезактивации относится глубокое вспахивание загрязненных полей. Метод направлен на захороне-

ние основной доли радионуклидов путем его механического перемещения из активного гумусового горизонта трав, сельскохозяйственных культур (картофеля, зерновых) в более глубокие нерадиоактивные почвенные слои, прерывая тем самым активную экосистемную миграцию радионуклидов. Методика «обмена» радиоактивных на нерадиоактивные слои почв оказалась наиболее эффективной, особенно в комбинации с другими методами. Радиоактивность активного гумусового горизонта снижается при использовании метода в 20—40 раз.

5. Конкурентная блокада миграции радионуклидов осуществляется внесением в почву аналогов их метаболизма, калия, кальция. Наибольший эффект снижения уровня радиоактивной загрязненности урожая при таком методе прослеживается при избыточном совместном внесении в почву извести, калийных удобрений (200—300 кг/га раз в три — четыре года) в сочетании с органическими удобрениями и навозом. Комплексная обработка почв по конкурентному принципу снижает радиоактивность сельскохозяйственной продукции в пять — десять раз. Кроме блокады миграции радионуклидов, такая обработка положительно меняет агрохимические свойства почв. Потенциал плодородия возрастает при такой обработке в результате снижения почвенной кислотности, роста содержания обменного калия, фосфора (в 1,6—1,4 раза), образования сложных нерастворимых соединений со стронцием, резко снижающим его поступление в продукты питания, организм.

Практика показывает, что почва является важнейшей барьерной системой защиты экосистем, выступая основным депо и индикатором опасности радионуклидных и токсических загрязнений среды. Комплексная обработка почв, захоронение в почвах радионуклидов методом глубокой перепахки, внесение обменного калия, фосфора, кальция (в комбинации со стимуляторами обмена органическими удобрениями), биологическая дезактивация посевом трав переводят местность из радиоактивного в экологически безопасное состояние, перераспределяя и направляя радиоактивность по естественным почвенным каналам. Радиоактивность продуктов питания, выращенных на радиоактивных территориях, после комплексной обработки такого типа снижается в 15—20 раз, приближая радиоактивность почв и выращиваемой продукции к фоновым значениям фактора.

6. Суммарная площадь лесов Украины, Беларуси, России, загрязненных от аварии на ЧАЭС, составляет 3,5 млн га. Продолжительность лесной вертикальной миграции, перераспределяющей цезий-стронциевый радиоизотопный состав с поверхностей загрязнений на глубину 10—15 см и включающей изотопы в активный метаболизм лесных биоценозов, составляет примерно год для лиственных и три — пять лет для хвойных лесов. Основную часть радионуклидов забирает мелкая корневая система на глубине до 15 см, выполняющая основную роль в обеспечении минерального питания леса. Наиболее активно здесь захватывается стронций, накапливающийся в последующем в стволах и крупных ветвях деревьев. Цезиевый метаболизм более динамичен. Изотоп включается в листву, формируя в последующем основную активность листового опада. В целом круговорот

радионуклидов представляет многократный циклический процесс, стабилизирующийся спустя четыре — пять лет в лиственных и 10 — 12 лет в хвойных лесах после загрязнения среды.

Основная часть радионуклидов накапливается в лесной подстилке, являющейся кумулятором радиоактивного загрязнения леса. В листьях, хвое, мелких ветвях, коре содержание радионуклидов в 10 — 100 раз ниже. В древесине (стволах, крупных ветвях) в 10 раз ниже по сравнению с предыдущей группой.

Особое место в лесных биоценозах занимает моховой покров и характерные для таких участков леса ягоды — брусника, морошка, клюква, а также грибы. Растительность мохового покрова перехватывает до 90 % поступающего с опадом и вымываемого цезия-137. Методы по дезактивации леса отсутствуют.

7. Лесопользование — заготовка древесины и ее переработка, сбор ягод, лекарственных трав, охота — требует организации жесткого радиационного контроля.

Наиболее жесткому контролю подвержена заготовка древесины. Наибольшей радиоактивности достигает березовая древесина. Количество радионуклидов (в основном ^{90}Sr) в стволе березы возросло от второго года после аварии в 10 раз, стабилизировалось. Ожидается плавное понижение активности. Радиоактивность ствола березы в 2,5 раза (в среднем) выше радиоактивности сосны. Заготовку березы и ее переработку допускают только с территорий активностью не более 10 — 15 Ки/км².

Радиоактивность сосны (при одинаковом содержании радионуклидов в лесных почвах) в 2,5 раза ниже. Распределение излучателей внутри ствола неравномерно. При обработке и использовании сосны должны учитываться особенности распределения: кора, горбыль радиоактивнее стволового распильного материала в несколько раз. Древесина сосны может использоваться без ограничения из лесов с загрязненностью до 40 Ки/км².

Из недревесных продуктов леса по радиоактивности наиболее опасно лекарственное сырье. Наибольшее количество радионуклидов (особенно стронция) накапливается в коре; цезия — в листе, кустарниках, травах. Мощным кумулятором радионуклидов являются грибы, радиоактивность которых достигает 0,1 — 0,2 мКи/кг сырой массы продукта, радиоактивность ягод на порядок ниже.

То же касается и продуктов лесной охоты, прежде всего травоядных. Радиоактивность мяса лося, косули, кабана, численность которых стала расти, превышает нормы ВДУ в сотни раз, что требует тщательного контроля лесной продукции при поставке ее на рынок.

8. Лесовосстановительные (лесопосевные) работы проводятся на радиоактивных территориях с целью стабилизации почв, почвенного радиационного метаболизма и предупреждения тем самым массивной труднопредсказуемой миграции радиоактивности с водными стоками, ветрами. Особое значение такие работы приобретают на песчаных почвах с радиоактивностью от 40 до ≥ 80 Ки/км², особенно вблизи водоемов озер, рек. Проводится здесь, как правило, частая посадка смешанного типа с использованием биологически устойчивых древесных

и кустарниковых пород, с запретом на последующее использование посадок и их продукции. Уход за такими посадками не осуществляется. К посадкам, требующим четкого планового проведения (выбора пород посадок, обработки почв, ухода), относятся восстановительные лесонасаждения, проводимые на территориях вырубки леса, с активностью территорий до 40 Ки/км².

9. Радиогенные реакции лесных биоценозов контролируются подготавливаемыми специалистами (инженерами — патологами леса) с помощью биологической индикации радиоактивного загрязнения среды. С этой целью проводится радиометрия избирательных накопителей радионуклидов (мха, лишайника), подсчет числа почвенных сапрофитов (мокриц, сухопутных моллюсков, избирательно накапливающих ⁹⁰Sr), сопоставление получаемых данных с установившимися в дорадиационный период величинами этих показателей, нормами для исследуемых биоценозов. Накопителями цезия и соответственно индикаторами биологических реакций на этот радиоактивный метаболит являются мелкие позвоночные (полевая лесная мышь), иногда насекомые. Индикатором суммарных воздействий радионуклидов, с учетом фона, являются дождевые черви, заглатывающие почву и подвергающиеся таким образом суммарному внешнему и внутреннему облучению от всего спектра радиоактивных излучателей среды. Для регистрации биологических эффектов на репродуктивные функции в биоценозах наиболее прост и показателен подсчет почвообитающих личинок насекомых (косянки и др.).

10. Радиоактивность водоемов территорий, загрязненных радиоактивными выпадениями, различна. Основные накопители фактора — озера, пруды, радиоактивность которых в отличие от проточных речных вод чрезвычайно велика, но используются они, как правило, в рыбном хозяйстве.

Анализ радиоактивности рыбы показал, что в 12 % случаях пробы соответствовали фоновым уровням радиоактивности. В остальных пробах (88 %) содержание радионуклидов колебалось в пределах либо превышало ВДУ.

Проблема использования рыбы в пищу в пораженных радиацией районах не решена. Ряд исследований показывает, что наибольшее количество цезия, мкКи/кг, накапливает щука — 2,0, окунь — 0,4, лещ — 0,24. По данным Санкт-Петербургского НИИ радиационной гигиены, в накоплении цезия и стронция определенную роль играют не только вид рыбы, но и отдельные части ее тела с преимущественным кальциевым метаболизмом — кости, гонады. Поэтому только филейные части тушки рыбы могут соответствовать ВДУ и их можно использовать в пищу.

Для предупреждения повышенных лучевых нагрузок на население, связанных с потреблением продукции рыбных хозяйств, расположенных на радиоактивных территориях страны, необходим жесткий контроль за поставкой продукции на рынок, а также радиационный контроль с использованием методов радиационно-экологической индикации загрязнений: избирательной радиометрии донных отложений, активности членистоногих, многолетних рыб.

1. Медико-административные меры защиты предполагают выделение территорий, население которых наиболее подвержено воздействиям радиационного фактора, с последующей разработкой мер по предупреждению регистрируемых последствий. Выделение таких территорий (и групп населения), построенное на сопоставлении размеров стохастических эффектов (канцерогенеза) с размерами радиоактивности среды, не выявляет достоверной радиационной зависимости реакций, что ставит под сомнение необходимость дополнительных вкладов в медико-профилактические меры и предпринятую финансовую компенсацию наносимого населению ущерба.

Вместе с тем заболеваемость населения, особенно детского, радиоактивных территорий растет, что может быть расшифровано только через адаптационную концепцию: адаптация — как функция неспецифической напряженности иммунной, нервной, эндокринной систем, проявляющаяся на уровне популяций ростом иммунной, нервной, эндокринной, преимущественно детской, патологии.

Дозовая зависимость таких реакций четко прослеживается на территориях с мощным техногенным фоном среды, адаптационные функции населения которых имеют ограниченные резервы, что ведет к выраженным радиационно-зависимым неспецифическим проявлениям процесса. Мероприятия по снижению частоты таких патологических проявлений должны проводиться на радиоактивных территориях с фоновой техногенной загрязненностью среды. При этом профилактика напряженных адаптационных систем и последующего роста патологии этого ряда должна охватывать преимущественно критические группы населения — детей в детских учреждениях, персонал предприятий, в состав производственных вредностей которых входят пестициды, тяжелые металлы, летучие органические соединения. К числу таких предприятий должны быть отнесены предприятия радиоэлектронной промышленности, производства, хранения и транспортировки ядохимикатов, лакокрасочных изделий.

2. Способность к сохранению клеточного постоянства определяется ведущим энергетическим процессом клеток, окислительным фосфорилированием. Одним из неизбежных звеньев окислительного фосфорилирования в митохондриях с выходом от 2 до 5 % в биологической цепи переноса кислорода является образование супероксида ($O_2^{\cdot-}$), пероксида (H_2O_2) и других «продуктов радиолитиза», считавшееся ранее следствием радиолитиза воды клетки под воздействием радиации.

Образующиеся радикалы используются клеткой как обязательное звено обмена в процессе фосфорилирования и активизации белков, регуляции синтеза тироксина в щитовидной железе, лейкоцитарных и гуморальных реакциях лизиса. Вместе с тем выход реакции ПОЛ из-под жесткого ферментного контроля (энергетическая перегрузка клетки и недостаток цитохрома P-450, неизбежные при адаптационных перегрузках в сочетании с микроэлементным и витаминным дефицитом) ведет к накоплению оксидантов, каскаду образования так называемых минорных мета-

болитов, росту частоты повреждения ДНК, ускоряющему старение клетки, склеротические преобразования тканей, прежде всего тканей нервной системы. Процесс вместе с тем адаптивен и зависит, в свою очередь, от достаточности антиоксидантной ферментной защиты (коферменты от витаминов А, Е, С, К), достаточной секреции билирубина (функция печени) и содержания уринов (вероятная основа рекламируемой урино-терапии). Особое место занимает и антиоксидантное звено, зависящее от достаточного поступления селена (содержащегося в чесноке). Включение его в состав питания резко ускоряет преобразование пероксидов в воду, разложение образовавшихся гидропероксидных липидов, снижая тем самым частоту радиогенных поломок в клетках, риск формирования опухолей.

К числу эффективных фармакологических антиоксидантных комплексов относится апробированный витаминный препарат «Веторон», стимулирующий, судя по данным его апробации (Рябенко Н. М. и др., 1996), и функции Т-лимфоцитарного надзора за состоянием клеточных популяций.

3. Не меньшее в реакциях защиты значение имеет комплекс мер, направленных на снижение риска повреждения клеточных мембран. Изменения мембранной рецепции, трансмембранной передачи сигналов ведут к искажению информации, регистрируемой Т-лимфоцитарной системой и передаваемой через эпифизарный кровоток нервной и эндокринной системам с последующими неадекватными гормональными и нейрорегуляторными реакциями на воздействие фактора. Такая «засоренность» адаптационного ответа достаточно эффективно корректируется липоказеиновыми препаратами (липоказеиновый экстракт дрожжей, пивные дрожжи), усиливающими дренажные детоксикационные функции мембран клетки и очищающими тем самым каналы связей от неизбежных последствий информационных помех, нарушающих адаптационную коррекцию клеточного метаболизма.

4. Помимо фармакодиетической коррекции первичных (пусковых) клеточных поломок при построении защиты необходима адаптивная коррекция функций «верхнего» эшелона — иммунной, нервной, эндокринной систем.

Для обеспечения функций иммунитета, звена кроветворения необходимо достаточное количество полноценного белка при обязательном поступлении витамина В₁₂, а также К, Fe, Со, Мп с продуктами питания. Первое место среди таких продуктов занимает печень, каши из гречневой крупы и овса, хлеб грубого помола, бобовые, морская рыба.

Формирование и обеспечение функций нервного звена адаптации требуют достаточного поступления в организм тиаминна (горох, фасоль, гречневая крупа), рибофлавина (печень, яйца, скумбрия), холина (почки, сливки), брома (хлеб из муки грубого помола).

Формирование и нормальное функциональное состояние эндокринной системы — витамина А (печень, сливочное масло), кератина (облепиха, черноплодная рябина, перец), холина (яичный желток), брома (бобовые, хлеб из муки грубого помола), йода (греческий орех, морская капуста), серы (морская рыба, яйца). При анализе питания населения

радиоактивных территорий очевиден дефицит именно этого ряда продуктов, которые и следует отнести к разряду наиболее эффективных адаптогенов — радиопротекторов.

Помимо витаминно-микроэлементного состава питания, серьезную и нерешенную по настоящее время проблему представляют его регулярность, сбалансированность, оптимальное соотношение в рационе белков, жиров, углеводов. Любое из нарушений этих принципов ведет к эндогенной дополнительной токсемии — образованию фенолов и других токсикантов в кишечнике, их всасыванию и распространению с кровью. Ведущим фактором детоксикации ядов (непосредственно в кишечнике, печени и головном мозге) является цитохром Р-450. Очевидно, что характерная микроэлементная (Cu, Ni, Fe) недостаточность ресинтеза этого фермента в сочетании с хроническими дисфункциями кишечника является одной из причин подавления адаптации и роста характерных патологических реакций на радиоактивность среды.

5. В основу принципа положено свойство конкурентности обмена радиоактивных веществ и их химических нерадиоактивных аналогов. И те, и другие вещества способны включаться в одни и те же метаболические процессы, но только до точки насыщения реакций. После насыщения атомы любого из конкурирующих веществ не включаются в обмен, в биохимические структуры клеток. Если насыщение будет осуществлено за счет стабильных веществ, то радиоактивные в состав клеток, тканей, органов не включатся.

Для защиты щитовидной железы от ^{131}I , например, необходимо насыщение организма нерадиоактивным иодом.

Конкурентами цезия являются калий, в меньшей степени — натрий; конкурентами стронция — кальций, в меньшей степени — магний, медь. Поступление конкурентов ^{137}Cs и ^{90}Sr должно осуществляться через диету с постоянным преобладанием настоев трав (употребляемых вместо чая), а также неспецифических фармакологических препаратов, таких, как оротат калия, аспаркам, панангин, калий, магнийсодержащих минеральных вод.

Из числа растений, которые также должны быть собраны на нерадиоактивных территориях, свойствами радиопротекторов обладают лопух (корневище), мята перечная (листья), солодка голая (корневище). Отвары либо настои этих (предварительно высушенных) растений можно употреблять как чай. Побочные эффекты исключены.

6. Введение мишеней или принцип внутриклеточного гашения энергии фотонов (частиц) и, соответственно, подавление биологической агрессивности фактора реализуются за счет внесения в организм, клетку металлов. ($E_n \sim Z^{k_1}$). Взаимодействие с диффузно распределенными металлами и закономерное смещение реакций в сторону фотоэффекта (до 50—100 кэВ) ведут к достоверной защите, благодаря резкому снижению выхода свободных радикалов, подавлению разрушений липидного слоя мембран, блокады тиоловых ферментов и других радиационных поломок. Помимо захвата фотонов, не меньшее значение в радиационном эффекте принадлежит здесь и донорским добавкам (ионы металлов), цитохромной системе, и, как следствие, гашению реакций ПОЛ.

Подтверждением тому может служить введение в состав питания экспериментальных животных солей кобальта с содержащей этот микроэлемент зеленой капустой. Последующее облучение животных абсолютно летальной дозой ведет тем не менее к выживаемости 15—60 % экспериментальных животных.

К таким достоверно регистрируемым эффектам подавления канцерогенеза ведет включение в питание и метаболизм Se, Co, Ni, Fe, Si-содержащих соединений. Для этого необходимо включать в состав питания каши (гречневую, овсяную), печенку, специально разработанный препарат «аэросил».

Ко второй группе «мишеней» в клетке относятся тиолсодержащие ферменты. Очевидно, что введение в организм дополнительных тиоловых (SH) соединений должно снизить биологическую повреждающую активность фактора.

Многолетние исследования (Э. Я. Граевский, 1969) выявили достоверную связь между содержанием в тканях тиолов и снижением радиочувствительности животных. Эффективность «мишеней» — перехватчиков побочных продуктов ИОЛ — прослеживается и при поступлении в организм таких тиолсодержащих белков, как гист-, тир-, триптамин. Защита резко усиливается при снижении оксигенации тканей, «кислородном дефиците», устраняющих тем самым дефицит разрушаемых при воздействии радиационного фактора цитохромов (с последующим неизбежным повышенным выходом свободных радикалов). К числу достоверных нефармакологических разнопротекторов этого ряда следует отнести продукты с максимальным содержанием серы, такие, как говядина, почки, рыба, пшеница.

7. Наименее апробированной, но наиболее эффективной, судя по результатам эксперимента, является ионная защита (В. В. Спиридонов, 1976). Началом биологического действия радиации (на уровне клеток) является разрушение нормального ионного потенциала внутриклеточных мембран. В норме на любой биологической мембране преобладают отрицательные ионы и ионный электрический потенциал любой здоровой клетки должен быть отрицательным. При облучении клетки на мембранах преобладает положительный потенциал. Если его вовремя «снять», действие радиации резко снижается. Сделать это можно, помещая организм в воздушную среду, насыщенную отрицательными ионами, которые через легочной кровоток разносятся по всему организму. Для эффективной ионной защиты следует рекомендовать прогулки в чистом хвойном лесу либо специальную ионизацию воздуха, обеспечивающую выход отрицательных ионов.

8. Для осуществления принципа защиты расстоянием необходимо знать состав облучения, длину пробега частиц и фотонов в воздухе. Цезий, стронций являются мощными γ - и β -излучателями. Пробег γ -квантов в воздухе исчисляется сотнями метров, поэтому в реальной обстановке, при пребывании на улице, например, защита от γ -излучения малопродуктивна. Большую значимость этот принцип имеет при защите от β -частиц. Длина их пробега в воздухе достигает 2—3 м, но только частиц больших энергий. Большая часть бегущих электронов поглощается в приземном слое воздуха,

как правило загрязненным взвесями пыли, что делает защиту эффективной. Поэтому уже в случае нормального вертикального расположения тела поглощенная доза внешнего (суммарного) облучения резко снижается.

Для реализации принципа защиты временем необходимо максимально снижать время игр, труда, спортивных занятий на открытом воздухе и особенно занятий, связанных с горизонтальным положением тела.

Защита временем, расстоянием должна вестись в сочетании с защитой экранированием. Экранирование является наиболее эффективным способом защиты от внешнего γ -излучения. Мошность потока этого вида радиации снижается пропорционально квадрату расстояния от источника (поверхности Земли) и кратности ослабления излучения материалом (экраном) на пути потока квантов между источником и облучаемым. К эффективным экранам в сложившейся обстановке относятся плотная одежда (задержка корпускулярных излучений), стены, полы, крыши домов.

- Алексахин Р. М.* Ядерная энергетика и биосфера. — М.: Энергоиздат, 1982. — 81 с.
- Алексеев С. В., Пивоваров Ю. П., Янушанец О. Н.* Экология человека. — М.: Икар, 2002. — 770 с.
- Булатов В. И.* География радиационных катастроф. — Новосибирск: ЦЭРИС, 1993. — 88 с.
- Грейб Р.* Влияние малых доз радиации на людей, животных и деревья / Пер. с англ. В. Н. Якимец. — М.: Мир, 1994. — 263 с.
- Действие ионизирующей радиации на биоценоз* / Д. А. Криволучский, Ф. А. Тихомиров, А. Д. Федоров и др. — М.: Наука, 1988. — 240 с.
- Израэль Ю. А.* Экология и контроль состояния природной среды. — М.: Гидрометеиздат., 1984. — 560 с.
- Ильин Л. А., Кириллов В. Ф., Коренков Н. П.* Радиационная гигиена. — М.: Медицина, 1999. — 384 с.
- Ковальский В. В.* Геохимическая экология. — М.: Наука, 1973. — 64 с.
- Кузин А. М.* Природный радиоактивный фон и его значение для биосферы Земли. — М.: Наука, 1991. — 115 с.
- Марей А. Н., Зыкова А. С., Сауров М. М.* Радиационная коммунальная гигиена. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 176 с.
- Пивоваров Ю. П.* Руководство к лабораторным занятиям по гигиене и основам экологии человека. — М.: ГОУ ВУНМЦ МЗ РФ, 2001. — 431 с.
- Пивоваров Ю. П., Королик В. В., Зиневич Л. С.* Гигиена и основы экологии человека. — Ростов-н/Д: Феникс, 2002. — 510 с.
- Радиоактивные вещества* / В. А. Баженов, Л. А. Буллаков, И. Я. Василенко и др. — Л.: Химия, 1990. — 464 с.
- Содди Ф.* История атомной энергии / Пер. с англ. под ред. А. Н. Кривомазова. — М.: Атомиздат, 1979. — 288 с.
- Тимофеев-Ресовский Н. В.* Применение излучений и излучателей в экспериментальной биогеоценологии // Ботанический журнал. — 1957. — Т. 42. — № 2. — С. 161—194.
- Тимофеев-Ресовский Н. В.* Некоторые проблемы радиационной биогеоценологии. — Свердловск: Изд-во Уральского филиала АН СССР, 1962. — 54 с.
- Тихомиров Ф. А.* Действие ионизирующих излучений на экологические системы. — М.: Атомиздат, 1972. — 174 с.
- Шуму В., Чакер Ф.* Радиоактивные методы. — М.: Мир, 1985. — 312 с.
- Ярмоненко С. П.* Радиобиология человека и животных. — М.: Высш. шк., 1984. — 375 с.

Введение	3
Глава 1. Радиационно-экологические характеристики естественных и искусственных источников фоновых радиационных воздействий (радиационный фон Земли)	6
1.1. Естественный радиационный фон Земли	7
1.2. Антропогенный радиационный фон	18
Глава 2. Аномальные естественные и антропогенные территории повышенной радиоактивности	30
2.1. Аномальные территории повышенной естественной радиоактивности среды	31
2.2. Территории повышенной радиоактивной загрязненности среды от проведения ядерных взрывов	36
2.3. Аварийное радиоактивное загрязнение среды	39
Глава 3. Поведение долгоживущих радионуклидов ядерно-энергетического происхождения в экосистемах	48
3.1. Поведение долгоживущих радионуклидов ядерно-энергетического происхождения в атмосфере	48
3.2. Поведение долгоживущих радионуклидов ядерно-энергетического происхождения в почве	53
3.3. Поведение долгоживущих радионуклидов ядерно-энергетического происхождения в воде	61
3.4. Радионуклиды в продуктах питания	64
3.5. Экосистемные воздействия техногенных радиационных и токсикохимических факторов	69
Глава 4. Техногенная радиоактивность среды и здоровье населения	77
4.1. Механизм действия радиации на живые организмы	79
4.2. Лучевая болезнь	81
4.3. Патогенез лучевого поражения организма	83
4.3.1. Клеточно-молекулярные реакции и их последствия. Критические структуры клеток	83
4.3.2. Реакции организма. Критические системы	87
4.3.3. Популяционные реакции	91
4.4. Экосистемные реакции на радиационную деформацию среды	96
Глава 5. Нормы радиационной безопасности	99
5.1. История нормирования радиации	99
5.2. Современные теоретические представления о пределах радиационной безопасности	102

5.3. Нормы радиационной безопасности, принятые в России, и их оценка	105
5.4. Экологическое нормирование радиационных воздействий	114
Глава 6. Радиационно-экологический контроль, прогнозирование и профилактика последствий радиоактивного загрязнения среды	117
6.1. Организация мер по профилактике последствий радиоактивного загрязнения среды в случае радиационных аварий	117
6.2. Дезактивация радиоактивных территорий и построение мер реабилитации агроценозов (на примере аварии на Чернобыльской АЭС)	122
6.3. Особенности построения радиационно-экологического контроля и профилактических мер при загрязнении лесных массивов и водоемов	126
Глава 7. Радиационная защита населения	136
7.1. Медико-административные меры защиты	136
7.2. Общая фармакодиетическая защита	140
7.3. Противорадиационная защита	159
Приложение 1. Хроника некоторых событий, связанных с возникновением и развитием ядерной физики, а также радиационной гигиены и экологии	168
Приложение 2. Элементы физических представлений	173
Приложение 3. Термины и определения, используемые в Нормах радиационной безопасности (НРБ-99 СП 2.6.1.758-99 и СанПиН 2.6.1.802-99)	181
Приложение 4. Словарь основных терминов и понятий	189
Приложение 5. Радиоактивная загрязненность территорий Российской Федерации от аварии на Чернобыльской АЭС	209
Краткие эталоны ответов на вопросы по самоконтролю	214
Список рекомендуемой литературы	237

Учебное издание

**Пивоваров Юрий Петрович,
Михалев Владимир Петрович**

Радиационная экология

Учебное пособие

Редактор А. В. Савенков

Технический редактор О. С. Александрова

Компьютерная верстка: Е. В. Матусовская

Корректоры А. П. Сизова, Л. П. Кравченко

Диапозитивы предоставлены издательством.

Изд № 983-І. Подписано в печать 26.12.2003. Формат 60×90/16.
Гарнитура «Таймс». Печать офсетная. Бумага тип. № 2. Усл. печ. л. 15,0.
Тираж 7000 экз. Заказ № 12989.

Лицензия ИД № 02025 от 13.06.2000. Издательский центр «Академия».
Санитарно-эпидемиологическое заключение № 77.99.02.953.Д.003903.06.03 от 05.06.2003.
117342, Москва, ул. Бутлерова, 17-Б, к. 223. Тел./факс: (095)330-1092, 334-8337.

Отпечатано на Саратовском полиграфическом комбинате.
410004, г. Саратов, ул. Чернышевского, 59.