

Л.Г. БЯЗРОВ

**ЛИШАЙНИКИ
ИНДИКАТОРЫ
РАДИОАКТИВНОГО
ЗАГРЯЗНЕНИЯ**

Москва ❖ 2005

Бязров Л.Г. Лишайники — индикаторы радиоактивного загрязнения. — М.: изд-во КМК, 2005. — 476 с. Рис. 2; табл. 57. Библ. 729 назв.

Монография обобщает результаты оригинальных исследований автора, а также доступные опубликованные материалы об использовании лишайников в контроле такого показателя качества среды как радиоактивное загрязнение, одного из наиболее опасных для здоровья людей и других представителей биоты видов загрязнения. Этот фактор воздействия на среду обитания приобрел планетарный масштаб в середине 20 века как следствие широкого применения термоядерной энергии в военных и мирных целях. Особое внимание уделено методическим проблемам. Вместе с тем в книге содержится сведения и общего характера: место радиоэкологии в общей экологии; источники радионуклидов, типы радиации; различные трактовки лишайникового симбиоза, строение лишайников, их жизненные формы, особенности физиологии и др.

Приводятся многочисленные данные о накоплении слоевищами лишайников как естественных, так и техногенных радионуклидов в различных регионах нашей планеты, в том числе и редко измеряемых изотопов технеция, нептуния, кюрия и др. Показаны результаты многочисленных лабораторных и полевых экспериментов по выявлению степени устойчивости лишайников к воздействию радиоактивного облучения, многолетнего мониторинга глобальных выпадений радионуклидов, а также деятельности предприятий ядерно-топливного цикла, АЭС, ТЭС. Содержатся данные об изучении последствий применения войсками НАТО боеголовок из обедненного урана на территории Косово (Югославия). Значительный объем книги занимают материалы, характеризующие воздействие аварии на Чернобыльской АЭС на различные регионы Земли. Показаны преимущества и недостатки лишайников как индикаторов радиоактивного загрязнения.

Монография предназначена для специалистов-экологов, научных сотрудников исследовательских лабораторий, педагогов, студентов.

Р е ц е н з е н т ы :

доктор биологических наук *А.Д. Покаржевский*

кандидат биологических наук *Т.Ю. Толтышева*

Утверждено к печати

ученым советом Института проблем экологии и эволюции
им. А.Н. Северцова РАН

Программа ОБН РАН

«Фундаментальные основы управления биологическими ресурсами»

СО Д Е Р Ж А Н И Е

ВВЕДЕНИЕ	12
1. Кратко об экологии и радиационной экологии	17
2. Ионизирующая радиация, радионуклиды, их источники	22
2.1. Радионуклиды, виды ионизирующей радиации, единицы ее измерения	22
2.2. Источники радиоактивности в биосфере	27
2.2.1. Естественный (природный) радиационный фон	28
2.2.2. Техногенные радионуклиды	31
3. Понятие «лишайники», особенности их биологии и экологии	38
3.1. Микобионт	39
3.2. Фотобионт	40
3.3. Взаимоотношения микобионта и фотобионта в слоевище лишайника	40
3.4. Образование вегетативного тела (слоевища, или таллома) лишайника	42
3.5. Систематика	43
3.6. Типы слоевищ и жизненные формы лишайников	44
3.7. Субстрат	45
3.8. Свет, тепло	45
3.9. Водный режим, фотосинтез, дыхание лишайников	48
3.10. Улавливание и поглощение лишайниками минеральных и органических веществ, их накопление и потеря; токсичность элементов	49
3.10.1. Содержание минеральных элементов в лишайниках	51
3.10.2. Потребности в питательных веществах	52
3.10.3. Источники поступления элементов	53
3.10.3.1. Атмосферные источники	53
3.10.3.2. Субстратные источники	53
3.10.4. Механизмы накопления	57
3.10.4.1. Обмен ионов	57
3.10.4.2. Внутриклеточное поглощение	61
3.10.4.3. Улавливание взвешенных в атмосфере частиц	62
3.10.5. Локализация элементов в слоевище	63
3.10.5.1. Распределение радионуклидов в слоевище	65
3.10.5.2. Высвобождение слоевищ от аккумулярованных радионуклидов ...	76

3.10.6. Исследования выпадений различных веществ с помощью лишайников	80
3.10.7. Токсичность металлов, радионуклидов	83
3.10.8. Толерантность к металлам	84
3.10.9. Влияние на гидрологические циклы	87
3.10.9.1. Связь минерального питания с водным обменом	88
3.10.10. Минеральный цикл на уровне биогеоценоза: перехват сухих и сырых выпадений	88
3.10.11. Почвообразование	92
3.11. Рост лишайников; длительность жизни	93
3.12. Географическое положение, топография местности	97
3.13. Конкуренция, взаимоотношения с другими организмами	98
3.14. Влияние деятельности человека. Использование лишайников человеком.....	99
4. Методы изучения радиоэкологии лишайников.....	102
5. Устойчивость лишайников к действию ионизирующей радиации	109
5.1. Данные экспериментов в природных сообществах	109
5.1.1. Эксперимент на Лонг-Айленде	109
5.1.2. Эксперимент на гамма-поле Эмори	111
5.1.3. Эксперимент в широколиственном лесу Энтерпрайс	112
5.1.4. Эксперимент в тропическом дождевом лесу Эл Верде, Пуэрто-Рико	113
5.1.5. Эксперимент в широколиственном лесу заказника Ок-Риджской национальной лаборатории	115
5.2. Данные экспериментов в лабораториях	116
5.2.1. Эксперименты с гамма-облучением	116
5.2.2. Эксперименты для изучения особенностей поглощения и потери радионуклидов лишайниками	121
5.3. Наблюдения на Восточноуральском радиоактивном следе (ВУРС)	122
5.4. Наблюдения на Семипалатинском ядерном полигоне	128
5.5. Почему лишайники толерантны к действию высоких доз ионизирующего излучения	131
6. Естественные радионуклиды в слоевищах лишайников	134
7. Уран-235 в боеголовках снарядов и в лишайниках (лихеноиндикация последствий конфликта в Косово)	164
8. Радионуклиды глобальных выпадений в лишайниках	170
9. Лихеноиндикация последствий «мирных» ядерных взрывов и катастроф летательных аппаратов с реакторами	237

9.1. Лихеноиндикация последствий ядерных взрывов в интересах народного хозяйства	237
9.2. Лихеноиндикация последствий катастроф летательных аппаратов с ядерным оружием или ядерными реакторами	242
10. Лишайники в мониторинге состояния среды территорий вокруг атомных и тепловых станций	246
10.1. Лихеноиндикация последствий деятельности АЭС	246
10.2. Лихеноиндикация последствий деятельности ТЭС	258
11. Радионуклиды в лишайниках после аварии на Чернобыльской АЭС	260
11.1. Радионуклиды в лишайниках на территории вблизи Чернобыльской АЭС	262
11.2. Чернобыльские радионуклиды в лишайниках других территорий СССР	269
11.3. Радионуклиды в лишайниках за пределами территории СССР после аварии на ЧАЭС	285
11.3.1. Радионуклиды в лишайниках Скандинавии и Гренландии	285
11.3.2. Радионуклиды в лишайниках из стран Восточной Европы	301
11.3.3. Радионуклиды в лишайниках из стран Центральной Европы	301
11.3.4. Радионуклиды в лишайниках стран Западной и Южной Европы	311
11.3.5. Радионуклиды в лишайниках северной Греции и Малой Азии	324
11.3.6. Радионуклиды в лишайниках Восточной Азии и Гималаев	377
11.3.7. Радионуклиды в лишайниках Северной Америки	378
11.3.8. Радионуклиды в лишайниках Антарктики	381
12. Лихеноиндикация деятельности предприятий ядерно-топливного цикла и металлургических заводов, пунктов захоронения радиоактивных отходов	384
12.1. Лихеноиндикация радиоактивного загрязнения в зоне действия предприятий ядерно-топливного цикла	384
12.2. Лихеноиндикация радиоактивного загрязнения территории предприятия по переработке и захоронению низкорadioактивных отходов	390
12.3. Лихеноиндикация радиоактивного загрязнения территории в зоне действия металлургического завода	392
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	395
Литература и авторский индекс	422
Указатель латинских названий таксонов, упомянутых в тексте и таблицах	468
Указатель изотопов, упомянутых в тексте и таблицах	474

1. КРАТКО ОБ ЭКОЛОГИИ И РАДИАЦИОННОЙ ЭКОЛОГИИ

Мы являемся свидетелями широкого интереса к экологии, проникновения термина «экология» в лексику представителей разных сфер человеческой деятельности. Наряду с профессионалами, применяющими его в строго научном смысле, это слово в разных значениях используют журналисты, политики, писатели, филологи, оппозиционеры, лица, желающие улучшить свои жилищные условия, и др. Можно услышать и прочитать и о «плохой (?) экологии», и об «экологии языка», и об «экологии культуры», и об «экологии литературы», и об «этнической экологии», и о «социальной экологии», и множество других сочетаний с этим термином, режущих слух специалиста-биолога. В непрофессиональной среде под экологией, в лучшем случае, понимают только гигиенические аспекты состояния окружающей среды, а нередко и просто уровень ее техногенного загрязнения (Большаков и др., 1996; Алимов, 2002). Однако есть мнение, что широкое внедрение этого слова отражает назревшую необходимость экологизации разных отраслей знаний (Розенберг, 1999), поскольку эта отрасль науки тесно связана с повседневной жизнью любого человека.

Понятие «экология» в научной литературе появилось благодаря германскому ученому Э. Геккелю, который в 1866 г. предложил применять этот термин для обозначения науки о взаимоотношениях живых организмов со средой их обитания, в том числе и с другими организмами. В русской научной литературе первым его воспроизвел И.И. Мечников в 1869 г. (Алимов, 2002). Это определение затем уточнялось и конкретизировалось неоднократно (Розенберг, 1999), но смысл оставался неизменным, и ныне профессионалы экологией называют фундаментальную биологическую науку, изучающую организацию и функционирование в пространстве и времени надорганизменных систем различных уровней: популяций, биоценозов, биогеоценозов (экосистем), биосферы в естественных и измененных человеком условиях (Гиляров, 1986; Алимов, 2002). Краткое и обобщенное определение этой науки — «биология окружающей среды» (Одум, 1975; Szabo, 1993). Таким образом, в определение «экология» включают понятия «живой организм», «окружающая среда» и «функциональные процессы или взаимодействие между организмом и средой». Живые организмы — это представители различных таксономических групп

всех царств органического мира, в том числе и человек. Соответственно, наряду с общей экологией существуют экология растений, экология животных, экология грибов (в том числе и лишайников), экология цианобактерий, экология человека, экология других групп как обобщение знаний экологии отдельных видов. Окружающая среда — это вещество и энергия вне живого организма, которые в той или иной степени последний использует для жизнедеятельности (солнечная радиация, газы, ионы и катионы различных элементов и соединений, вода, другие организмы, и другое). В связи с этим изучают зависимости распространения и жизнедеятельности организмов от освещенности, спектрального состава солнечной радиации, тепла, доступной влаги, газового состава атмосферы, наличия элементов минерального питания, органических веществ, загрязнения и др., в том числе и конкретных элементов и соединений. Функциональные процессы — это физико-химические, физиологические, биохимические и иные процессы, наблюдаемые при взаимодействии живого организма с веществом, в результате которых происходит образование и разрушение новых веществ-метаболитов, сопровождаемое потреблением и выделением энергии. В этом случае можно говорить об экологии метаболизма, и данное направление отражают исследования по экологии фотосинтеза, дыхания, других обменных процессов.

Частью окружающей среды являются радиоактивные вещества и радиоактивное излучение. Ветвь науки, связанную с изучением воздействия радиоактивных веществ и радиоактивного излучения на особей, популяции организмов, их сообщества, а также судьбу радиоактивных веществ, попавших в окружающую организмы среду, и механизмы, посредством которых сообщества и популяции регулируют распространение радиоактивности, называют радиационной экологией (Одум, 1975). Термин «радиационная экология» или «радиоэкология» появился практически одновременно в русско- и англоязычной научной литературе (Кузин, Передельский, 1956; Odum, 1956; Передельский, 1957), а перед научной аудиторией, вероятно, был озвучен в 1955 г. в Женеве (Швейцария), на международной конференции по мирному использованию атомной энергии. Вскоре второе издание учебника «Основы экологии» (Odum, 1959) уже содержало главу «Радиационная экология».

Радиоактивные вещества и радиоактивное излучение постоянно являлись и являются частью окружающей среды на Земле, формируя так называемый радиационный фон. Однако только в начале 1950-х годов началось широкое и интенсивное изучение воздействия радио-

активных веществ и радиоактивного излучения на организмы, их сообщества, а также судьбы радиоактивных веществ, попавших в окружающую среду. Это связано с появлением атомного и термоядерного оружия, его испытаниями в атмосфере, его применением в Японии. Первый взрыв атомной бомбы провели в пустыне США в 1945 г., в августе того же года США взорвали атомные бомбы над японскими городами Хиросима и Нагасаки. Но это были относительно маломощные бомбы, и ужасное воздействие радиоактивного излучения, радиоактивных веществ на людей, другие живые организмы проявлялось сравнительно на небольшой территории, в радиусе нескольких десятков километров. В 1954 г. в атмосфере начали испытывать заряды, мощность которых в тринитротолуоловом эквиваленте измерялась мегатоннами. Радиоактивные вещества, выделявшиеся при таких мощных взрывах, в больших количествах проникали в стратосферу, и характерные для этого слоя атмосферы мощные воздушные потоки разносили попавшие туда радиоактивные вещества по всему земному шару. Эти вещества со временем выпадали на поверхность Земли и становились частью сухопутной и водной среды. Такие выпадения получили название «глобальные выпадения». Кроме того, для производства ядерного оружия в нескольких странах была создана соответствующая инфраструктура, включающая химико-металлургические, горнорудные предприятия, научные центры с реакторами, деятельность которых также представляет потенциальную угрозу радиоактивного загрязнения и облучения. Таким образом, с середины 20-го столетия вся биота, в т.ч. и люди, существуют в условиях повышенного радиационного фона, увеличение уровня которого обусловлено деятельностью человека.

Негативное воздействие на здоровье человека радиоактивных веществ, попавших в среду в результате ядерных испытаний, проявилось достаточно быстро, поэтому именно в середине 1950-х и были начаты масштабные радиоэкологические исследования. Такие работы в те годы проводились как в странах, обладавших ядерным оружием (США, СССР, Великобритания, Франция), так и в государствах, вблизи рубежей которых осуществлялись испытания такого оружия (Дания, Канада, Норвегия, Финляндия, Швеция), а также в Японии, где это оружие было применено. Ныне, особенно после аварии на Чернобыльской АЭС, радиоэкологические исследования проводят ученые многих стран практически на всех континентах.

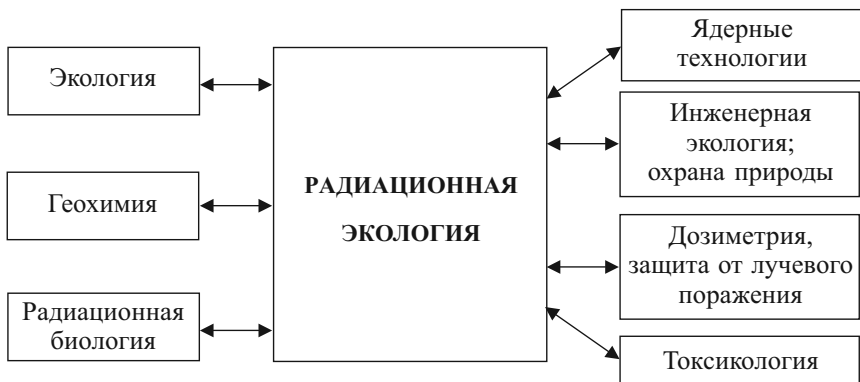
Выделяют несколько основных направлений радиоэкологии: а) определение качественного и количественного содержания радиоактив-

ных элементов в организмах; б) определение коэффициентов накопления радиоизотопов представителями различных видов; в) выявление воздействия попавших в организмы и сообщества радионуклидов при разных уровнях радиоактивности среды; г) закономерности изменения структуры и динамики популяций и сообществ организмов в условиях действия повышенных уровней радиации; д) выяснение механизмов адаптации организмов к действию ионизирующей радиации (Ильенко, Криволуцкий, 1971). В целом это два разных аспекта радиоэкологии: 1) воздействие радиоактивного излучения на особей, популяции, биоценозы и биогеоценозы; 2) судьба радиоактивных веществ, находящихся в окружающей среде, и участие организмов и их сообществ в регулировании распространения радиоактивности.

Раздел радиоэкологии, изучающий воздействие радиоактивных излучений на биогеоценоз в целом, а также миграцию радиоактивных веществ по компонентам биогеоценоза называют радиационной биогеоценологией (Сукачев, 1964; Тимофеев-Ресовский, 1964; Алексахин, 1968; Криволуцкий и др., 1988). Она базируется на представлениях В.Н. Сукачева о биогеоценозе и методах применения радиоизотопов и излучений в экспериментальной биогеоценологии, разработанных Н.В. Тимофеевым-Ресовским (1957).

Радиационная экология является междисциплинарной ветвью экологии (Odum, 1965). С одной стороны, ее основу составляют такие фундаментальные науки как экология, геохимия, радиационная биология, физиология, генетика и др., с другой — она взаимодействует

Рис. 1.1. Схема связей радиационной экологии с некоторыми фундаментальными и прикладными науками (по: Odum, 1965; с дополнениями)



с прикладными науками, такими как ядерные технологии, техника измерений, рекультивация радиоактивно загрязненных территорий, токсикология, и др. (рис. 1.1).

Лишайники стали объектом радиоэкологических исследований в 1950-х (Гродзинский, 1959; Gorham, 1959). В силу ряда своих биологических особенностей (нет корневой системы, отсутствует система регулирования поступления в их слоевища веществ из среды) лишайники получают элементы минерального питания главным образом из атмосферы, в отличие от сосудистых растений, получающих их из почвы. Поскольку атмосферные источники по сравнению с почвой относительно скудны, решающей для жизни лишайников является способность аккумулировать элементы, в том числе и радиоактивные, из атмосферы. В ходе многочисленных исследований ряд представителей этих симбиотических ассоциаций признаны лучшими концентраторами радиоактивных изотопов из окружающей среды. Однако прежде, вероятно, следует познакомиться с ионизирующей радиацией и радионуклидами, ее создающими.

2. ИОНИЗИРУЮЩАЯ РАДИАЦИЯ, РАДИОНУКЛИДЫ, ИХ ИСТОЧНИКИ

2.1. РАДИОНУКЛИДЫ, ВИДЫ ИОНИЗИРУЮЩЕЙ РАДИАЦИИ, ЕДИНИЦЫ ЕЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Слова «радиация» и «излучение» фактически синонимы, поскольку первое происходит от элемента «радий», открытого в 1898 г. супругами Марией и Пьером Кюри, а по-латыни его название означает «испускающий лучи». Ионизирующей радиацией называют излучение, которое при взаимодействии с веществом, в том числе и живым, вызывает ионизацию составляющих его молекул и атомов. При этом последние становятся ионами, заряженными положительно или отрицательно. Ионы химически гораздо более активны в сравнении с нейтральными атомами и молекулами. В результате такой активизации извне в живом организме могут нарушиться метаболические процессы, измениться вещество наследственности, что может пагубно сказаться либо непосредственно на этом организме, либо на его потомках.

Известно, что строение атома напоминает строение Солнечной системы в миниатюре: вокруг крошечного ядра очень высокой плотности движутся по своим орбитам электроны. Ядро состоит, как правило, из плотно сцепленных более мелких частиц. Положительно заряженные частицы ядра называются протонами, и их число определяет место атома в Периодической системе элементов Д.И. Менделеева. Число протонов в атоме строго совпадает с числом электронов, несущих отрицательный заряд. Абсолютные величины зарядов протонов и электронов в атоме совпадают, так что в целом атом нейтрален. Кроме протонов в ядре обычно присутствуют и другие частицы, электрически нейтральные, называемые нейтронами. Если число протонов в ядре атомов одного и того же элемента всегда одинаковое, то количество нейтронов в них может быть различным. Атомы одного и того же элемента, отличающиеся по числу нейтронов, называют изотопами данного элемента. Для их обозначения к символу элемента приписывают число, равное сумме всех частиц (нуклонов) в ядре данного элемента, называемое массовым числом. Например, углерод-12 содержит 6 протонов и 6 нейтронов, а углерод-14 — 6 протонов и 8 нейтронов. Ядра всех изотопов химических элементов образуют

группу «нуклидов» (Радиация..., 1990). Нуклиды, которые при отсутствии внешнего воздействия никогда не трансформируются, называют стабильными. Таких нуклидов меньшинство. Большинство же нуклидов нестабильны, они постоянно превращаются в другие нуклиды (Гусев, Дмитриев, 1988). Например, из ядра урана-238, содержащего 92 протона и 146 нейтронов, время от времени высвобождаются два протона и два нейтрона, что приводит к превращению урана-238 в торий-234, в ядре которого уже 90 протонов и 144 нейтрона. В свою очередь, торий-234 превращается в протактиний-234 с 91 протоном и 143 нейтронами в ядре путем превращения одного из нейтронов в протон. Далее следуют иные трансформации, которые заканчиваются стабильным свинцом-206 (рис. 2.1). Процесс такой самопроизвольной трансформации называется радиоактивным распадом, а сам такой нуклид — радиоактивным (Радиация..., 1990). Каждый акт распада сопровождается высвобождением энергии, передаваемой дальше в виде излучения.

Схема (рис. 2.1) содержит и такой важный показатель как вид излучения, обозначенный буквами греческого алфавита. Альфа-излучением называют испускание ядром частицы, состоящей из двух протонов и двух нейтронов (ядра гелия). При этом заряд ядра уменьшается на 2, что приводит к изменению химических свойств атомов, а массовое число уменьшается на 4. Бета-излучение — испускание электрона или позитрона. При бета-распаде массовое число ядра не меняется, но иными становятся его заряд и химические свойства, ибо масса бета-частиц в 1840 раз меньше массы протона или нейтрона, а заряд их может быть -1 (электроны) или $+1$ (позитроны). Как известно, в ядре электронов и позитронов нет, а есть протоны и нейтроны. Но при ядерных реакциях нейтрон может превратиться в протон, испуская при этом электрон. Известен и другой тип ядерных процессов, когда протон, испуская позитрон, теряет заряд и превращается в нейтрон (Ландау-Тылкина, 1974). На схеме отсутствует обозначение еще одного вида излучения — гамма-излучения. Оно возникает, когда нестабильный нуклид настолько возбужден, что испускание частиц не снимает возбуждение, и тогда такой нуклид выбрасывает порцию чистой энергии — гамма-кванты. Гамма-излучение во многом подобно рентгеновскому — и в том, и другом случае испускания каких-либо частиц не происходит. Первое является наиболее коротковолновым электромагнитным излучением (длина волны менее 0.1 нм), тогда как у рентгеновского излучения длина волны больше (0.1–2 нм). Соответственно, гамма-кванты обладают более высокой энергией, чем кванты

Рис. 2.1. Схемы распада естественных радиоактивных семейств (по: Гусев, Дмитриев, 1988).

 α , β — вид излучения

Радиоактивные семейства					
Тория		Актиния		Урана	
Нуклид	Период полураспада	Нуклид	Период полураспада	Нуклид	Период полураспада
Th-232 ↓ α	14 050 000 000 лет	U-235 ↓ α	703 800 000 лет	U-238 ↓ α	4.47 млрд лет
Ra-228 ↓ β	5.75 лет	Th-231 ↓ β	25.6 час.	Th-234 ↓ β	24.1 суток
Ac-228 ↓ β	6.13 час.	Ra-231 ↓ α	32760 лет	Ra-234m, Ra-234 ↓ β	1.17 мин., 6.7 час.
Th-228 ↓ α	1.9131 лет	Ac-227 ↓ β	21.773 лет	U-234 ↓ α	245 000 лет
Ra-224 ↓ α	3.66 суток	Th-227, Fr-223 ↓ α , β	18.718 суток, 21.8 мин.	Th-230 ↓ α	75 200 лет
Rn-220 ↓ α	55.61 сек.	Ra-223, At-219 ↓ α , β	11.435 суток, 0.9 мин.	Ra-226 ↓ α	1608 лет
Po-216 ↓ α	0.145 сек.	Rn-219, Bi-215 ↓ α , β	3.96 сек., 7.4 мин.	Rn-222 ↓ α	3.8235 суток
Pb-212 ↓ β	10.64 час.	Po-215 ↓ α , β	1.78×10^{-3} сек.	Po-218 ↓ α , β	3.11 мин.
Bi-212 ↓ α , β	60.55 мин.	Pb-211, At-215 ↓ α , β	36.1 мин., 1.0×10^{-4} сек.	Pb-214, At-218 ↓ β , α	26.8 мин., 2 сек.
Po-212, Tl-208 ↓ α , β	2.96×10^{-7} сек., 3.055 мин.	Tl-207, Po-211 ↓ α , β	4.77 мин., 0.516 сек.	Bi-214 ↓ β , α	19.9 мин.
Pb-208	Стабильный	Pb-207	Стабильный	Po-214, Tl-210 ↓ α , β	1.63×10^{-4} сек., 1.3 мин.
				Pb-210 ↓ β , α	21.8 лет
				Bi-210, Hg-206 ↓ β , α	5.013 сут.,
				Po-210, Tl-206 ↓ α , β	138.4 сут., 4.18 мин.
				Pb-206	Стабильный

рентгеновского излучения и всех других участков электромагнитного спектра.

Действие разных видов излучения на организм неодинаково, поскольку каждое из них сопровождается высвобождением разного количества энергии, и они имеют разную проникающую способность. Чем выше энергия, тем больше — в пределах данного типа излучения — потенциальный ущерб для живых организмов. Препятствием потоку протонов и нейтронов, характерному для альфа-излучения, может стать лист бумаги, и такое излучение не способно проникнуть через наружный слой кожи. Но альфа-частицы чрезвычайно опасны при попадании внутрь организма с пищей, вдыхаемым воздухом. Бета-излучение проникает в ткани организма на глубину 1–2 см. Гамма-излучение, распространяющееся со скоростью света, обладает очень высокой проникающей способностью — его может задержать лишь толстая свинцовая или бетонная плита (Радиация..., 1990).

Альфа- и бета-частицы при прохождении через вещество вызывают возбуждение и ионизацию атомов, образуя на пути своего движения пары ионов — отрицательно заряженные электроны и ионизированные атомы с положительным зарядом. Гамма-кванты, рентгеновские лучи, нейтроны лишены электрического заряда и потому сами не обладают способностью к ионизации. Однако при прохождении через вещество они теряют свою энергию при взаимодействии с электронами атомных оболочек вещества. При этом квант может передать электрону либо всю энергию и исчезнуть, либо часть ее. Электрон, получивший дополнительную энергию, вылетает из электронной оболочки атома. Такой электрон, называемый вторичным, или электроном отдачи, вызывает ионизацию молекул как и бета-частицы (Ландау-Тылкина, 1974). Таким образом, гамма-кванты, рентгеновские лучи, нейтроны при взаимодействии их с веществом создают вторичное ионизирующее излучение (Криволицкий и др., 1988).

Действие радиации на вещество может быть прямым и опосредованным. Прямое действие совершается в три этапа: 1) поглощение энергии молекулой, испускание ею одного или нескольких электронов (ионизация), переход электрона на более высокий энергетический уровень (возбуждение); 2) перенос энергии с распадом возбужденных и ионизированных молекул на фрагменты (свободные радикалы), содержащие один неспаренный электрон из бывшей электронной пары; 3) образование новой стабильной молекулы, отличающейся по своему составу от прежней, подвергнувшейся действию радиации, с возможной потерей биологической активности важных молекул (Барабой,

1991). Взаимодействие излучений с молекулами растворителя (вода и др.) рассматривается как непрямое. Образующиеся при этом активные продукты действуют на растворенные вещества и вызывают в них изменения.

Важной физической характеристикой изотопа является период полураспада — время, за которое распадается половина всех радионуклидов данного типа в любом радиоактивном источнике. На схеме (рис. 2.1) показано, что половина всех атомов протактиния-234 в любом радиоактивном источнике распадется за время несколько большее, чем 1 мин., а половина всех атомов урана-238 превратятся в торий-234 за 4.47 миллиарда лет. Число распадов в секунду в радиоактивном образце называют его активностью. В международной системе СИ единица измерения активности обозначается как беккерель (Бк). Она так названа в честь французского ученого Анри Беккереля, открывшего в 1896 г. явление радиоактивности. Один беккерель равен одному распаду в секунд. Поскольку период полураспада разных изотопов неодинаков, то одну и ту же величину активности обеспечивает разная масса вещества. Так, активность 1 г радия-226 (3.7×10^{10} Бк), период полураспада которого 1600 лет, примерно равна активности 3 тонн урана-238 или 10 мг йода-131 (период полураспада 8.04 суток). Удельная активность, или концентрация (Бк/г или Бк/кг) — число распадов в секунду в единице массы радиоактивного образца.

Повреждения живого организма прямо зависят от количества энергии, переданной излучением тканям. Количество энергии излучения, поглощенное единицей массы тканей организма, называется поглощенной дозой, которая в системе СИ измеряется в греях (Гр). Однако эта величина не учитывает разной степени опасности каждого из видов излучений для организма, поэтому поглощенную дозу следует умножать на соответствующий коэффициент, отражающий способность данного вида излучения повреждать ткани; при этом альфа-излучение считается в 20 раз опаснее других видов излучений. Эту исправленную дозу называют эквивалентной дозой; в системе СИ ее измеряют в зивертах (Зв). Также учитывают, что одни органы более чувствительны к действию ионизирующей радиации в сравнении с другими. Поэтому эквивалентную дозу пересчитывают с использованием разных коэффициентов для различных органов. Эта величина называется эффективной эквивалентной дозой, отражающей суммарный эффект облучения для организма; она также измеряется в зивертах (Зв).

2.2. ИСТОЧНИКИ РАДИОАКТИВНОСТИ В БИОСФЕРЕ

Общепринято деление источников радиоактивности на естественные и техногенные (деятельность человека). Многочисленные их классификации обобщены в таблице 2.1.

Уместно отметить, что эта классификация, как и многие другие, например Е. Одума (1975), достаточно условная и неполная. Так, естественные радиоактивные вещества, находящиеся в верхнем слое земной коры, после их изъятия в форме руды, попадают в разряд техногенных. Также в биосферу, наряду с естественными космогенными тритием ^3H или радиоуглеродом ^{14}C , поступают значительные количества этих изотопов техногенного происхождения. Например, в 1960-х количество искусственного ^{14}C в атмосфере достигало 90% от природного, поскольку при взрыве ядерного устройства в атмосфере под воздействием мощного потока нейтронов часть атмосферного азота трансформируется в ^{14}C (Szabo, 1993).

Таблица 2.1. Классификация основных источников радиоактивности в биосфере

Естественные	Внеземные	Космические лучи
	Планетарные	Естественная радиоактивность земной коры
		Естественная радиоактивность пищи
Естественная радиоактивность организма		
Техногенные	Промышленность	Добыча, транспортировка, переработка руды
		Реакторы (промышленные и судовые)
		Сжигание угля
		Производство удобрений
		Строительные материалы
		Применение ядерных зарядов для решения задач народного хозяйства
		Переработка и захоронение радиоактивных отходов
	Оборона	Производство и испытания ядерного оружия
		Применение ядерных боеприпасов в вооруженных конфликтах
		Военная техника с реакторами
	Наука, медицина, сельское хозяйство	Реакторы исследовательские
		Изотопы
		Радиационная терапия
		Рентгенография
		Радиационная стимуляция

2.2.1. Естественный (природный) радиационный фон

Радиоактивность и сопутствующие ей ионизирующие излучения свойственны Земле изначально, они были в космосе и до возникновения нашей планеты. Радиоактивные элементы вошли в состав Земли с самого момента ее образования, они в тех или иных количествах присутствуют во всем материальном на планете, в том числе во всех живых тканях. Именно естественная радиация вносит самый большой вклад в облучение живых организмов. Разные виды излучений поступают на поверхность Земли из космоса, а также от радиоактивных веществ, находящихся в земной коре.

Поток частиц, поступающих из космоса к границам земной атмосферы называют первичным космическим излучением (Яворский, Детлаф, 1996). В нем преобладают протоны (85% космических частиц), альфа-частицы (ядра гелия), ядра более тяжелых элементов, быстрые электроны и позитроны. При прохождении через слой атмосферы эти космические частицы, обладающие очень высокой энергией, сталкиваются с атомами газов, составляющих атмосферу, передают им свою энергию и разрушаются. Образовавшиеся высокоэнергетические продукты расщепления вызывают дальнейшие разрушительные ядерные процессы. Как следствие — изменение состава достигшего поверхности Земли вторичного космического излучения и падение энергии частиц. Эту группу космогенных радионуклидов составляют ${}^3\text{H}$, ${}^7\text{Be}$, ${}^{10}\text{Be}$, ${}^{14}\text{C}$, ${}^{22}\text{Na}$, ${}^{24}\text{Na}$, ${}^{26}\text{Al}$, ${}^{28}\text{Mg}$, ${}^{31}\text{Si}$, ${}^{32}\text{P}$, ${}^{33}\text{P}$, ${}^{35}\text{S}$, ${}^{38}\text{S}$, ${}^{36}\text{Cl}$, ${}^{38}\text{Cl}$, ${}^{39}\text{Ca}$, ${}^{39}\text{Ar}$, ${}^{85}\text{Kr}$ (Справочник по ядерной..., 1989). В основном это бета-излучатели. Степень воздействия космического излучения на организмы зависит от высоты местности над уровнем моря и географической широты. Так, в экваториальном поясе с увеличением абсолютной высоты местности, суммарная доза, получаемая от космического излучения, повышалась от 350 до 3500 мкЗв/год, а на одной и той же абсолютной высоте (около 1000 м) эта величина на экваторе составляла 600, на широте 30° — 700, на широте 50° — 900 мкЗв/год (Кривоуцкий и др., 1988). Общее количество трития ${}^3\text{H}$ в биосфере 1.3×10^{15} Бк, этот изотоп участвует в круговороте воды, средняя его концентрация в тканях живых организмов 0.4 Бк/кг (Романов, 1983; Кузин, 1991). ${}^{14}\text{C}$ включается в биоту после окисления до ${}^{14}\text{CO}_2$ через фотосинтез. За год его образуется 10^{15} Бк, а всего его в биосфере 8.5×10^{18} Бк. Среднее содержание этого изотопа в тканях растений и животных 227 Бк/кг (Кузин, 1991).

Естественную радиоактивность земной коры образуют радионуклиды, находящиеся в верхней оболочке Земли, в том числе в воде и

атмосфере. К ним относятся отдельные естественные радионуклиды с массовым числом от 40 до 204, не принадлежащие к радиоактивным семействам (^{40}K , ^{48}Ca , ^{50}V , ^{87}Rb , ^{96}Zr , ^{115}In , ^{130}Te , ^{138}La , ^{142}Ce , ^{144}Nd , ^{147}Sm , ^{176}Lu , ^{187}Re , ^{204}Pb) (Справочник по..., 1989; Szabo, 1993). Среди них есть альфа-, бета-, и гамма-излучатели. Из названных основной вклад в дозу облучения вносит ^{40}K . Его концентрацию в объекте легко определить, если известно содержание в последнем общего калия, поскольку доля радионуклида составляет либо 0.0118% (Heinrich, Remele, 2002), либо 0.0119% (Гродзинский, 1989; Szabo, 1993) массы калия.

Особое место среди радиоактивных элементов, образующих естественный радиационный фон, занимают тяжелые естественные радионуклиды с порядковыми номерами ≥ 82 , образующими три радиоактивных семейства — урана, родоначальник которого ^{238}U , актиния — родоначальник ^{235}U , тория — родоначальник ^{232}Th (Гусев, Дмитриев, 1988). В каждом семействе с течением времени атомы претерпевают последовательные радиоактивные распады, испуская на каждой ступени альфа- или бета-частицы (с гамма-излучением или без него) и превращаясь в атомы других химических элементов. В результате распада родоначальников названных семейств образуются ряды из 17, 14 и 12 последовательно распадающихся радиоактивных изотопов, соответственно; их распады заканчиваются стабильными изотопами свинца — ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb , соответственно. Схемы их распада иллюстрирует рис. 2.1.

Периоды полураспада родоначальных нуклидов этих семейств сопоставимы с возрастом Земли — 4.5×10^9 лет у ^{238}U , 7.1×10^8 лет у ^{235}U и 1.4×10^{10} лет у ^{232}Th (Справочник по изотопной..., 1982). Еще имеется искусственно полученное семейство нептуния, имя которому дано по названию наиболее долгоживущего его члена ^{237}Np , но которое не является родоначальником этого семейства. Период его полураспада 2.2×10^6 лет, который значительно короче, чем у родоначальников трех других семейств. Вероятно, это семейство когда-то было представлено на Земле, но к настоящему времени почти полностью распалось. Его конечным стабильным изотопом является не свинец, а ^{209}Bi (Справочник по изотопной..., 1982)

Средняя годовая эффективная доза внешнего облучения составляет 350 мкЗв, из которых на радиоактивный калий приходится 120, на элементы уранового семейства — 90, ториевого — 140 мкЗв (Сивинцев, 1988). Среднее значение поглощенной дозы в воздухе на высоте 1 м над поверхностью грунта составляет 4.4×10^{-8} Гр/час., а в помещениях за счет радиоактивности стройматериалов оно несколько выше —

Таблица 2.2. Доля (%) различных природных источников в облучении человека (по: Кузин, 1991)

Источник облучения	^{222}Rn и ^{220}Rn	^{40}K	Космическое излучение	Радиевый ряд урана	Ториевый ряд урана
Для населения Земли	49.5	15	15.3	12.2	8
Для населения Германии	51	15	13.5	12.5	8

6×10^{-8} Гр/час. Почти половину дозы облучения от природных источников человек получает от радона (табл. 2.2). Однако на Земле имеются местности, где природный радиоактивный фон выше на несколько порядков из-за наличия вблизи поверхности залежей радиоактивных минералов или выходов на поверхность обогащенных радием подземных вод. Так, в штате Керала на юго-западном побережье Индии для 70 тыс. человек средняя поглощенная доза составила 4.3×10^{-7} Гр/час, 24% населения получали 5.7×10^{-7} Гр/час, 6% — более 10^{-6} Гр/час, и около 0.7% — более 2.3×10^{-6} Гр/час. В г. Гуарапери (Бразилия) мощность поглощенной дозы колеблется от 10^{-6} до 2×10^{-5} Гр/час (Сивинцев, 1988). Такие территории есть в нашей стране, Египте, Иране, на Украине, во Франции, других странах (Кузин, 1964; Тяжелые..., 1990; Геохимия..., 2002). Обследования населения таких местностей показали, что медицинские показатели там не отличаются от средних для территорий этих стран. Но и на выходах ряда других горных пород отмечены высокие величины мощности поглощенной дозы. Так, на гранитах ее среднее значение 12×10^{-8} Гр/час, на глинистых сланцах — 7.9×10^{-8} Гр/час, а на песчаниках — 3.2×10^{-8} Гр/час (Hamilton, 1989), что соответствует данным о средней концентрации радионуклидов в горных породах (табл. 2.3).

Таблица 2.3. Средняя концентрация (Бк/кг) ряда естественных радионуклидов в некоторых горных породах и почве (по: Linsalata, 1989)

Материал	^{40}K	^{232}Th	^{238}U
Базальт	259	11–15	7–11
Гранит	>1100	70	37
Глинистые сланцы	814	48	46
Известняки	74	8	25
Почва	370	25	25

2.2.2. Техногенные радионуклиды

Техногенными здесь названы радионуклиды, появившиеся в окружающей среде в результате деятельности человека либо через изъятие радионуклидов из земной коры, либо через создание условий для цепных ядерных реакций. Прогресс науки и техники привел к широкому использованию радиоактивных веществ в военном деле, промышленности, сельском хозяйстве, медицине. Были открыты новые элементы, получены новые изотопы, созданы целые отрасли народного хозяйства, ориентированные на использование энергии распада. Однако это вызвало повышение уровня радиационного фона, и с середины 20 века живые организмы существуют в иных условиях радиации, нежели их предшественники. При этом радионуклиды принадлежат к наиболее токсичным веществам, являются приоритетными и очень опасными загрязнителями окружающей среды.

Обычно начало эпохи радиационного загрязнения датируют 1945 г., когда США провели первое испытание атомного оружия в Аламгордо (штат Нью-Мексико), а затем в августе того же года сбросили две атомные бомбы на японские города Хиросима и Нагасаки. Но фактически этот процесс начался гораздо раньше, поскольку многие виды человеческой деятельности уже привели к появлению в окружающей среде радионуклидов, прежде находившихся в земной коре. Так, работающие на угле тепловые электростанции выбрасывают в атмосферу значительные количества тяжелых радионуклидов вместе с летучей золой (табл. 2.4). Много их и в шлаках металлургических заводов, отвалах шахт. Такое загрязнение носит локальный характер, но оно очень распространено и проявляется на значительных по площади территориях.

Таблица 2.4. Среднее годовое количество естественных радионуклидов в выбросах работающей на угле электростанции (по: Векс, 1989)

Радионуклид	⁴⁰ K	²²² Rn	²²⁶ Ra	²³⁰ Th	²³² Th, ²²⁸ Ra	²³⁴ , ²³⁸ U	Зола (10 ⁶ /год)
N × 10 ⁹ Бк/ГВт/год	1–10	50	0.8–5	0.5–5	0.4–4	1–5	3–30

Концентрация радиоактивных урана, тория, радия в содержащих фосфор породах, добываемых для производства удобрений, на порядок выше кларковых значений этих элементов в земной коре. Ежегодное внесение таких удобрений за несколько десятков лет может заметно повысить уровни радионуклидов в почве, растениях и на 30–50%

увеличить дозовые нагрузки облучения в сравнении с фоновыми (Криволицкий и др., 1988). Однако концентрация радионуклидов в таких породах в разных месторождениях неодинакова. Например, в фосфорсодержащих породах из Марокко средние концентрации ^{226}Ra и ^{238}U равны 1600 и 1700 Бк/кг, соответственно. А в руде с Кольского полуострова (Россия) тот же показатель равен 30 и 40 Бк/кг, соответственно (Guimond, Hardin, 1989).

Нередко источником радиоактивности становятся строительные материалы — бетон, произведенный из глинозема или кальций-силикатного шлака, побочного продукта переработки фосфорных руд; фосфогипс из того же материала, который дешевле природного гипса; кирпич из красной глины, произведенный из отходов производства алюминия, и другие (Guimond, Hardin, 1989; Радиация..., 1990; Геохимия..., 2002). Представление о радиоактивности некоторых строительных материалов дает таблица 2.5.

Живые организмы, в том числе и человек, основную дозу облучения получают от естественных источников ионизирующей радиации, от природных радионуклидов, содержащихся в пище, воде, в строениях, а также при медицинских обследованиях. При курении табака об-

Таблица 2.5. Удельная активность (Бк/кг) Ra^{226} и Th^{232} в различных строительных материалах (по: Кузин, 1991)

Материал	^{226}Ra	^{232}Th
Газобетон на основе квасцовых глинистых сланцев	320–2620	24–115
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
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
Изоляционные материалы (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

разуется полоний-210, попадающий как в организмы курящих, так и некурящих людей, но вынужденных вдыхать табачный дым чадающих рядом курильщиков. Однако человеческое общество больше будоражили прежде и волнуют ныне проблемы радиоактивности среды, обусловленные испытаниями ядерного оружия, авариями на предприятиях атомной промышленности, энергетике, захоронением радиоактивных отходов. Первый взрыв ядерного устройства, как уже отмечалось, был проведен в США в 1945 г., затем в СССР (1949), Великобритании (1952), Франции (1960), Китае (1964). Ныне ядерным оружием также обладают Индия, Пакистан, Израиль, возможно, и некоторые другие страны. До 1980 г. испытания ядерных устройств проводили в атмосфере, однако лидеры по числу таких взрывов — США (193) и СССР (142) — прекратили испытания в атмосфере с 1963 г. Всего же с 1945 по 1980 г. в воздухе взорвали 423 таких устройства разной мощности (Радиация..., 1990). Подземные испытания проводят до сих пор.

Ядерные взрывы являются источником как непрореагировавших компонентов ядерного заряда, так и продуктов деления ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , входящих в заряд, всего их более 20 (^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{91}Y , ^{95}Zr , ^{106}Ru , ^{131}I , ^{132}Te , ^{137}Cs , ^{144}Ce , ^{147}Pm и др.). Кроме того, образующийся при взрыве мощный поток нейтронов взаимодействует с ядрами стабильных элементов оболочки заряда, а также атмосферы, грунта (наведенная радиация), результатом чего является образование таких радионуклидов как ^3H , ^{14}C , ^{22}Na , ^{24}Na , ^{28}Al , ^{45}Ca , ^{54}Mn , ^{55}Fe , ^{56}Mn , ^{57}Co , ^{58}Co , ^{59}Fe , ^{60}Co , ^{65}Zn , ^{181}W , ^{185}W , ^{187}W , ^{203}Pb , и других (Кузин, 1964; Справочник..., 1989; Геохимия..., 2002). В зависимости от мощности взрыва и физических свойств они поднимаются в атмосферу на высоту до 30 км, переносятся воздушными потоками, постепенно оседая на поверхность Земли. Эти выпадения радионуклидов, в зависимости от периода, истекшего с момента взрыва до поступления радионуклидов на поверхность Земли, делят на три типа: 1) ближние, или локальные; 2) промежуточные, или тропосферные; 3) глобальные, или стратосферные (Гусев, Беляев, 1991; Израэль, 1996). Первые состоят главным образом из крупных частиц (более 10 мкм в диаметре), оседающих на поверхность под действием силы тяжести; они не связаны с атмосферными осадками. Продолжительность выпадений этого типа после взрыва — 1–2 суток. В результате загрязняются площади от многих сотен до нескольких тысяч квадратных километров. Выпадения второго типа образованы более мелкими частицами (1–10 мкм в диаметре), формирующимися в тропосфере на высоте до 11–16 км. Период полувыведения этих частиц из тропосферы — 20–30 дней. Глобальные, или стратосферные,

выпадения состоят из частиц менее 1 мкм в диаметре, достигших в результате взрыва стратосферы (до высоты 30 км). Оттуда они переносятся в тропосферу струйными течениями, циклональными вихрями, либо через разрывы тропопаузы. Период их полувыведения составляет многие недели, месяцы и даже годы (Гусев, Беляев, 1991; Израэль, 1996). Стратосферные и тропосферные выпадения охватывают огромные территории, как это показали исследования последствий ядерных испытаний в атмосфере и аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. Например, выпадения радионуклидов после второго испытания китайской атомной бомбы 14 мая 1965 г. на территории Швеции обнаружили 24 мая, причем по ним было определено, что мощность бомбы эквивалентна 20 килотоннам тринитротолуола и она была взорвана на высоте 100 м (Sisefsky, 1966). В локальных выпадениях представлен практически весь спектр продуктов деления. Значительная часть их поступает в представителей местной биоты, в том числе и лишайники. Однако доступность радионуклидов из выпадений разного типа этих для организмов, в частности, ^{137}Cs для растений, различна, ибо размеры радиоактивных частиц в этих выпадениях, формы нахождения в них конкретных радионуклидов неодинаковы (Sanzharova et al., 1994).

Поскольку при взрыве образуется значительное количество короткоживущих радионуклидов (табл. 2.6), уровень радиоактивности после взрыва снижается очень быстро. Так, при испытании ядерного заряда, эквивалентного мощности 1000 т тринитротолуола, выделяется 49.5 г продуктов деления, активность которых через 1 минуту после взрыва составляет 3.7×10^{21} Бк, а через 24 часа эта величина снижается до 5.9×10^{16} , т.е. на 5 порядков (Szabo, 1993).

Таким образом, через несколько месяцев после взрыва в составе выпадений остаются лишь долгоживущие радионуклиды, из которых для биоты наиболее опасны ^{14}C , ^{90}Sr , ^{137}Cs , поскольку они вовлекаются в биогенный круговорот элементов, накапливаясь в тканях растений и животных.

Таблица 2.6. Распределение количества образующихся при ядерном взрыве радиоизотопов по продолжительности периода их полураспада (по: Szabo, 1993)

Период полураспада	>1 суток	1–10 суток	10–30 суток	30 суток — 1 год	1–10 лет	10–100 лет	< 100 лет
Число радиоизотопов	131	17	9	12	7	3	10

Испытания ядерных зарядов в основном проводят для решения задач обороны. Однако такие взрывы проводили и для нужд народного хозяйства, главным образом, гидромелиорации и горно-рудной промышленности, а также сейсмического зондирования земной коры. Естественно, при таких взрывах имело место и радиоактивное загрязнение среды, накладывавшееся на изменение физико-географических условий местности, где проводился взрыв.

Потенциальными источниками радиоактивности являются хранилища ядерных зарядов, аварии на носителях таких зарядов или на летательных аппаратах с ядерными реакторами. В связи с этим можно напомнить о самопроизвольном отделении ядерных бомб от самолетов в районах военных баз США в Испании (1966 г.) и Гренландии (1968 г.), а также о катастрофе в 1964 г. американского искусственного спутника Земли с ядерным реактором над Индийским океаном, падения в 1978 г. советского искусственного спутника серии «Космос» с ядерным реактором на территорию Канады (Taylor et al., 1979).

Начинку для ядерного оружия, а также топливо для атомных электростанций делают на химических предприятиях ядерно-топливного цикла, оборудованных ядерными реакторами. Там образуются радиоактивные отходы, которые включают продукты переработки обогащенного урана, продукты деления тяжелых ядер, нуклиды наведенной активности, и другое. Технологии полной очистки этих отходов отсутствуют, поэтому их хранение и захоронение осуществляют на специальных изолированных территориях. Из-за несовершенства технологии хранения или аварий оттуда они могут попасть и на другие участки биосферы, загрязнить их, стать источником облучения представителей биоты.

Аварии случаются и на реакторах таких предприятий, которые сопровождаются выбросом в атмосферу радионуклидов в газообразной форме или в виде аэрозолей. Так, при аварии на ядерном предприятии в Уиндскейле (Великобритания) в 1957 г. в атмосферу одновременно поступило 7×10^{14} Бк ^{131}I , 2×10^{13} Бк ^{137}Cs , 3×10^{12} Бк ^{89}Sr , 7×10^{10} Бк ^{90}Sr (Криволуцкий и др., 1988). В результате пожара на ядерном заводе Роки Флэтс в штате Колорадо (США) в 1969 г. за пределы предприятия попало 1.85×10^{11} Бк ^{239}Pu (Harley, 1980). При аварии (1957 г.) хранилища отходов комбината «Маяк» на Урале произошел выброс материалов общей активностью 7.4×10^{16} Бк (Кабачки и др., 1995).

Аварии бывают и на реакторах морских судов, военных и гражданских. Например, в августе 1985 г. у пирса Чажминского судоремонт-

ного завода ВМФ СССР на атомной подводной лодке возникла самопроизвольная реакция из-за нарушения персоналом правил перегрузки ядерного топлива. В результате произошел выброс в окружающую среду радионуклидов общей активностью 2.9×10^{10} Бк (Сивинцев, 2003).

Всего же с 1945 г. известно 60 аварий с возникновением самопроизвольной цепной реакции: 33 — в США, 19 — в СССР/России, 2 — в Канаде, по 1 — в Аргентине, Бельгии, Великобритании, Франции, Югославии, Японии; из них 31 — на критических сборках, 8 — на исследовательских и опытных реакторах, 21 — на химико-металлургическом производстве ядерных материалов (Сивинцев, 2003). Помимо упомянутых общественный резонанс вызвали также аварии в Три-Майл-Айленде (США) в 1983 г., на Сибирском химическом комбинате вблизи г. Томска в 1993 г. (Галушкин и др., 1994; Tscherekzian et al., 1995).

Отходы горно-рудных предприятий по добыче и обогащению урановых руд занимают громадные площади и будут загрязнять окружающую среду многие миллионы лет. Только ^{238}U с жидкими отходами хвостохранилищ гидromеталлургических заводов и твердыми отходами урановых руд в окружающую среду поступает около 60 ТБк/год (Геохимия..., 2002).

Источником техногенной ионизирующей радиации являются предприятия атомной энергетики, работа которых нередко вызывает дискуссии среди населения, живущего вблизи атомных электростанций. По состоянию на конец 1984 г. в 26 странах действовало 345 ядерных реакторов, вырабатывавших электроэнергию. Их мощность составляла примерно 13% суммарной мощности всех источников электроэнергии и была равна 220 ГВт (Радиация..., 1990). В 1986 г. произошла крупная авария на Чернобыльской АЭС (СССР), в результате которой в окружающую среду поступили радиоактивные материалы суммарной активностью 3.3×10^{18} Бк (Сивинцев, 2003). Помимо катастрофических последствий, связанных с облучением людей, загрязнением окружающей среды, результатом этой аварии стало закрытие нескольких таких энергоблоков в ряде стран, протесты общественности против строительства новых. Но традиционные источники энергии иссякают, они не везде имеются, поэтому пока реальной альтернативы атомной энергетике нет. При нормальной работе ядерных установок выбросы радиоактивных материалов в окружающую среду малы. Каждый реактор выбрасывает в окружающую среду довольно разнообразный набор радионуклидов как с жидкостями (^3H , ^{14}C , ^{24}Na , ^{32}P , ^{53}Cr , ^{54}Mn , ^{55}Fe ,