



ИЗДАТЕЛЬСТВО
«НАУКА»
ВЫШЛА ИЗ ПЕЧАТИ
КНИГА:

Камшилов М. М.
ЭВОЛЮЦИЯ БИОСФЕРЫ. —
10 л. 65 к. 50 000 экз.

Книга доктора биологических наук М. М. Камшилова посвящена проблеме эволюции биосферы. В ней рассматриваются такие вопросы, как происхождение биосферы, ее организация: факторы и закономерности эволюции. Приведены обширные фактические данные по палеонтологии, биоценологии, генетике и молекулярной биологии.

Книга рассчитана на широкие круги читателей, интересующихся вопросами эволюции жизни и охраны природы.

Заказы просим направлять по адресу: Москва В-164, Минуринский проспект 12, магазин «Книга — почтой» Центральной конторы «Академкнига»: Ленинград П-110, Петрозаводская ул. 7, магазин «Книга — почтой» Северо-Запад-

ной конторы «Академкнига» или в ближайший магазин «Академкнига».

Адреса магазинов «Академкнига»:

480391 Алма-Ата, ул. Фурманова, 91/97; 370005 Баку, ул. Джапаридзе, 13; 320005 Днепропетровск, проспект Гагарина, 24; 734001 Душанбе, проспект Ленина, 95; 375009 Ереван, ул. Туманяна, 31; 664033 Иркутск 33, ул. Лермонтова, 303; 252030 Киев, ул. Ленина, 42; 277012 Кишинев, ул. Пушкина, 31; 443002 Куйбышев, проспект Ленина, 2; 192104 Ленинград Д-120, Литейный проспект, 57; 199164 Ленинград, Менделеевская линия, 1; 199004 Ленинград, 9 линия, 16; 103009 Москва, ул. Горького, 8; 117312 Москва, ул. Вавилова, 55/7; 630076 Новосибирск, Красный проспект, 51; 630090 Новосибирск, Академгородок, Морской проспект, 22; 700029 Ташкент, Л-29, ул. Ленина, 73; 700100 Ташкент, ул. Шота Руставели, 43; 634050 Томск, наб. реки Ушайки, 18; 450075 Уфа, Коммунистическая ул., 49; 450075 Уфа, проспект Октября, 129; 720001 Фрунзе, бульвар Дзержинского, 42; 310003 Харьков, Уфимский пер., 4/б.



А. М. КУЗИН
НЕВИДИМЫЕ
ЛУЧИ
ВОКРУГ НАС

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
Серия «Человек и окружающая среда»

А. М. КУЗИН

НЕВИДИМЫЕ ЛУЧИ
ВОКРУГ НАС



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
Москва 1980

К 89 Кузин А. М. Невидимые лучи вокруг нас. — М., Наука, 1979, 151 с., с илл.

Член-корреспондент АН СССР А. М. Кузин в своей книге рассказывает о невидимых излучениях, пронизывающих биосферу Земли. Описаны природа проникающих лучей, характер и особенности их воздействия на живые организмы. Рассказывается, где человек сталкивается с излучением и в каких масштабах, каковы возможности и перспективы овладения невидимыми лучами в мирных целях.

20.1.4

Ответственный редактор
доктор биологических наук
Е. Ф. РОМАНЦЕВ

ВВЕДЕНИЕ

Вселенная, мировое пространство пронизано лучистой энергией. Если скопления материи в виде звезд, планет, загадочных пульсаров и квазаров, блуждающих комет и метеоритов в масштабах Вселенной — редкие явления, то потоки лучей, порождаемые ими, наполняют все пространство. В каждой его точке ежесекундно можно обнаружить потоки излучений — радиацию. Огромные массы вещества в недрах звезд, вступающая в ядерные реакции, превращаются в лучистую энергию, выделяемую в окружающее пространство. Вспышки новых звезд, рождение и гибель галактик, сжатие и концентрация вещества при затухании звезд, взрывы образующихся звезд-карликов и другие еще далеко не познанные, но постоянно происходящие в Вселенной превращения материи сопровождаются огромными выбросами лучистой энергии в виде электромагнитных колебаний всех диапазонов и потоков элементарных частиц и корпускул, начиная от неуловимого нейтрино и кончая тяжелыми ядрами атомов.

В 1923 г. в Петрограде выдающийся ученый и мыслитель академик Владимир Иванович Вернадский писал в своем основополагающем труде «Биосфера»: «Из невидимых излучений нам известны пока немногие. Мы едва начинаем сознать их разнообразие, понимать отрывочность и неполноту наших представлений об окружающем и пронизающем нас в биосфере мире излучений, об их основном с трудом постижимом уму, привыкшему к иным картинам мироздания, значении в окружающем нас пространстве... Кругом нас, в нас самих, всюду и везде, без перерыва, вечно сменяясь, совпадая и сталкиваясь, идут излучения разной длины волны... Благодаря космическим излучениям биосфера получает во всем своем строении новые, необычные и неизвестные для земного вещества свойства...»¹

¹ Вернадский В. И. Биосфера. Л., 1926.

© Издательство «Наука», 1980 г.

К 21005-005 — 28-79 НП 2001040000
054 (02) — 80

Вернадский был твердо уверен, что наши представления о роли радиации, которой пронизана вся Вселенная и биосфера Земли, расширятся в ближайшем будущем, дав более полное представление об их роли в возникновении и развитии биосферы. В те годы наши знания о лучах из мировых глубин были еще очень отрывочны. Следует удивляться предвидению В. И. Вернадского, высказавшего мысли о теснейшей связи и зависимости земных процессов от излучений, пронизывающих Вселенную. Эти идеи с каждым годом приобретают новое звучание и значение.

В настоящее время физика дает почти исчерпывающие сведения об электромагнитных излучениях окружающего нас мира. В табл. 1 представлены основные данные об этих лучах. При ее рассмотрении внимание специалистов различных областей науки заинтересуют разные ее разделы. Астрономы, использующие гигантские радиолокационные скопы, сосредоточат внимание на многометровых радиоволнах. Специалисты радио и телевидения привлекут метровые и дециметровые радиоволны. Для радарной техники наиболее интересен сантиметровой и миллиметровый диапазоны. Химики, особенно фотохимиков, заинтересуют инфракрасная, видимая и ультрафиолетовая (УФ) части спектра. Лазерная техника, незаменимая в космической связи и во многих производствах, всецело связана с видимой и УФ-областью электромагнитных излучений. Специалисты в области радиационной химии, дефектоскопии металлов, бурно развивающейся атомной энергетики все свое внимание уделяют коротковолновым, высокоэнергетичным излучениям — ионизирующим излучениям.

А теперь посмотрим на эту таблицу глазами биолога. Какую роль играют электромагнитные излучения в возникновении, развитии, существовании жизни на нашей планете? Как они воздействуют на живые организмы? Что новое и важное появилось в науке за последнее время о взаимосвязи лучистой энергии с жизнью на Земле?

Отвечая на эти вопросы, следует прежде всего подчеркнуть, что человечество с глубокой древности знало только о сравнительно небольшой части спектра электромагнитных излучений — узкой полосе видимого света. Благотворное влияние солнечного света, под живительными лучами которого поспевают урожаи на полях, стало первым знанием человека о зависимости жизни на Земле от

Таблица 1
Спектр электромагнитных излучений

Излучение	Длина волны		Частота, $\frac{1}{с}$	Энергия квантов
	см	Другие единицы		
Радиоволны	10^5 10^4	1 км	10^6 10^7	
Короткие радиоволны	10^3	10 м	10^8	
УВЧ	40		10^9	
Микроволны	10^0 10^{-1} 10^{-2}	см	10^{10} 10^{11} 10^{12}	
Инфракрасные лучи	10^{-3}		10^{13}	1 эВ
Видимый свет:				
красный	} 10^{-4}	700 нм	} 10^{16}	} 1—3 эВ
оранжевый		620 нм		
желтый		580 нм		
зеленый		530 нм		
синий		470 нм		
фиолетовый	420 нм			
Ближний ультрафиолет		300 нм	10^{16}	3—12 эВ
Далекый ультрафиолет		200 нм	10^{17}	
Длинноволновые рентгеновые лучи	10^{-7}	10^2 \AA	10^{18}	41 эВ
Коротковолновые рентгеновые лучи	10^{-8} 10^{-9}	1 \AA	10^{19}	12 кэВ —0,12 МэВ
γ -излучение	10^{-10}	10^{-2} \AA		1,2—5 МэВ

лучистой энергии Солнца. Прошло много столетий, прежде чем человечество поняло, что вся энергия, используемая при сжигании дров, нефти, каменного угля — это лучистая энергия Солнца, аккумулированная земной радиационностью.

Учение о фотосинтезе как глобальном процессе, благодаря которому существует жизнь на нашей планете, возникло в прошлом столетии и получило блестящее развитие в трудах К. А. Тимирязева, М. Кельвина, А. Н. Теренина, А. А. Ничипоровича и других ученых. О нем написаны монографии и научно-популярные брошюры.

Другое замечательное явление в биологии, тоже связанное с видимой частью спектра, — возникновение

у живых организмов специальных фоторецепторов, начиная от фототропизмов у простейших и растений и кончая зрением у животных и человека.

Зрение, позволяющее воспринимать всю красоту и многокрасочность окружающего мира и ориентироваться в пространстве, также исследуется в течение столетий. В настоящее время хорошо известны и оптическое устройство глаза, и тонкие фотохимические реакции, преобразующие кванты света в нервные импульсы. Мы знаем и о замечательном устройстве зрительных центров в центральной нервной системе, позволяющем с огромной скоростью анализировать интенсивность, длины волн и пространственное расположение потоков квантов, падающих на сетчатку глаза. Этому явлению тоже посвящены многочисленные специальные издания. Излучение в диапазоне видимого света, несмотря на его исключительный интерес для биологии, остается за рамками этой книги.

Область невидимых излучений лежит как в стороне более длинных, так и более коротких волн. Диапазон радиоволн только начинает интересовать биолога. Еще не ясно, воздействуют ли они на живые системы. Все больший интерес вызывают сантиметровые и миллиметровые волны. В последние годы стали накапливаться факты об их воздействии на биологические объекты. Использование этих излучений в промышленности возрастает, поэтому их возможное влияние на человека — вопрос, имеющий не только теоретический интерес. Ультракороткие и инфракрасные волны оказывают тепловое воздействие на ткани организмов, что широко используется в медицинской практике и сельском хозяйстве.

Основное внимание в этой книге мы уделим ионизирующей радиации, обладающей чрезвычайно сильным и многообразным влиянием на живые организмы. Значительный прогресс в этой области достигнут именно за последние годы. Полученные данные, пока еще мало известные, заставляют по-новому оценить и переосмыслить значение ионизирующих излучений для эволюции и жизнедеятельности на нашей планете.

Не менее интересна для биолога и область корпускулярных ионизирующих излучений, таких, как α - и β -лучи радионуклидов, потоки электронов и протонов, генерируемые современными ускорителями, нейтроны атомных реакторов или л-мезоны и ядра тяжелых нуклидов — кос-

мических лучей. Корпускулярные излучения обладают высокой энергией, часто большой проникающей способностью, активно взаимодействуют с атомами и молекулами живых организмов, вызывая ионизацию, образование высокореактивных свободных радикалов, ядерные реакции. Все это может иметь глубокие последствия для жизнедеятельности клетки, ткани, организма. Ввиду сходства воздействия на вещество корпускулярных и таких электромагнитных излучений, как рентгеновские и γ -лучи, их часто объединяют в группу ионизирующей радиации. Для биолога, исследующего последствия действия ионизирующей радиации на живые организмы, их соотношение и биосферу в целом, первостепенное значение имеет количественная характеристика поглощенной дозы. В качестве единицы измерения поглощенной ионизирующей радиации в современной единой системе единиц принято такое ее количество, которое соответствует энергии в 1 Дж, поглощенной 1 кг ткани. Эта единица получила название грей (Гр) в честь крупного английского радиобиолога Л. Грея. Однако она принята сравнительно недавно и еще прочно не вошла в радиобиологию. В качестве единицы измерения ионизирующей радиации чаще используют величину в 100 раз меньшую — рад¹.

Теперь, когда известно, о какой радиации пойдет речь, и каково ее воздействие на живые организмы, читателю интересно узнать, где и в каком количестве присутствуют эти невидимые лучи в окружающем нас мире. Как их воспринимают вирусы, бактерии, растения, насекомые, хладнокровные и теплокровные животные, в первую очередь человек? Какую роль сыграли эти излучения в возникновении жизни на нашей планете, в ее эволюции? Как отразятся на развитии будущей жизни человечества создаваемые в глобальном масштабе новые, очень мощные источники этих излучений? Автор посвятил почти всю свою жизнь в науке решению именно этих вопросов. И хотя еще далеко не все ясно, многое уже твердо установлено. Рассказать об этом — задача данной книги.

1 1 рад соответствует энергии в 100 эрг, поглощенной 1 г ткани, 100 рад = 1 Гр. Меньшие единицы: 0,001 рад = 1 мрад. Когда имеют дело с большими дозами, в качестве единицы используют 1000 рад = 1 крад = 10 Гр или 10⁶ рад = 1 Мрад = 10⁴ Гр. Энергию излучений обычно измеряют в электронвольтах (эВ); шире используют следующие единицы: 1 кэВ = 10³ эВ и 1 МэВ = 10⁶ эВ.

ЕСТЕСТВЕННЫЙ ФОН ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Где бы мы ни находились — на знойном юге или на далеком севере, в долинах или высоко в горах, на свежем воздухе или в помещениях, на отдыхе в санатории или на работе, окруженные современной техникой, на пароходе, в поезде или в самолете — наше тело постоянно пронизывается высокоэнергетическими фотонами и корпускулами ионизирующей радиации. Падая на организм извне, они проникают во все ткани и органы, где отдают своего энергию молекулам и структурам клеток.

В большом количестве они зарождаются внутри нашего тела от находящихся в нем радиоактивных веществ, и тогда вероятность их поглощения тканями повышается. Речь идет о высокоэнергетических фотонах и частицах. Их энергия во много раз превышает энергию любой химической связи в молекуле. Столкновение таких частиц с молекулами нашего тела — это, как правило, катастрофа для молекулы: она распадается, меняет свою конфигурацию, теряет одни свойства и приобретает совсем иные. В настоящее время можно очень точно учитывать количество таких событий. Расчеты показывают, что каждую секунду в организме человека весом в 70 кг в среднем происходит около 500 тыс. таких молекулярных катастроф, 500 тыс. столкновений молекул с ионизирующими частицами, сопровождающихся временным или постоянным изменением свойств этих молекул.

Облучение от естественных источников ни на минуту не останавливается: секунды, минуты, часы, дни, годы непрерывно идет эта микробомбардировка наших клеток. Ее последствия только за последние годы становятся ясны благодаря многочисленным радиобиологическим исследованиям. И, как часто бывает в науке, то, что казалось очевидным еще несколько лет назад, приобретает новое освещение в свете полученных фактов. Если в 40-х и

даже в начале 50-х годов ученые имели вообще очень смутные представления о естественном фоне радиации, то теперь уже ясно, что его нельзя игнорировать, обсуждая такие проблемы, как происхождение жизни, эволюция, старение, канцерогенез и многое другое. Но об этом речь пойдет ниже, а сейчас рассмотрим, чем вызывается постоянное облучение живых организмов и как оно изменяется от условий их существования. Мы различаем внешнее облучение от источников, расположенных вне организма, и внутреннее — от инкорпорированных, т. е. включенных в организм радиоактивных нуклидов¹. Внешнее облучение складается из облучения вторичными космическими лучами, достигающими биосферы Земли, и излучениями радионуклидов, рассеянных в окружающих нас земных породах и строительных материалах.

Космическая радиация

Из недр мирового пространства, от звезд нашей галактики, а возможно и других галактик, в межпланетное пространство постоянно направлен поток первичных космических лучей, состоящий из высокоэнергетических протонов, ионов гелия, тяжелых частиц, электронов, фотонов и нейтрино. Значительный вклад в этот поток вносит и наше Солнце, испускающее, помимо видимого света, мощное ультрафиолетовое излучение и поток высокоэнергетических протонов.

Первый барьер, с которым сталкиваются космические лучи на пути к биосфере, — магнитное поле Земли, отклоняющее заряженные частицы космической радиации, не дающее им даже достичь верхних слоев атмосферы. Отклоненные магнитным полем частицы как бы обтекают нашу планету на расстоянии от одного до восьми земных радиусов, образуя радиационные пояса с большой интенсивностью облучения. (Радиация в этих поясах обусловлена электронами и протонами с энергиями от десятка

¹ Как известно, радиоактивность обусловлена процессами, происходящими в ядре атомов. Радиоактивные элементы могут находиться в виде атомов, ионов, входящих в состав молекул, однако это не влияет на их радиоактивность. Поэтому в радиобиологии принято говорить о радиоактивных нуклидах вне зависимости от их химического состояния.

кэВ до сотен МэВ.) Радиационные пояса Земли, представляющие большую опасность для космонавтов (полеты с людьми всегда планируются с расчетом минимального пребывания в пространстве радиационных поясов), не влияют на радиационную обстановку на земной поверхности.

Магнитное поле Земли создает мощную защиту нашей планеты от галактической космической радиации. Мощную, но не абсолютную. Часть высокоэнергетических лучей прорывается через магнитные поля и постоянно бомбардирует верхние слои атмосферы. Исследования, проведенные на ракетах и спутниках, показали, что мощность такого облучения закономерно изменяется в связи с 11-летним солнечным циклом.

Причину подобных изменений выяснил английский исследователь Е. Н. Паркер в 1966—1967 гг. Оказалось, что в годы солнечной активности усиливаются потоки плазмы, низкоэнергетических протонов и электронов, испускаемых Солнцем, известные в астрономии под названием «солнечного ветра». Солнечный ветер оказывает влияние на магнитные поля Земли, усиливая их способность отклонять галактические космические лучи. Излучения солнечного ветра малоэнергетичны и также не пробиваются через магнитные поля. В результате наблюдается парадоксальная закономерность. В годы усиленной солнечной активности вследствие увеличения магнитной защиты интенсивность космического облучения Земли снижается, и наоборот, наибольшая облученность Земли космической радиацией наблюдается в годы спокойного Солнца.

Высокоэнергетические (40—100 МэВ) космические лучи, прошедшие через магнитное поле, врываются в атмосферу. Очень немногие из них проникают через всю атмосферу и достигают поверхности Земли. Большинство же, сталкиваясь с атомами азота, кислорода, углерода атмосферы, взаимодействует с ядрами этих атомов, и, образно выражаясь, разбивает их вдребезги, рождая множество новых частиц: протонов, нейтронов, л-мезонов (пионов), μ -мезонов (мионов)², образующих вторичное космическое излучение. Так как эти частицы тоже обладают энергией в десятки МэВ, то, сталкиваясь с другими ядрами,

² Мезоны — элементарные частицы с массой больше, чем у электрона, но меньше, чем у протона.

они порождают новые потоки излучений, образуя каскад вторичных космических лучей.

Часть нейтронов захватывается ядрами азота, образуя радиоактивный углерод C^{14} . Мионы легко проникают в нижнюю часть атмосферы и доходят до поверхности Земли, составляя космическую часть естественного фона радиации.

На уровне моря вторичные космические лучи в виде потока нейтронов, мионов и электронов составляют около 30% от всего облучения биосферы. С высотой доза облучения от космических лучей значительно возрастает. Для жителей гор (1,5—2 км над уровнем моря) она почти в два раза выше, чем для жителей равнин. На высоте 40 км (на которой проходят трассы современной реактивной авиации) облученность космической радиацией уже на порядок выше, чем на уровне моря. На высоте 20 км она возрастает более чем на два порядка.

Эта высота интересна с двух точек зрения. Во-первых, на такой высоте будут летать в ближайшем будущем пассажирские сверхзвуковые самолеты. Следует отметить, что на такой высоте резко увеличивается количество высокоэнергетичных тяжелых частиц, почти не достигающих поверхности Земли. Радиация от солнечных вспышек, фактически не влияющая на дозы облучения на поверхности Земли, на высоте 20 км будет резко увеличивать дозы облучения в сотни и даже в тысячи раз³.

Во-вторых, высота в 20 км интересна и с другой точки зрения. В тропических широтах Земли мощные потоки нагретого воздуха уносят в верхние слои атмосферы значительное количество микроорганизмов, бактерий, спор, организмов морского планктона. Определенные плотности органического вещества на разных высотах показали, что именно на высоте 15—20 км она достигает наибольшей величины — до 40 частиц (аэронов) на 1 см³. На этой высоте аэроны будут находиться 3—4 месяца, медленно перемещаясь в области средних широт. Принимая во внимание высокую мощность космических лучей, доза, полу-

³ Эти вспышки длятся несколько часов и возникают неоднократно за 11-летний солнечный цикл. Следует, правда, отметить, что сверхзвуковой самолет летит с большой скоростью и пассажиры будут находиться на высоте 20 км в два раза меньше времени, чем на современных самолетах, что, конечно, компенсирует суммарную дозу облучения.

Таблица 2
Доза, получаемая человеком от космических излучений

Место пребывания	Доза за определенный отрезок времени, мрад		
	час	месяц	год
Средние широты на уровне моря	0,04	2,3	28
Горы на высоте 1,5—2 км	0,06—0,08	3,5—4,6	42—56
Реактивный самолет (высота 10 км)	0,4	—	—
Сверхзвуковой самолет (высота 20 км)	4	—	—
Сверхзвуковой самолет во время солнечной вспышки	400—4000	—	—

ченная микроорганизмами, может достигнуть нескольких рад, а в годы повышенной солнечной активности — и сотен рад. В средних широтах облученные микроорганизмы войдут в нижние слои атмосферы и выпадут с осадками на поверхность Земли. В главах, где будет обсуждаться проблема биологических последствий малых доз радиации, рассматриваются возможные результаты такого переоблучения в высоких слоях атмосферы. Глубокая проникающая способность вторичных космических излучений объясняется большой энергией. Вот почему так трудно избавиться от их постоянного воздействия. Для проведения экспериментов с резко пониженным космическим облучением физики оборудуют специальные лаборатории в туннелях, проложенных у основания высоких гор.

В табл. 2 представлены дозы облучения человека космическими излучениями в разных условиях существования.

Земная радиация

Все живое на Земле находится под постоянным воздействием излучений от рассеянных в окружающей нас природе радиоактивных нуклидов. Одни из них постоянно образуются в атмосфере и на поверхности Земли в результате ядерных реакций, осуществляемых космическими лучами. Как уже говорилось выше, захват нейтрона

Таблица 3
Свойства урана и продуктов его распада

Радионуклид	Время полураспада	Энергия излучений, МэВ		
		α -	β -	γ -
Уран U ²³⁸	4,51 · 10 ⁹ года	4,15—4,20	—	—
Уран U ²³⁴	2,47 · 10 ⁵ года	4,72	—	0,053
Радий Ra ²²⁶	1602 года	4,78	—	0,186]
Радон Rn ²²² (газообразный)	3,8 дня	5,49	—	0,510]
Радиоактивный изотоп свинца Pb ²¹⁰	21 год	3,72	0,016—0,061	0,047
Стабильный свинец Pb ²⁰⁶				

атомом азота ведет к образованию радиоактивного углерода C¹⁴. За счет ядерных столкновений образуются радионуклиды N³ (третий), Be⁷ (радиоактивный изотоп бериллия), Na²² и Na²⁴ (радиоактивные изотопы натрия). С точки зрения внешних облучателей C¹⁴ и N³ не принимаются во внимание ввиду очень мягкого излучения этих изотопов. Радиоактивные бериллий и натрий дают высокоэнергетичные и, следовательно, глубоко проникающие β - и γ -излучения, т. е. участвуют во внешнем облучении живых организмов. Однако их образуется настолько мало, что удельный вклад в общую облученность оказывается ничтожным.

Иначе обстоит дело с естественными радионуклидами, такими, как уран, торий и радиоактивный изотоп калия (K⁴⁰), и продуктами их распада. Как известно, уран-238 образует целую серию продуктов распада. В табл. 3 приведена характеристика лишь наиболее интересных из них с точки зрения их участия в облучении биосферы.

Многие короткоживущие, промежуточно образующиеся нуклиды являются также и β -излучателями. Природный радий, например, излучает α -, β - и γ -лучи, так как всегда содержит некоторое количество таких продуктов распада (дочерние элементы).

Таблица 4

Концентрация радионуклидов в земных породах

Тип пород	Концентрация, Ки ⁴			Полоченная доза на высоте 1 м от поверхности, мкрад/ч	
	K ⁴⁰	U ²³⁸	Th ²³²		
Изверженные породы:	гранит	27	1,6	2,2	12
	диорит	19	0,62	0,88	6,2
	базальт	6,5	0,31	0,30	2,3
	диорит	4,0	0,01	0,66	2,3
Осадочные породы:	известняк	2,0	0,75	0,19	2,0
	карбонат	—	0,72	0,21	1,7
	песчаник	40	0,5	0,3	3,2
	сланец	19	1,2	1,2	7,9

Длительно живущие элементы — уран, радий, свинец-210 — составляют значительную часть земного излучения. Радон всегда присутствует в приземном воздухе, вызывая облучение поверхности тела и легких при его вдыхании.

То же можно сказать и о втором широко распространенном радионуклиде — тории (Th²³²), имеющем время полураспада (в. п.) $1,41 \cdot 10^{10}$ года. При распаде радиоактивного тория образуются радий-228 (в. п. 5,8 лет), торий-228 (в. п. 1,9 года), короткоживущий радон-220 (в. п. 55 с), превращаясь в конечном результате в стабильный изотоп свинца Pb²⁰⁸.

Наконец, третий, самый распространенный естественный радионуклид — это радиоактивный ⁴⁰K постоянно сопровождающий природный, стабильный калий, имеющий время полураспада $1,26 \cdot 10^9$ лет и испускающий при распаде $\beta = (1,38 \text{ МэВ})$ и $\gamma = (1,46 \text{ МэВ})$ лучи. Концентрация этих радионуклидов в окружающих нас породах колеблется в широких пределах (табл. 4).

Радиоактивность почв тоже сильно варьирует в зависимости от сорбционных свойств, путей образования, промывания сточными водами (различие по величине в 5-6 раз).

⁴ Единица измерения активности радионуклидов получила название Кюри (Ки). Для малых активностей используют Пикокура (пКи); Ки = 10^{12} пКи.

Облучение от земных радионуклидов в большой степени зависит от снежного покрова, влажности почвы и даже времени суток. Действительно, слой снега и большая влажность экранируют излучения почвы, и общая доза в приземной атмосфере снижается. Ночью с понижением температуры газообразный радон рассеивается медленнее, чем днем в жаркую погоду, и доза облучения на поверхности почвы возрастает.

В различных частях света, в разных странах и отдельных местностях концентрация естественных радионуклидов подержана значительным колебанием, и соответственно изменяется средняя облученность населения.

Измерения средней поглощенной дозы от земного излучения (на высоте 1 м от поверхности) в разных странах показали, что она изменяется от 9—7 мкрад/ч в ГДР, Швеции, Италии — до 5,8—5,0 в Польше, ФРГ, Австрии, падая до 4,5—3,6 в США, Японии и Индии. Средние различия достигают более чем двукратного размера. Более сильные отклонения обнаружены в отдельных районах и местностях. При обследовании населения и получаемой им дозы в различных районах четырех стран (США, ФРГ, Италия и Япония) обнаружены колебания средней поглощенной дозы в 4—5 раз.

Еще более сильные отклонения от средних величин зафиксированы в отдельных районах, содержащих повышенные концентрации природных радионуклидов в основных породах. Подобные районы есть в Италии, Франции, Индии, Бразилии, Нигерии, на Мадагаскаре и в других странах. Такие районы наиболее изучены в Индии и Бразилии. В Индии вдоль юго-западного берега океана, в штатах Керала и Тамилль Наду, расположена местность (протяженность 250 км, глубина до 0,5 км), очень богатая моноцитом, содержащим торий, его продукты распада и редкие земли. Количество тория в моноцитовых песках доходит до 8—10% — это чрезвычайно высокая концентрация, не встречающаяся в других странах мира. В этой прибрежной полосе произрастают пальмы и другие виды растительности, обитают многие представители животного царства. В штате Керала в этом районе проживает около 70 тыс. коренного населения. Вычисленная для него средняя мощность облучения равна 130 мкрад/ч, или 1130 мрад/год, т. е. в 10 раз больше средней мировой величины. (Эта доза варьировала от 130 до 2814 мрад/год.)

В Бразилии подробно исследовалась обширная область вдоль побережья Атлантического океана в штатах Эспириту-Санту и Рио-де-Жанейро, богатая моноцитовыми песками. На прибрежных моноцитовых песках расположены три города: Гуарапари, Миайпе и Кумуруксагиба.

В Гуарапари проживает около 12 тыс. жителей. Это приятное место для легкого отдыха и купания в океане. Каждый год летом около 30 тыс. отпусковиков приезжают сюда отдыхать. Мощность облучения, измеренная на улицах Гуарапари, колебалась от 100 до 200 мкрад/ч, а в отдельных местах прибрежного пляжа (моноцитовые пески) поднималась до 2000 мкрад/ч. Близкие величины радиоактивности (от 100 до 1000 мкрад/ч) обнаружены и в поселке рыбаков на побережье (в 50 км от Гуарапари), в котором проживает около 300 человек. В городе Кумуруксагиба мощность облучения несколько ниже — в среднем около 50 мкрад/ч.

Другой район в Бразилии с повышенной радиоактивностью расположен в штате Минас-Жерас, на вулканических породах, где находится городок Покос-де-Калдас и Аракса-Тапира. Наибольшая радиоактивность установлена недалеко от городка Покос-де-Калдас. Мощность дозы здесь доходила до 2800 мкрад/ч. В области городка Аракса-Тапира, богатой апатитами, средняя мощность дозы была около 400 мкрад/ч.

В Иране, в городке Рамзар, на площади в несколько квадратных километров, богатой радиоактивными источниками, отмечена мощность облучения в воздухе от 200 до 500 мкрад/ч. Во Франции имеются ограниченные районы с радиацией в 200 мкрад/ч, доходящей в немногих местах до 10000 мкрад/ч. Районы с повышенной естественной радиоактивностью есть и в других странах (в Канаде, Чехословакии, Южной Африке, СССР). Как правило, они связаны с выходом радиоактивных вод, с залежами урана, с породами, содержащими высокие концентрации тория. Приведенные цифры говорят о том, что облученность людей и тем более наземной и почвенной фауны и флоры может в 100 и 1000 раз превосходить средние уровни по стране или всей поверхности Земли.

Заметно меняется облученность тела человека в зависимости от времени, которое он проводит в закрытых помещениях: дома, на службе, на заводах, в шахтах. Следует учитывать два обстоятельства: материал, из ко-

торого построено помещение, и качество вентиляции. Последнее обстоятельство связано с концентрацией радона, в основном действующего на ткани легких, что мы рассмотрим ниже.

Воздействие строительных материалов может проявляться двояко. С одной стороны, они защищают наше тело от внешней радиации, поглощая ее в своей толщине. С другой стороны, многие строительные материалы сами богаты радиоактивными естественными нуклидами и поэтому могут повышать мощность облучения в помещениях. Такие строительные материалы, как дерево, тепловые прокладки (войлок, стружки), почти не содержат или содержат очень мало радиоактивных нуклидов. В деревянных помещениях средний уровень облученности меньше, чем снаружи, вне дома. Отношение мощностей облучения внутри дома к внешнему облучению (коэффициент защиты) оказывается меньше единицы — 0,7—0,6. Низко радиоактивны и большинство пластиков, природный цемент, мрамор, дающие коэффициент защиты 0,8—0,9. С другой стороны, такие строительные материалы, как гранит, кирпич и бетон, имеющие в своем составе естественные радионуклиды, собственным излучением перекрывают защиту от внешнего облучения, и коэффициент возрастает от 1,3 до 1,7. Так, например, измерения, проведенные во многих домах в Швеции, показали, что средняя мощность облучения вне помещения в 90 мкрад/год в деревянных домах снижалась до 57, в кирпичных поднималась до 112, а в бетонных достигала 172 мкрад/год.

Обратная зависимость наблюдалась в колебаниях облучения в районах с повышенной естественной радиоактивностью. Например, исследования, проведенные в районе Керала (Индия), показали, что в легких деревьях, бамбуковых и глиняных хижинах облучение было высоким (в некоторых местностях достигало 2800 мкрад/год), так как эти материалы не защищали от высокого внешнего фона, а в кирпичных и цементных зданиях проявлялась защита, и мощность дозы снижалась до 500—700 мкрад/год.

Таким образом, внешнее облучение в биосфере на поверхности Земли в нормальных условиях, примерно на высоте 1 м от ее поверхности, складывается из космических лучей (28,3 мкрад/год) и земной радиации (32 мкрад/год).

В сумме организм человека получает 60 мрад/год. Эта величина заметно больше в горах и в районах повышенной радиоактивности.

Важно подчеркнуть, что корневая система растений так же, как и прорастающие семена, непосредственно соприкасаясь с распыленными в почве естественными радионуклидами (уран, торий, радий, калий), будет постоянно облучаться β - и γ -радиацией. Известный радиобиолог Д. М. Гродзинский, учитывая большую площадь разветвленной корневой системы, рассчитал, сколько пар ионизаций будет воспринимать корневая система одного растения в различных почвах Украинской ССР. Для озимой ржи он получил около 10 млн. β -частиц ежедневно. В зависимости от радиоактивности почвы (колебания в 2-3 раза) и размеров корневой системы растений эта величина может варьировать в 3-4 раза для различных видов растений и условий их произрастания.

Почвенные микроорганизмы, особенно в районах с высокой радиацией, также являются объектами повышенного облучения. Вода морей и океанов имеет естественную радиоактивность в основном за счет значительного содержания в ней калия с его радиоактивным изотопом K^{40} . Морская вода содержит $3,8 \cdot 10^{-1}$ г/л калия, что и обуславливает ее радиоактивность, равную $3,3 \cdot 10^{-10}$ Ки/л.

Что же известно о внутреннем облучении нашего организма, растений, обитателей морей и океанов и других представителей биосферы?

Естественные радионуклиды постоянно вовлекаются в круговорот веществ, который так характерен для живых организмов. Пути и степень их проникновения в живые организмы будут зависеть от природы радионуклида. Радиоактивный изотоп углерода C^{14} постоянно образуется в верхних слоях атмосферы благодаря ядерной реакции космических лучей (нейтронов) с азотом: $n + N^{14} \rightarrow p + C^{14}$. Окисляясь кислородом или озоном, этот углерод превращается в радиоактивную углекислоту: $C^{14} + O_2 \rightarrow C^{14}O_2$. Последняя, равномерно перемешиваясь с обычной углекислотой (на что уходит около года), поглощается зелеными листьями растений в процессе фотосинтеза.

Хорошо известно, что все части растения строятся из продуктов фотосинтеза. Таким образом, углеводы, жиры,

белки и другие компоненты растений, содержащие углевод, будут слабо радиоактивны (содержат C^{14}) и, поступая в качестве пищи в организм животного и человека, создают постоянно действующий небольшой уровень внутреннего облучения. Период полураспада C^{14} очень велик (5720 лет), поэтому он существует тысячелетия на нашей планете. Определяя удельную активность углерода ископаемых растений (каменный уголь и др.) и растений, выросших в наше столетие, можно рассчитать (вводя поправки на известную скорость распада), с какой скоростью поступает в биосферу радиоактивный углерод из стратосферы. Такие расчеты показали, что скорость его поступления уравнивается распадом и выведением из биосферы (осаждение карбонатов в океанах и морях, захоронение). Благодаря этому многие тысячелетия концентрация радиоактивного углерода в атмосфере остается постоянной.

Установлено, что скорость образования C^{14} в верхних слоях атмосферы составляет 2,28 атома в 1 см^2 в секунду. Это значит, что за год его образуется 0,038 МКи. Эта цифра согласуется с содержанием C^{14} в атмосфере в целом, которое равно 3,8 МКи.

В атмосфере содержится около 1/60 части всего углерода (биосфера, океан, осадочные породы). На нашей планете около 230 МКи C^{14} , что сообщает природному углероду активность, равную 6,1 пКи на 1 г углерода. Это очень слабая активность, дающая за год облучение тканей человека в пределах 0,5—2,2 мрад.

Значительно больший вклад в суммарную активность вносит такой природный нуклид, как радиоактивный изотоп калия K^{40} . В обычном калии всегда содержится в очень небольшом количестве (0,0118%) радиоактивный изотоп K^{40} . Без калия не происходит нормального развития организмов, без него невозможна жизнь. Содержание калия строго регулируется как в животном, так и в растительном организмах. Его концентрация в растениях выше, чем в животных тканях. (Калий концентрируется во внутритканевом пространстве, и его сравнительно мало в межклеточной жидкости.) Существуют специальные механизмы, работающие в биомембранах, которые регулируют распределение калия в организме человека. Его содержание в эритроцитах крови достигает 460 мг%, в мышцах — 360 мг%, в головном

мозге — 330 мг %. Калия мало в костной ткани (50 мг %) и значительно меньше в сыровотке крови (20 мг %). В мужском организме по сравнению с женским его больше, особенно в период полового созревания. Молодой, энергично функционирующий организм содержит больше калия на 1 кг веса, чем старый. Эти данные получены при обследовании 859 человек обоего пола в камерах, позволяющих учитывать уровень и спектр излучения всего тела.

Соответственно содержанию калия меняется и облученность ткани от K^{40} . Исходя из его среднего содержания в человеческом организме (200 мг %), можно считать, что K^{40} усилит общую мощность облучения на 49 мрад/год. В различных тканях эта величина колеблется: в гонадах 9—21, ткани легких 10—24 и в костном мозге 16—38 мрад/год.

Облученность растений, содержащих до 400 мг % калия, составит 40 мрад/год. Несколько большую облученность получат семена с повышенным содержанием калия. Так, например, в бобах, фасоли, горохе содержание этого элемента доходит до 900—1200 мг %. Внесение калийных удобрений повышает облученность прорастающих семян и корней растений.

Морские животные активно поглощают калий из окружающей среды. Коэффициент накопления калия в мышцах широко варьирует у различных видов морских организмов от 2—5 у кишечнополостных до 9—19 у рыб. Соответственно будет варьировать и мощность облучения этих животных от аккумулярованного калия.

В природном рубидии содержится 27,8% радиоактивного рубидия. Но концентрация рубидия в нашем теле, как и в окружающей среде, очень мала (4—10 мкг/г). Его физиологическая роль неясна, а суммарная доза облучения очень мала (0,3—0,4 мрад/год).

Уран, торий, радий повсеместно распространены в земной коре. Как показали специальные эксперименты, торий почти не усваивается растениями. Его содержание ничтожно мало в собираемом урожае и в зеленой массе растений, поэтому его можно не рассматривать как внутренний излучатель в организмах растений, животных и человека.

Иначе ведут себя уран и радий. Соли урана из почвы поступают в растение. Некоторые виды растений ак-

тивно концентрируют уран. Было даже предложено использовать некоторые виды как своеобразные индикаторы присутствия урана в окружающей среде. Содержание урана в различных растениях отличается более чем на четыре порядка. Многие низшие растения, например мхи, лишайники, накапливают в своих тканях уран, особенно на почвах, богатых этим нуклидом. Среди высших растений тоже обнаружены отдельные представители с высоким содержанием урана (тысячелистник, дрок беловатый, бук лесной, кипарисовик Лоусона и др.). Повышенное содержание урана было отмечено в семенах высших растений, спорах низших грибов.

С растительной пищей уран попадает в организм животных и человека (около 0,2—0,9 пКи в день). Это количество в отдельных местностях, богатых урановыми солями, может повышаться до 1,2 пКи в день. Очень много урана (1,4·10⁻³ пКи в день) поглощается за счет вдыхания пыли окружающего воздуха, которая всегда содержит небольшие количества этого нуклида (около 7·10⁻⁵ пКи/м³). Значительно большие количества урана могут поступать в организм человека за счет воды некоторых минеральных источников. Если обычная питьевая вода содержит менее 0,03 пКи/л урана, то в некоторых местностях его содержание в воде доходит до 70 пКи/л. В Финляндии, близ Хельсинки, обнаружены источники, содержащие до 1000—5000 пКи/л, что связано с повышенным содержанием урана в этой местности.

В организме животных уран откладывается в костной ткани, где его содержание может быть в 30—100 раз выше, чем в мягких тканях. Однако в нормальных местностях абсолютное содержание урана невелико, и доза, воздействующая на костную ткань, колеблется в пределах 0,3—0,8 мрад/год. Содержание радия в окружающей нас среде колеблется, что вызывает поступление его в организм человека с пищей от 0,8 до 17 пКи за сутки.

Радием богаты фосфорные удобрения, усиленное использование которых несколько повышает его поступление в растения. Растения хорошо усваивают радий из почвы. Например, ореховое дерево (*Bertholletia excelsa*), растущее в Бразилии, поглощая уран из почвы, концентрирует его в тканях плодов; его содержание в орехах достигает нескольких тысяч пКи на 1 кг. Содержание

радия в питьевой воде различных источников колеблется от 0,01 до 1 пКи/л. Его много в некоторых минеральных водах известных курортов (Цхалтубо, Пятигорск, Висбаден и др.), где содержание радия достигает 5—10 пКи/л и выше.

В морской воде радия очень мало: от 2·10⁻¹⁵ до 3·10⁻¹⁴ г/л. Это дает небольшой его вклад в общую радиоактивность вод морей и океанов (0,27 пКи/л). Тем не менее многие морские организмы (мидии, моллюски и др.) накапливают радий в своем организме. Наибольшая концентрация радия обнаружена в тихоокеанском лососе. В местностях с повышенной радиацией поступление радия с пищей в организм человека достигает больших величин. Так, в штате Керала (в Индии) дневная доза радиации достигает 160 пКи. В Бразилии, в штате Аракса-Тапира, дневная доза радия достигала 240 пКи.

Радий, так же как кальций, попадая с пищей в животный организм, откладывается в костной ткани, в местах ее роста и усиленного обмена (70—90% поступившего в организм). Его содержание в костной ткани колеблется в различных странах от 2 до 30 пКи/кг, в то время как в мягких тканях оно равно 0,13 пКи/кг. Конечно, в районах с повышенной естественной радиоактивностью содержание радия в скелете тоже резко повышено: в Аракса-Тапира (в Бразилии) оно доходило до 230 пКи/кг, а штате Керала (в Индии) до 400 пКи/кг. Однако дозы, получаемые костной тканью, костным мозгом от этих следов радия, очень невелики: они не превышают 1 мрад/год, только в местностях с повышенной радиоактивностью достигают 20—40 мрад/год.

Много внимания ученые уделяют долгоживущим радиоактивным продуктам распада радия, таким, как полоний-210 (период полураспада 138,4 дня) и его предшественник свинец-210 (период полураспада 21 год). Так как эти радионуклиды образуются при распаде газообразного радона (эманации радия), который все время выделяется из почвы в атмосферу, то первично они образуются в виде мелко распыленного аэрозоля. Концентрация этих радионуклидов в атмосфере зависит от скорости поступления радона. Она велика в субтропиках и умеренных широтах северного полушария и почти на два порядка ниже в антарктических районах южного полушария. С дождем и снегом, а также в результате мед-

ленного оседания Р²¹⁰ и Р²¹⁰ выпадают на земную поверхность. Их содержание в дождевой воде колеблется от 0,2 до 7 пКи/л. В обычной питьевой воде содержится, как правило, менее 1 пКи/л, но в минеральных водах их содержание доходит до 10 пКи/л.

На поверхности Земли эти радионуклиды поглощаются растениями непосредственно через листовую поверхность или из почвы через корневую систему. Попадая в моря и океаны, Р²¹⁰ и Р²¹⁰ концентрируются в мышцах морских организмов, где их содержание может достигать до 500 пКи/кг. В организм человека эти радионуклиды могут попадать из воздуха при дыхании, при курении с табачным дымом и с растительной или животной пищей. Непосредственно из воздуха при дыхании за день в легкие попадает не более 0,37 пКи. Значительно большие количества поступают в легкие курильщиков. Табак в процессе роста поглощает выпадающие на его листья Р²¹⁰ и Р²¹⁰. При высокой температуре содержащиеся в табаке радионуклиды переходят в дым и с дымом проникают в легкие курильщиков. Человек, выкуривающий в день 20 сигарет, поглощает легкими до 3 пКи этих радионуклидов. Их поступление с пищей зависит от состава пищи и повышается на севере, где в питании преобладает мясо оленей, и в приморских странах, где население питается морскими продуктами (табл. 5).

Таблица 5

Поступление Р²¹⁰ и Р²¹⁰ в организм человека с пищей в течение дня *

Страны	Дневное поступление, пКи/день		Страны	Дневное поступление, пКи/день	
	Р ²¹⁰	Р ²¹⁰		Р ²¹⁰	Р ²¹⁰
ФРГ	4,6	4,6	Канада	—	100
Англия	3,2	3,2	Финляндия (север)	8,6	69
США	1,4	1,8	Швеция (север)	9	72—180
Япония	17	—	США (Аляска)	—	60

* Количественные данные этой и последующих таблиц, рисунков и текста соответствуют цифрам, приведенным в докладе Генеральной Ассамблеи ООН в 1977 г., представленном Научным комитетом по действию атомной радиации при ООН.

На Крайнем Севере лишайники, покрывающие поверхность тундры, поглощают почти весь выпадающий радиоактивный свинец и полоний. В лишайниках, собранных на севере Канады, Финляндии, СССР, США, содержание этих элементов достигает огромных величин: 6400—9200 пКи/кг сухого веса. У оленей, питающихся лишайниками, радионуклиды накапливаются в костях (до 5000 пКи/кг сырого веса) и мясе (до 360 пКи/кг). У северных народов, потребляющих мясо оленей (эскимосы, ненцы и др.), повышенное содержание ^{90}Po и ^{210}Pb в костях и мягких тканях.

Основная поглощенная доза обусловлена высокоэнергетичными α -частицами ^{210}Po . Для костной ткани она составляет 3 мрад/год для некурящих и около 4 мрад/год для курильщиков. В северных районах облученность от ^{210}Po костной ткани достигает 10 мрад/год и для мягких тканей 5—7 мрад/год. Доля β -излучения ^{210}Pb на два-три порядка ниже.

В процессе радиоактивного распада урана и тория образуются короткоживущие газообразные радиоактивные нуклиды. Уран-238 и находящийся с ним в равновесии радий-226 дают эманацию радия — радон-222 (Rn^{222}) с периодом полураспада 3,8 дня. При распаде радон-222 дает ряд короткоживущих (п. п. — минуты и секунды) дочерних радиоактивных нуклидов. При распаде тория тоже образуется газообразный нуклид торон-220, очень быстро распадающийся (п. п. 55 с) с образованием серии короткоживущих дочерних радиоактивных нуклидов. По своим свойствам радон-222 и торон-220 очень близки друг к другу (благородные газы), как близки их твердые (аэрозоли) быстрораспадающиеся дочерние продукты. Поэтому принято второе название торона — радон-220. (Обычно используется второе название, имея в виду общий источник радиации.)

Радон постоянно образуется в окружающих нас породах, почвах, строительных материалах, воде и выделяется в атмосферу. Радон, как благородный газ, не реагирует с компонентами воздуха, но, распадаясь, дает серию дочерних нуклидов (полоний-218, 214, 216, 212; свинец-214, 212 и висмут-214, 212), которые, соединяясь с кислородом, водой и другими газами атмосферы, образуют частицы очень малых размеров — кластеры. В течение секунд и минут они агрегируют, давая более круп-

ные частицы аэрозоля, оседающие на окружающие поверхности. Практически через три часа уже все дочерние продукты распадаются.

Хотя речь идет о короткоживущих радионуклидах, однако их постоянное новообразование и распад приводят к равновесному их содержанию в атмосфере, поэтому определенным постоянный уровень радиации. Этот уровень обычно оценивается в пКи на литр суммарного излучения радона и его дочерних короткоживущих продуктов распада. В шахтах, где содержание радона и его продуктов распада повышено, удобнее использовать в качестве единицы измерения величину 100 пКи/л, называемую рабочим уровнем (РУ).

Концентрация радона и его продуктов распада в окружающей нас среде варьирует в широких пределах. В природе она достигает наибольших величин в газах почвы и непосредственно на ее поверхности. Концентрация быстро падает с высотой: уже на высоте 1 м она, как правило, в два—четыре раза меньше, чем на поверхности почвы, а на высоте 4—5 м уже ничтожно мала. В солнечные дни падение содержания радона и продуктов его распада с высотой проявляется более резко, чем ночью. Над континентами концентрация выше, чем над поверхностью морей и океанов.

С высокими концентрациями радона и продуктов его распада мы сталкиваемся в закрытых, плохо вентилируемых помещениях. Конечно, проявляется зависимость от строительного материала помещения и от качества вентиляции. Табл. 6 дает представление о вариациях этих величин.

Многие природные источники содержат радон. Его концентрация в воде различных источников колеблется от величин ниже 1 пКи/л до 10^6 пКи/л. Многие озера и реки содержат от 3 до 10 пКи/л, грунтовые воды — от 10^2 до 10^4 пКи/л. При использовании этих вод для питья или для купания можно получить дополнительное, иногда весьма значительное облучение (подробнее мы рассмотрим эту ситуацию в другой главе). Кипяченая вода и минеральные воды, транспортируемые в бутылках, конечно, уже не содержат радона и короткоживущих продуктов его распада.

Доза и мощность облучения от радона и его дочерних продуктов распада будет сильно варьировать в раз-

Таблица 6
Концентрация радона в различных помещениях

Тип помещения и условия вентиляции	Концентрация радона, пКи/л
Хорошо вентилируемые служебные помещения с воздушным кондиционированием	0,06—0,35
Квартиры в кирпичных домах с воздушным кондиционированием	0,01—0,19
Квартиры деревянных домов	0,03—1,7
Невентилируемые квартиры	
Кирпичные дома:	
нижние этажи	1,5—2,9
верхние этажи	0,7—1,0
Каменные дома:	2,3—5,8
Дома из шлаковых панелей	4,0—8,0
Подвальные этажи с плохой вентиляцией	3,6—7,8

личных организмах и их тканях. Наибольшую дозу получают бронхимальные эпителиальные клетки, непосредственно соприкасающиеся с радоном при дыхании и постоянно сорбирующие крупные частицы радиоактивного аэрозоля (дочерние продукты). Мелкие частицы (клетки) проникают и в более глубоко лежащие клетки легких. Близки к ним и дозы, действующие на поверхность

Таблица 7

Годовые дозы облучения человека от природных источников радиации в нормальных условиях, мрад

Источник радиации	Органы (ткани)			
	Гонады	Легкие	Костные клетки	Красный костный мозг
Внешнее облучение:	28	28	28	28
	32	32	32	32
Внутреннее облучение:	15	17	15	27
	0,2	30	0,3	0,3
радон-222 (с дочерними нуклидами)	2	5,5	9,1	4
другие нуклиды	78	110	84	92
Всего				

кожи. Очень немного радона растворяется в крови и разносится по внутренним органам. При питье свежих минеральных вод, богатых радоном, значительная доза будет падать на эпителий желудочно-кишечного тракта.

Из всего сказанного в этой главе можно заключить, что все живые организмы на земле постоянно подвергаются облучению от природных источников. Получаемые дозы варьируют в пределах одного-двух порядков в зависимости от места обитания, условий жизни и питания. Научный комитет по действию атомной радиации при ООН рассчитал средние годовые дозы излучения для всего населения (для различных тканей человека), живущего в нормальных условиях, от основных источников природной радиации. Полученные данные приведены в табл. 7.

В среднем нормальную облученность человека от естественного радиоактивного фона можно принять за 100 мрад/год. В зависимости от природных условий возможны вариации дозы в пределах 60—10 000 мрад/год.

Вреден или полезен этот естественный фон радиации для человека? Для животного и растительного мира? Для биосферы в целом? К этим вопросам мы вернемся в последующих главах.

ЗАГРЯЗНЕНИЕ БИОСФЕРЫ РАДИОАКТИВНЫМИ НУКЛИДАМИ

В 1954—1955 гг. стали появляться сообщения ученых из различных стран мира (США, Японии, Швеции, СССР и др.) об обнаружении в атмосфере таких радиоактивных нуклидов, как стронций-90, цезий-137, церий-144, никогда ранее не присутствовавших в окружающем нас мире. Начали сказываться последствия взрыва мегатонной атомно-водородной бомбы, которая в порядке испытаний была взорвана 1 марта 1954 г. на уединенном острове Тихого океана — Бикини, на тысяче километров удаленном от населенных мест. Впервые стали проявляться на земном шаре глобальные последствия ядерного взрыва, произведенного в любой точке нашей планеты.

Как известно, с 1954 г. начались усиленные испытания ядерного оружия. Один экспериментальный взрыв следовал за другим. Мощности взрываемых устройств возрастала. Одновременно возрастало загрязнение всей биосферы нашей планеты радиоактивными нуклидами, как короткоживущими, так и долгоживущими, время полураспада которых измерялось десятками и тысячами лет.

Вековая устойчивость окружающего естественного радиоактивного фона оказалась нарушенной. Новые необычные радионуклиды обнаруживались в атмосфере, почве, продуктах питания, в теле человека, создавая особую и локальную повышенную облучаемость живых организмов. Человечество впервые столкнулось с таким явлением. Ничего не было известно ни о размерах распадающегося облучения, ни тем более о последствиях. Однако уже первые наблюдения вызвали большую озабоченность среди ученых. Им стало ясно, что взрывы ядерного оружия, производимые в районах, удаленных от населенных мест, изменяют уровни радиоактивности во всех точках

земного шара. Следовательно, возникновение войны с массовым применением ядерных бомб, где бы она ни происходила, будет иметь последствия, губительные для человечества, для жизни на Земле.

Лучшие умы мира, вложившие много труда в исследование тайн строения атома, теперь, когда их самые смелые мечты были осуществлены, с ужасом увидели, что их открытия направлены против человечества, сеют страх, несут разрушения и гибель.

Первым раздался голос величайшего физика-теоретика нашего века Альберта Эйнштейна. По его инициативе, горячо поддержанной английским философом Бертрамом Расселом и французским физиком Фредериком Жолио-Кюри, был опубликован манифест. Этот документ вошел в историю как призыв Рассела—Эйнштейна, предупреждавший мир о нависшей над человечеством опасности от возможного использования атомной энергии в военных целях.

«В трагической ситуации, вставшей перед человечеством, — начинался этот манифест, — мы чувствуем, что ученые должны встретиться, чтобы оценить ту опасность, которая возникла в результате создания оружия массового разрушения... Мы говорим об этом не как представители той или иной нации, континента, вероучения, а как люди, представители человечества... Мы хотим научиться думать по-новому. Мы хотим спросить себя, не какие шаги нужно предпринять, чтобы обеспечить военную победу одной стороны над другой, а какие шаги необходимы, чтобы предупредить войну, несущую гибель обеим сторонам!..»¹

Под призывом Рассела—Эйнштейна стоят подписи лауреатов Нобелевской премии М. Борна, Ф. Жолио-Кюри, Л. Поллинга и других. Манифест кончается призывом заключить соглашения между Западом и Востоком, смягчающие политическую напряженность, исключить ядерное оружие как средство решения конфликтов.

И привел выдержки из манифеста потому, что сейчас, 20 лет спустя, они звучат с новой силой в связи с протестом передовой общественности против нейтронной бомбы, этого нового варварского оружия массового

¹ Манифест Рассела—Эйнштейна в кн.: *Rotblat I. Pugwash.* Изд-во АН СССР, 1967, с. 77.

уничтожения людей, применение которого грозит гибелью цивилизации.

В августе 1955 г. в Лондоне состоялась первая встреча советских ученых с учеными Запада, на которой было принято решение о созыве международной встречи ученых, направленной против испытания ядерного оружия, против подготовки ядерной войны. Такая встреча состоялась в Канаде, в рыбацком поселке Пагуош (Новая Шотландия). Так началось сейчас уже всемирно известное движение ученых — Пагуошские встречи, направленные на поиски приемлемых решений для смягчения напряженности международной обстановки и предупреждения ядерных конфликтов.

Отражая настроения широкой общественности, Генеральная Ассамблея Организации Объединенных Наций в 1955 г. постановила включить в повестку дня своей

Таблица 8

Основные радионуклиды, образующиеся в результате деления урана-235 или плутония-239

Атомный номер	Элемент	Химический символ радионуклида	Характер излучения	Период полураспада
36	Криптон	Kr ⁸⁵	β, γ	10 лет
37	Рубидий	Rb ⁸⁷	β	6,1 · 10 ¹⁰ лет
38	Стронций	Sr ⁸⁹	β	54 дня
39	Иттрий	Sr ⁹⁰	β	28 лет
40	Цирконий	Y ⁹¹	β, γ	61 день
44	Рутений	Zr ⁹⁵	β, γ	65 дней
48	Рутений	Ru ¹⁰³	β, γ	40 дней
51	Рутений	Ru ¹⁰⁶	β	290 дней
52	Кадмий	Cd ¹¹⁵	β, γ	43 дня
53	Сурьма	Sb ¹²⁶	β	28 дней
55	Теллур	Te ¹²⁷	β, γ	90 дней
55	Иод	I ¹³¹	β, γ	8,1 дня
56	Цезий	Cs ¹³⁷	β, γ	33 года
56	Барий	Ba ¹⁴⁰	β, γ	13 дней
58	Церий	Ce ¹⁴¹	β, γ	33 дня
58	Церий	Ce ¹⁴⁴	β, γ	282 дня
60	Неодим	Nd ¹⁴⁷	β, γ	12 дней
61	Прометий	Pm ¹⁴⁷	β, γ	2,2 года
63	Европий	Eu ¹⁵⁵	β, γ	4,7 года

десятой сессии пункт, озаглавленный «Действие атомной радиации». 3 декабря 1955 г. была принята резолюция об учреждении Научного комитета ООН по действию атомной радиации (НКДАР) в составе ученых из 15 стран. Генеральная Ассамблея поручила комитету собрать все данные о радиологической обстановке в мире, определить уровни излучений и радионуклидов в окружающей среде, изучить действие ионизирующих излучений на человека и оценить опасность для человечества от всех имеющихся и возникающих вновь источников радиации.

Советский Союз в НКДАР представлял с 1956 г. крупный физиолог и радиобиолог А. В. Лебединский, а с 1960 г. до наших дней — автор этой книги. Научные доклады комитета, представляемые через каждые 2—4 года Генеральной Ассамблее ООН, — ценнейшие научные сводки и отражение взглядов крупнейших ученых мира, специалистов по этим вопросам.

Что же реально происходит при взрывах атомных и водородных бомб в атмосфере, на поверхности Земли или под водой? Во время взрыва в результате достижения критической массы ядерного горючего (уран-235, плутоний-239) идет распад атомных ядер (реакция деления) с образованием многочисленных радионуклидов с различным временем полураспада. Ниже представлен перечень этих радионуклидов, если не упомянуть те из них, у которых время полураспада меньше пяти суток (табл. 8).

В момент взрыва образуется мощный поток высокоэнергетических нейтронов (как и при взрыве нейтронной бомбы). Под их воздействием возникают радиоактивные вещества из материалов оболочки бомбы, а если взрыв осуществлен на поверхности Земли, то и из элементов почвы и земных пород, из элементов атмосферы и воды (так называемая наведенная радиоактивность).

Из них наиболее опасны с точки зрения облучения биосферы длительно живущие изотопы кобальт-60 (в. п. 5 лет), тритий (в. п. 12,4 лет), марганец-54 (в. п. 310 дней).

Все радионуклиды при высокой температуре взрыва (2—3 млн. градусов) находятся в газообразном состоянии и выносятся в стратосферу. Здесь при быстром охлаждении происходит конденсация радионуклидов

в аэрозоли различного диаметра. Благодаря воздушным течениям (в основном с востока на запад) массы воздуха, содержащие радиоактивные аэрозоли, довольно быстро распространяются в широтном направлении с востока на запад и в течение месяца относительно равномерно распределяются вокруг всего земного шара. Одновременно, но более медленно идет диффузия аэрозолей в сторону полюсов. Благодаря продолжающейся конденсации аэрозольных частиц под влиянием земного притяжения они будут постепенно снижаться и в средних широтах поступать в тропосферу — нижнюю часть атмосферы. В тропосфере радиоактивные аэрозоли вовлекаются в конденсирующиеся водяные пары и вместе с осадками (дождем, снегом) выпадают на поверхность Земли (радиоактивные осадки). При сухом климате осаднение аэрозолей происходит несколько медленнее. Исследования и авиации, позволившие использовать аэрозольные зонды и радионуклидов. Время их пребывания в стратосфере составляет от 6 месяцев до года, а в тропосфере — от 3 до 6 месяцев. Таким образом, вся поступившая в атмосферу радиоактивность в течение одного-двух лет после взрыва оседает на поверхности Земли и океанов. При этом осевшая масса (до 80%) выпадает в том полушарии, в котором был осуществлен взрыв.

Если взрыв происходит близко от поверхности Земли, то в радиоактивное облако включается большое количество земных пород с наведенной радиоактивностью и происходит более быстрая конденсация радионуклидов в тяжелые частицы уже в средних слоях атмосферы. Это приводит к более быстрому выпадению части радионуклидов вблизи (десятки и сотни километров) от места взрыва. Такие местные радиоактивные осадки, выпадающие в виде белого тонко распыленного порошка, неоднократно наблюдались в окрестностях ядерных взрывов, в основном по направлению ветра, несущего радиоактивное облако. От силы ветра зависела интенсивность и дальность их выпадения. В 1954 г. весь мир облетела весть о трагической истории японских рыбаков, находившихся в Тихом океане на расстоянии 130 км от 0-ва Бикини, когда там была взорвана американцами атомная водородная бомба. Взрыв был осуществлен на небольшой высоте над коралловым рифом острова. Весь коралловый

атолл был вовлечен в образование радиоактивного облака. Через 3 ч после взрыва в районе, где находился корабль с японскими рыбаками, началось выпадение очень мелкого белого порошка, проникавшего во все щели, под одежду, в легкие, в глаза, уши. Выпадение этих белых хлопьев длилось 4—5 ч. Иногда плотность осадков была столь велика, что не позволяла видеть окружающие предметы. Осадки покрыли всю палубу корабля, кожу рыбаков, пищу и загрязнили поверхность океана. Долгое время рыба этого района была радиоактивной.

Пока японские рыбаки добирались до берегов Японии, начались признаки сильнейшей лучевой болезни. Как определили впоследствии японские ученые, выпадавший осадок имел радиоактивность, равную 1 Ки/г (радиоактивность чистого радия). Такая высокая активность была вызвана быстрым оседанием и, следовательно, содержанием многих короткоживущих радионуклидов.

Болезнь у всех рыбаков протекала очень тяжело и оставила глубокие последствия. Один из них умер от тяжелых поражений внутренних органов радиоактивными осадками. Как стало известно значительно позднее (американское командование долго скрывало эти факты от общественности), на Маршалловых островах, отстоящих от места взрыва более чем на 300 км, 239 местных жителей и 28 американцев были настигнуты теми же радиоактивными осадками. Большая удаленность и быстро принятые меры по обезвреживанию и удалению осадков снизили острое радиоактивное поражение, но оно не прошло бесследно для здоровья потерпевших.

Эти примеры говорят о той огромной опасности, которую несут на сотни километров от эпицентра ядерного взрыва так называемые местные осадки. Однако основная масса радионуклидов, как было указано выше, распространяется по всему земному шару, выпадая на его поверхность в течение примерно одного-двух лет. За это время многие короткоживущие радионуклиды распадаются. Но такие, как стронций-90, цезий-137, церий-144, рубидий-87, многие годы сохраняют радиоактивность, изменяя естественный радиоактивный фон нашей планеты.

Действительно, каждый новый экспериментальный взрыв увеличивал радиозагрязненность окружающей среды. Определение Sr^{90} в почве различных стран пока-

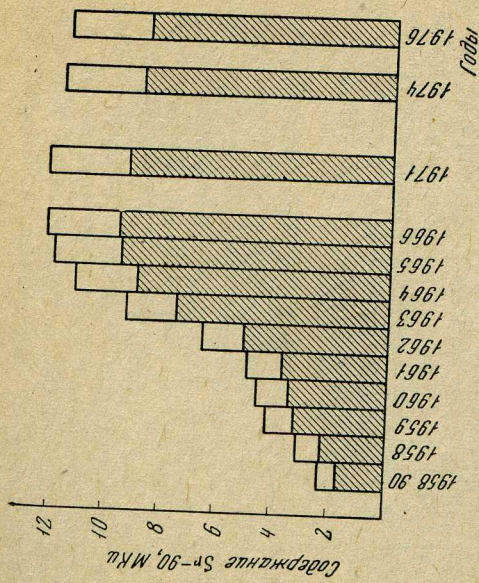
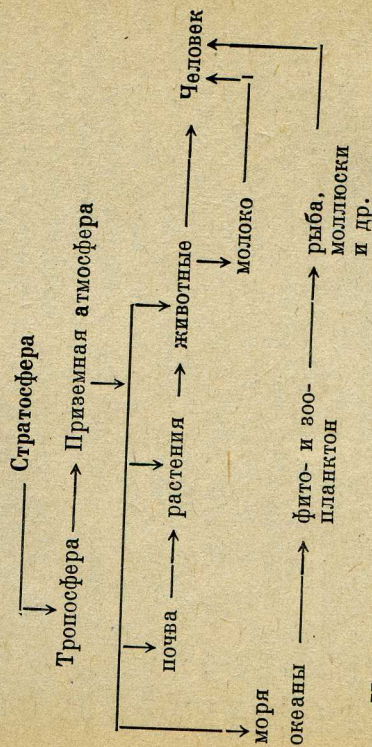


Рис. 1. Огложения Sr⁹⁰ на Земле. Затрихованная часть — северное полушарие, незатрихованная — южное полушарие

зало, как из года в год росло загрязнение нашей планеты, что наглядно показано на рис. 1. В атмосфере из года в год увеличивалось содержание радиоактивного углерода. Радиоактивные осадки, выпадающая на поверхность Земли, морей и океанов, включались в обмен веществ живых организмов, накапливались в них и через пищевые цепи попадали в организм человека.



На схеме представлены наиболее типичные пути распространения в биосфере таких долгоживущих радионуклидов, как Cs¹³⁷, Sr⁹⁰ и др. Каждый из них имеет свои

особенности. По химическим свойствам Sr⁹⁰ является аналогом кальция. Кальций необходим для развития растений и животных. Растения через корневую систему жадно поглощают из почвы соли кальция, одновременно в них поступает и радиоактивный стронций. Животные, питаясь растительной пищей, получают кальций, идущий на построение костного скелета; в большом количестве он поступает в молоко (необходимый элемент для питания молодых и детей). Вслед за кальцием, как его мрачная тень, в молоко и костную ткань устремляется и радиоактивный стронций. Исследования показали, что в ряде стран в отдельные годы в молоке содержалось повышенное количество Sr⁹⁰. Из молока радиоактивный стронций поступает в детский организм, где вслед за кальцием откладывается в быстро растущем скелете. Поэтому дети подвергались большему риску по сравнению со взрослыми: в скелете 1—2-летних детей концентрация стронция-90 оказалась в 4—5 раз выше, чем у взрослых (определения в костях случайно погибших людей, проведенные в Англии в 1964 г.).

Другой долгоживущий радионуклид, цезий-137, по химическим свойствам близок к калию. Поступая в организм животных из растительной пищи, он распределяется, как и калий, в мягких тканях — мускулах, мозге, печени, гонадах и т. п. В тело человека этот элемент поступает с растительной пищей (хлеб, овощи, фрукты), мясом, рыбой и другими пищевыми продуктами моря. В почве цезий быстро переходит в трудноусвояемую форму, и его поступление в растения через корни идет не очень эффективно. Но зато цезий очень легко всасывается листовыми поверхностями. В годы, когда его выпадение совпало с вегетативной стадией развития сельскохозяйственных растений (когда была сильно развита листовая поверхность), растительная пища оказывалась сильно загрязненной радиоактивным цезием.

Своеобразная обстановка сложилась в тундре (Северная Аляска, северные области Финляндии, Норвегии и СССР). Летом в этих районах вся поверхность земли услана сплошным покровом лишайника и мха. Выпадающий цезий-137 почти целиком поглощается этой растительностью. У оленей, питающихся лишайниками и мхом, накапливался в организме радиоактивный цезий. Жители Севера, питаясь мясом оленей, получали значи-

тельно больше радиоактивного цезия по сравнению с людьми средних широт.

В табл. 9 приведены данные, показывающие большие колебания в содержании Cs^{137} в организме человека в 1964 г. в зависимости от продуктов его питания в разных странах.

Таблица 9

Содержание Cs^{137} в организме людей в зависимости от продуктов питания (1964 г.)

Страна, место жительства	Содержание цезия-137, пКи
Северная Америка	
Аляска	3400—9100
Нью-Йорк	430—180
Калифорния	91—114
Швеция	
Стокгольм	182—235
Лапландия	2600—5400
Дания	143—195
Финляндия	
Хельсинки	204—218
север страны	2260—8360
Норвегия	
Осло	357
северные фиорды	2000

В результате взрыва образуются и относительно долго живут рутений-106 (п. п. 290 дней) и церий-144 (282 дня). Остатки приземных слоев атмосферы, они присутствуют в воздухе в виде аэрозоля. Эти элементы не участвуют в обмене веществ живых организмов и поэтому не покидают во внутренние ткани. При дыхании они непосредственно соприкасаются лишь с тканью легкого, усиливая его облучение так же, как аэрозоли цезия-137 и других других короткоживущих радионуклидов.

Из короткоживущих радионуклидов следует упомянуть изотоп йода — йод-131 (п. п. 8 дней). При определенных метеорологических условиях вблизи места взрыва раз наблюдали значительные выпадения йода-131. Йод очень активно включается в обмен и в первые недели после взрыва обнаруживается в молоке. Попадая с молоком организм детей, он почти полностью поглощается щито-

видной железой, синтезирующей из него гормон — тироксин. Йод создает в ней повышенный очаг радиации. В отдельные годы доза, получаемая щитовидной железой от J^{131} у детей, достигала 50,80 и 100 мрад/год, а в некоторых районах доходила и до 200—300 мрад/год, хотя в иные годы и в общем она колебалась в пределах 0,3—10 мрад/год.

Рост радиоактивного загрязнения нашей планеты отравил безудержную гонку ядерного вооружения с ее неизбежными экспериментальными взрывами все большей и большей мощности. Если за шесть первых лет (1945—1951 гг.) всеми странами мира было взорвано около 0,2 Мт ядерного оружия, то уже в следующие пять лет (1952—1956 гг.) эта цифра увеличилась до 11, далее — до 177, а только за один 1962 г. она составила 217 Мт!

Общественность всего мира требовала прекращения этой самоубийственной гонки вооружений. Широкая кампания за запрещение ядерных взрывов ярко проявилась еще в 1950 г. знаменитым Стокгольмским воззванием, обращенным к людям всего мира. Воззвание содержало слова пламенного борца против ядерного оружия Фредерика Жолио-Кюри: «Мы требуем безоговорочного запрещения атомного оружия — оружия запугивания и массового уничтожения...»

За три месяца под воззванием было собрано сто миллионов подписей!

Научный комитет по действию атомной радиации ООН в своем втором докладе, представленном Генеральной Ассамблее ООН, на основании анализа роста содержания радионуклидов в окружающей среде, в пище и организме человека указывал, что только прекращение ядерных испытаний может избавить человечество от вредных последствий повышения радиоактивного фона. Пагуошские конференции ученых представляли своим правительствам единое мнение ученых о необходимости запрещения ядерных взрывов как необходимого первого шага к предотвращению ядерной войны.

В декабре 1962 г. в Москве был подписан договор между СССР, США и Великобританией о запрещении ядерных взрывов в трех средах (в атмосфере, на поверхности Земли и под водой). С 1962 г. и по настоящее время этот договор выполняется подписавшими его странами. Правда, Китайская Народная Республика и Франция, не

присоединившиеся к Московскому договору, испытывали ядерное оружие и в последующие годы. Китай осуществил взрывы ядерных бомб над своей территорией в октябре 1964, мае 1965, в мае 1966 гг. и еще шесть взрывов в период 1966—1968 гг. В 1968 и 1970 гг. были взорваны ядерные устройства Францией в Южном полушарии, на островах Тихого океана. За последние годы еще шесть взрывов в атмосфере было осуществлено Китаем и 14 — Францией. Как же все отразилось на радиоактивности окружающей нас среды?

Радиоактивные осадки от наиболее мощных взрывов 1961—1962 гг. продолжали выпадать еще в 1963—1964 гг. Однако уже в 1963 г. было зафиксировано уменьшение короткоживущих радионуклидов, что привело к резкому снижению радиоактивного йода в молоке коров и, следовательно, к снижению облучения щитовидной железы у детей.

С 1964 г. начали отчетливо проявляться результаты Московского договора. Прекращение крупных взрывов привело к значительному падению содержания радионуклидов в атмосфере. На рис. 2 показано, как стремительно из года в год шла очистка атмосферы от содержания в ней радиоактивного стронция. Однако взрывы, произошедшие Китаем и Францией (время наиболее крупных взрывов показано на рис. 2 стрелками), замедлили этот процесс. Кривая после каждого взрыва поднимается, показывая, что и до настоящего времени некоторый уровень этого радионуклида сохранился в окружающей нас среде.

Уменьшение радиоактивных осадков сопровождалось снижением загрязненности радионуклидами продуктов питания, о чем можно судить по рис. 3, отражающему содержание Sr^{90} в продуктах в различные годы. Близкие данные были получены и для содержания Cs^{137} в молоке, фруктах, овощах, мясе. После 1965 г. стало заметно снижаться содержание Sr^{90} в костной ткани человека.

Что же добавили к естественному фону радиации излучения от радионуклидов, появившихся в окружающей среде и проникших внутрь организма? Дать точный ответ на этот вопрос оказалось не так-то просто. Мы видели, как сильно изменялся уровень загрязнения радионуклидами из года в год, как изменяется их проникновение в организм человека в зависимости от географических ус-

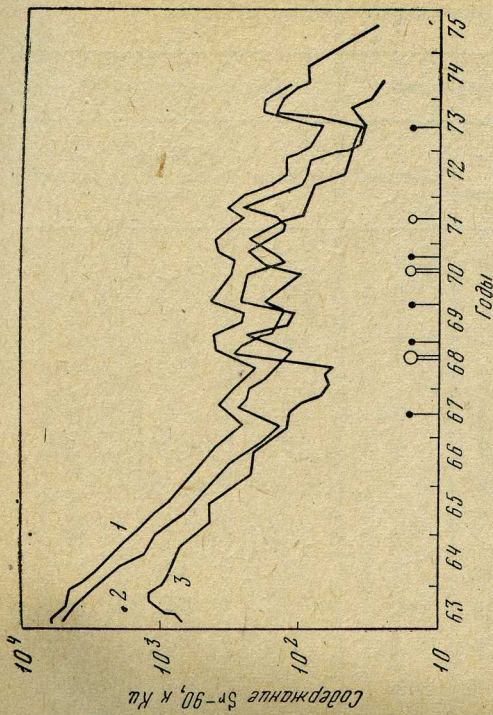


Рис. 2. Содержание Sr^{90} в атмосфере за 1963—1975 гг.

На оси абсцисс кружками отмечено время крупных взрывов: черные кружки — в северном полушарии, светлые — в южном.

- 1 — во всей стратосфере,
- 2 — в северном полушарии,
- 3 — в южном полушарии

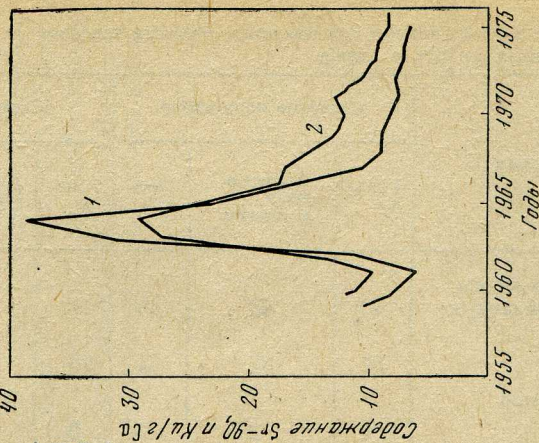


Рис. 3. Содержание Sr^{90} в продуктах питания

- 1 — в Дании,
- 2 — в США (Нью-Йорке)

ловой обитания, от продуктов питания и возраста человека. Если мощность дозы от естественного фона радиации мало менялась со временем и для ее характеристики было удобно пользоваться величиной, получаемой за год, то облучение от радионуклидов ядерных взрывов очень непостоянно. Оно меняется в зависимости от сравнительно

короткого периода полураспада, мощности и периода поглощения радионуклидов в атмосферу. Все эти обстоятельства побудили Научный комитет по действию атомной радиации ООН, занимающийся подсчетами, определить средние суммарные дозы, получаемые человеком и его критическими тканями² за весь период с начала первых испытаний и до последнего времени. Полученные величины представлены в табл. 10.

Из приведенных цифр видно, что в среднем человекство получило за 20 лет ядерных испытаний дозу, примерно в два раза большую, чем оно получает ежегодно за счет естественного фона радиации. Для отдельных районов эти цифры могут быть в 5—8 раз больше (например, для Крайнего Севера за счет цезия-137). Следует подчеркнуть, что пока они сопоставимы с естественным фоном радиации и повышают его средние величины даже в наиболее загрязненных районах не более чем на 30—50%. Если же вспомним, что естественный фон радиации отклоняется от средних величин в различных областях Земли на 300—600%, то будет ясно, что пока ядерные взрывы не вывели на нашей планете радиоактивный фон за пределы его естественного колебания. Это важно иметь в виду.

² Критическими тканями в радиобиологии называют радиочувствительные ткани, ответственные за радиационные повреждения всего организма.

Источники радиации	Северное полушарие			Южное полушарие			Для всего населения
	Понад костный мозг и клетки	Лет-ки	Понад костный мозг и клетки	Лет-ки	Понад костный мозг и клетки	Лет-ки	
Внешнее облучение от коткожяущих радионуклидов	48	48	11	11	30	30	30
Внутреннее облучение	62	62	18	18	38	38	38
Всего	110	110	29	29	68	68	68
Н ³	2	2	0,2	0,2	2	2	2
С ¹⁴	7	32—29	7	32—29	7	32—29	9
Sp ⁹⁰	—	84—120	—	24—33	—	52—71	—
Ru ¹⁰⁶	—	—	—	—	—	—	24
Cs ¹³⁷	27	27	8	8	17	17	17
Cs ¹⁴⁴	—	—	—	—	—	—	38
Другие радионуклиды	1	1	0,3	0,2	0,7	0,7	1,6
Всего	150	260—290	45	93—100	94	190	160

Таблица 10
Суммарные средние дозы, полученные критическими тканями человека от радионуклидов в результате ядерных испытаний, проведенных до 1976 г., мрад

ВНОСИТ ЛИ АТОМНАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ РАДИАЦИИ В БИОСФЕРУ?

В современном человеческом обществе потребность в энергии возрастает с каждым годом. Расход энергии на душу населения в высокоразвитых странах в 5—10 раз больше, чем в развивающихся государствах. Потребление энергии на душу населения по мере развития этих стран будет возрастать. Но ведь и население во всем мире стремительно возрастает. По расчетам демографов, в 1970 г. на земном шаре было 4 млрд. человек, а к 2000 г. будет около 7 млрд. Потребность в энергии во всем мире возрастет минимум в 10 раз.

Известно, что такие традиционные источники энергии, как уголь, нефть не безграничны. Запасы угля и нефти уменьшаются быстрее, чем мы хотели бы. За счет чего же человечество будет покрывать дефицит энергии?

Изыскание новых источников энергии идет в различных направлениях. Разрабатываются пути и создаются проекты использования геотермальной энергии. Очень заманчиво непосредственное превращение солнечной энергии в электрическую, что наиболее перспективно в космическом пространстве. Огромные усилия ученых направлены на разработку путей использования термоядерной энергии, образующейся при ядерном синтезе. Разрабатываются методы более совершенного промышленного использования энергии ветра, морских приливов и отливов. Все эти пути перспективны, но в настоящее время еще далеки от своего экономического выгодного и практического осуществления.

Единственный новый источник энергии, уже широко используемый и имеющий огромные резервы, это энергия ядерного деления, эксплуатируемая в атомных электростанциях. На 4-й международной конференции по мирному использованию атомной энергии, проходившей, как и предыдущие, в Швейцарии, на основе анализа эффек-

тивности работающих и проектируемых атомных электростанций был сделан прогноз развития атомной промышленности на ближайшие годы, поразивший всех своим размахом.

В 70-х годах на атомных электростанциях (АЭС) в мировом масштабе вырабатывалось около 22 GW (миллиардов ватт). В 1976 г. дали электроэнергию 188 реакторов, работающих в 19 странах мира. Вырабатываемая ими энергия оценивалась в 79 GW. К 2000 г., согласно проведенным расчетам, АЭС будут давать до 2000 GW!

АЭС требуют в качестве топлива радиоактивный уран или плутоний. Кроме того, работа АЭС сопровождается образованием радиоактивных нуклидов и накоплением большого количества радиоактивных отходов. Возникает вопрос: как отразится рост атомной промышленности на окружающей среде, изменит ли он и в какой степени естественный радиоактивный фон в биосфере? Другими словами, опасен или безопасен для человечества бурный рост атомной промышленности во всем мире?

Следует отметить, что после окончания 4-й Женевской конференции, ясно очертившей перспективу развития мирной ядерной промышленности в ближайшем будущем, в западной печати появилось несколько сообщений, концентрирующих внимание общественности на опасности мирного использования атомной энергии. В Чикаго (США) широко известность приобрела книга Гофмана и Тэмплина «Дело против ядерных силовых предприятий» [1971], в которой авторы призывают затормозить строительство атомных электростанций как несущих угрозу здоровью населения страны. Подобные книги, выходящие в капиталистических странах, вызывают озабоченное отношение, если принять во внимание ожесточенную борьбу конкурирующих монополий и стремление Пентагона развивать военную ядерную мощь за счет сдерживания мирного использования атома.

Очень характерно для капиталистического мира высказывание сенаторов А. Вандерберга и В. Макмагона против использования атомной энергии на транспорте. Основной довод заключается в том, что в результате акции всех железнодорожных и угольных компаний обесценятся. Страховые компании, связанные с капиталовложениями в железные дороги, обанкротятся, и все это в конечном счете приведет к общему финансовому кри-

зису. Вероятно, и сейчас некоторые нефтяные и угольные компании кровно заинтересованы в торможении развития новой ядерной индустрии и готовы инспирировать любые доводы против ее развития.

«Меморандум врачей, сообщавший о вредности и опасности ядерной индустрии», изданный в Париже в 1971 г. и подписанный многими врачами и общественными деятелями, сообщает, что при работе каждого реактора образуется большое количество радиоактивных веществ. Среди них газобразные радиоактивные изотопы криптона, ксенона, аргона, загрязняющие мировую атмосферу. Указываются на образование радиоактивного изотопа водорода — трития, проникающего в сточные воды, и радиоактивного летучего изотопа йода J^{131} , проникающего через молоко коров в организм детей. В меморандуме подчеркивается, что за несколько месяцев работы в атомном реакторе образуется столько же радиоактивного стронция-90, сколько его мгновенно возникает при взрыве 5-мегагонной атомной бомбы. Приводятся известные данные о том, что радиоактивные вещества, попав внутрь организма, в течение долгого времени облучают его клетки, вызывая образование наследственно передаваемых мутаций, гибельных для потомства, увеличивают вероятность заболевания раком или лейкемией. Авторы приходят к заключению, что ядерная индустрия опасна для человечества и биосферы в целом. Они призывают запретить строительство и эксплуатацию всех силовых реакторов.

Права ли авторы меморандума? Можно ли приходить к таким ответственным выводам, не проанализировав количественную характеристику возможной опасности? В настоящее время уже есть точные экспериментальные факты, позволяющие провести такую оценку. Научный комитет по действию атомной радиации при ООН провел такую оценку и изложил ее в своем последнем докладе Генеральной Ассамблее ООН, представленном осенью 1977 г.

Каково же истинное положение дел? Чтобы янее его себе представить, вспомним, что производство электроэнергии за счет ядерного деления слагается из следующих этапов:

- 1) получение урановой руды;
- 2) выделение из нее урана, обогащенного изотопом U-235;

3) работа атомных реакторов, дающих энергию;

4) переработка отработанных твэлов с целью получения плутония — нового ядерного горючего;

5) транспорт и хранение радиоактивных отбросов производства.

Рассмотрим последовательно все этапы производства атомной электроэнергии с точки зрения загрязнения окружающей нас среды радионуклидами в местном и глобальном масштабах.

Добыча урановой руды и ее первичная обработка

Урановую руду добывают в горных районах Канады, Франции, Советского Союза, США, Южной Африки и в ряде других стран в шахтах и открытым способом. Урановая руда содержит не более 0,2% урана, и обычно на месте добычи она проходит первичную обработку по обогащению ураном. В результате получают урановые концентраты, которые транспортируются на специальные обогатительные заводы.

Урановая руда, как правило, содержит и другие радионуклиды, в том числе радий-226, торий-230 и 234, свинец-210, полоний-210. Часть из них уходит с урановым концентратом, а часть остается в отходах на месте первоначальной переработки руды. Небольшое количество попадает в промывные воды. Газообразный радон (п. п. 3,8 дня) поступает в атмосферу.

При добыче руды и ее первоначальной обработке не происходит образования, т. е. увеличения, количества радоннуклидов. Идет лишь извлечение естественно находящихся радиоактивных веществ на поверхность Земли. Часть их остается в отвалах первично обработанной руды на месте ее добычи. Конечно, в этом районе фон естественной радиоактивности повышается. При размалывании руды образуется небольшое количество радиоактивной пыли, поступающей в воздух и, как правило, полностью оседающей на расположенной поблизости от рудника территории (десятки километров).

Так как добыча и первоначальная обработка руды происходят в горных районах, удаленных от населенных мест, то местное повышение радиоактивности не вносит

оптимального вклада в облученность населения Земли. Радиоактивные отбросы, как правило, засыпают землей. Захоронение на глубину в 1 м уже в два раза снижает количество поступающего в воздух радона.

Конечно, работа в урановых шахтах относится к профессионально вредному труду, что в первую очередь обусловлено повышенным содержанием радона в туннелях шахт. Усиленная вентиляция, максимальное использование механических устройств для добычи руды, сокращение рабочего времени и другие мероприятия снижают профессиональную вредность. Количество населения, работающего в шахтах, ничтожно мало по сравнению с населением нашей планеты. Таким образом, добыча урановой руды не несет опасности человечеству.

Второй этап — выделение урана из руды — происходит на урановых обогатительных заводах. Дробление руды, промывание, извлечение урана кислотой и его химическое осаждение характерны для любой горнорудной промышленности и при соблюдении правил санитарной безопасности, автоматизации производства и обработки жидких стоков не угрожают радиоактивным загрязнением внешней среды. Специальное внимание санитарного надзора должно быть направлено на правильное удаление и хранение отбросов переработанной руды.

Только около 1% всей руды утилизируется заводом, а 99% выбрасывается в отвалы. Эти отвалы хотя и обеднены ураном, как правило, богаты дочерними продуктами его распада: радием-226, свинцом-210 и другими радиоактивными элементами, выделяющимися при своем распаде газообразный радон. Исследование, проведенное в 1974 г. в США, показало, что количество этих отходов за 1969 г. достигало огромных цифр — 83 млн. т. Недостаточное внимание к их хранению привело в отдельных районах к местному облучению значительных групп населения. Так, например, в Колорадо, в районе Гранд Джанкшн, где расположены мощные урановые заводы, какие-то дельцы предложили использовать отходы урановой руды в качестве материала — заполнителя для строительства жилых домов. За 1952—1966 гг. было построено около 3 тыс. зданий из брикетов, содержащих отбросы урановой руды. Исследование воздуха в этих зданиях, проведенное в 1974 г., показало значительно более высокое содержание в нем радона. В большинстве обследо-

ванных домов содержание радона было в 10 раз, а в некоторых (хуже вентилируемых) даже в 100 раз выше нормы. Расчеты показали, что люди, живущие в этих зданиях, за год будут получать дополнительную дозу облучения легких от 2 до 20 рад.

Некоторые заводы в начале своей деятельности безответственно спускали радиоактивные отходы в реки. Так, в 1958 г. в водах реки Колорадо (США) ниже того места, где расположены урановые заводы, было отмечено в 400 раз более высокое содержание радионуклидов по сравнению с нормой. Предпринятые в 1962 г. меры привели к резкому снижению радиоактивных отходов. Изменения, проведенные в 1967 г., показали нормальное их содержание в водах этой реки.

Правильная технология замкнутого цикла, неглубокое захоронение отходов показали, что уже на расстоянии 0,8 км от завода нельзя обнаружить отклонений от нормы в радиоактивности окружающей среды. Таким образом, и заводы по обогащению и получению концентратов урана при правильной организации и применении мер санитарного контроля не являются источником глобального радиоактивного загрязнения биосферы и не представляют реальной опасности для населения нашей планеты.

Концентрация, очистка урана и его обогащение ураном-235

Концентраты урана, полученные на обогатительных заводах, поступают на специальные химические заводы, где получают чистый металлический уран (или его окись U_3O_8) и обогащают изотопом — ураном-235. Природный уран — уран-238 — содержит лишь 0,7% изотопа урана-235. Для производства урановых стержней, применяемых в легководных реакторах, требуется обогащение содержания урана-235 до 2—4%. Для этого уран химически превращают в летучее соединение — фторид урана (UF_6), которое пропускают через пористые барьеры для частичного разделения изотопов урана вследствие различной скорости диффузии. Чтобы повысить концентрацию урана-235 с 0,7 до 4% требуется около 1700 таких барьеров.

Эта сложная химическая и физическая переработка урана оборудуется, как и многие вредные химические

производства, по принципу замкнутого цикла, т. е. без выпуска в окружающую среду вредных перерабатываемых веществ. Обогащенный ураном-235 фтористый уран вновь превращается в окись урана или металлический уран, из которых и изготавливаются урановые стержни, поступающие для зарядки реакторов атомных электростанций.

Работа атомных электростанций

Если все предыдущие этапы производства атомной энергии заключались в очистке и изменении состояния уже имеющихся в природе радиоактивных нуклидов, то дело принципиально меняется, когда в действие вступают силовые ядерные реакторы, в недрах которых происходит распад ядер урана с освобождением огромных количеств энергии и образованием большого количества радиоактивных веществ. Именно атомные реакторы, появившиеся в середине нашего столетия, в ближайшем будущем кроют нашу планету густой сетью и в корне изменят всю радиоактивную обстановку на Земле.

Действительно, в течение миллионов лет существования Земли в ее породах шел только распад радиоактивных веществ. В середине нашего столетия человек начал энергично создавать искусственные радиоактивные вещества. В работающих силовых реакторах атомных электростанций непрерывно идет образование радиоактивных продуктов деления. При делении ядер урана (именно эта ядерная реакция продуцирует атомную энергию) образуется более ста различных радиоактивных веществ. Происходит мощное нейтронное излучение, вызывающее наведенную радиоактивность в жидкостях, циркулирующих в реакторах при охлаждении и переносе энергии.

Строительство многих химических заводов и тепловых электростанций осуществлялось задолго до того, как была осознана важность проблемы загрязнения окружающей среды. Через их трубы в атмосферу выбрасывались огромные количества вредных для биосферы веществ, таких, как окислы азота, окислы серы и многие другие. В воды рек поступали жидкие отходы, до настоящего времени губящие жизнь ее обитателей во многих местах нашей планеты. (Катастрофические результаты этой че-

ловеческой деятельности можно наблюдать в крупных промышленных центрах Японии.) Совершенно иная картина на атомных электростанциях. При проектировании атомных электростанций учитывалась опасность поступления в окружающую среду радиоактивных отходов, поэтому производство планировалось по строго замкнутому циклу, с жестким контролем и сохранением всех потенциально опасных радиоактивных нуклидов.

Следует напомнить, что ядерный распад происходит в герметически закрытых топливных элементах реактора и, следовательно, все твердые продукты деления остаются в урановых стержнях. Основное внимание с точки зрения загрязнения окружающей среды привлекают некоторые газообразные или летучие продукты распада, такие, как изотопы криптона, ксенона, йода, тригтий и элементы с наведенной активностью — Ar^{41} , Cl^{36} , N^{16} , S^{35} .

Большинство образующихся радиоактивных благородных газов (изотопы ксенона и криптона) имеют короткий период полураспада (ксенон-135 — 9,2 ч, ксенон-133 — 5,3 дня, ксенон-138 — 17 мин, криптон-88 — 2,8 ч, криптон-87 — 76 мин). Попадание этих элементов в атмосферу не представляет опасности по двум причинам: как благородные газы они не вступают в метаболизм и не накапливаются в тканях живых организмов и по мере распространения в атмосфере, быстро распадаясь, теряют свою радиоактивность. Только один изотоп — криптон-85 — принадлежит к долгоживущим радионуклидам: его период полураспада 10,7 лет. Накапливаясь в атмосфере, он повышает естественный фон облучения. Более подробно об этом будет сказано в конце главы. Здесь же отметим, что криптон-85 составляет лишь несколько процентов от общей радиоактивности газов работающего реактора.

Образование газов с наведенной радиоактивностью происходит различно в реакторах с разными системами охлаждения. Так, например, в реакторах с газовым охлаждением при использовании CO_2 идет ядерная реакция в неоплывивших элементах $\text{O}^{16} \xrightarrow{(n,p)} \text{N}^{16}$ с образованием короткоживущего радиоактивного азота (период полураспада 7,3 с) с жестким γ -излучением. Оно вносит значительный вклад в γ -поле работающих турбин реактора, снижаемое соответствующей физической защитой.

Из образующихся во время работы реактора газообразных нуклидов наибольшее внимание привлекает радиоак-

тивный изотоп водорода — тритий H^3 . Некоторое его количество образуется в процессе деления урана, а также благодаря воздействию нейтронов на изотопы лития, бора и тяжелый изотоп водорода дейтерий. Особенно много его образуется в реакторах, работающих на тяжелой (дейтериевой) воде. Графит, используемый в качестве регулятора во многих системах реакторов, содержит примеси лития, который тоже служит источником трития. Из-за трудности в фиксации и отнесительно большого периода его полураспада (12,4 лет) тритий попадает в окружающую реактор среду и распространяется в атмосфере, водах морей и океанов, правда, в очень небольших количествах.

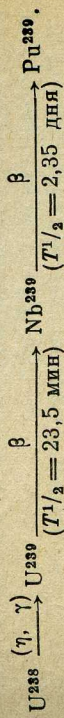
При делении урана и при радиоактивном распаде продуктов деления в работающем реакторе атомных электростанций постоянно образуется ряд легколетучих радиоактивных изотопов йода: J^{131} (п. п. 8 дней), J^{132} (2,3 ч), J^{134} (53 мин), J^{135} (6,7 ч) и J^{129} (4,6·10⁷ года). Из этих изотопов долгоживущий J^{129} образуется в столь малом количестве, что не обнаруживается во внешней среде. Не представляют опасности и остальные изотопы благодаря ничтожно малому времени их существования. Исключение составляет лишь J^{131} , имеющий период полураспада 8 дней. Попадая в газообразные отходы, он быстро распространяется на местности вблизи реактора и благодаря химической активности быстро включается в пищевые цепи — через молоко попадает в организм человека. Фильтры, устанавливаемые на пути газообразных отходов, захватывают основную часть образующегося йода, резко снижая его поступление в окружающую реактор среду.

Таким образом, благодаря замкнутому циклу работающих атомных электростанций, системе фильтров для газообразных и летучих продуктов в окружающую среду поступает лишь незначительное количество криптона-85, трития и йода-131: намного меньше, чем при переработке отслуживших урановых стержней (твэлов), — следующего этапа производства атомной энергии.

Работа заводов по регенерации ядерного топлива

Во время работы атомной электростанции, получающей энергию за счет деления атомов урана, среди продуктов деления и ядерных реакций в стержнях накапливается

плутоний-239 (Pu^{239}) — чрезвычайно ценное ядерное горючее — путем следующих превращений урана:



Поэтому отработанные стержни поступают на специализированные заводы для извлечения и очистки плутония-239 и превращения его в новое ядерное горючее для реакторов.

На регенерационных заводах твэлы выдерживаются некоторое время в водных бассейнах для охлаждения и распада многих короткоживущих радионуклидов. Затем их содержимое извлекается, обрабатывается азотной кислотой, органическими комплексобразующими растворами. В результате уран и плутоний отделяются от радиоактивных отходов, превращаются в окислы, удобные для приготовления ядерного горючего.

При этих процедурах такие летучие и газообразные нуклиды, как йод, тритий, криптон, ксенон и другие, выделяются в окружающую среду и, пройдя ряд плотителей и фильтров, все же в некотором количестве поступают через заводские трубы в атмосферу. Долгоживущий криптон-85 — основной компонент в радиоактивном загрязнении внешней среды. Тритий в значительной мере растворяется в так называемых жидких отходах, содержащих основную массу радиоактивных отходов, и только около 7% попадает непосредственно в атмосферу. Однако при сгущении жидких отходов происходит дополнительное поступление трития в окружающую среду.

При выдерживании стержней основная масса J^{131} распадается, однако долгоживущий изотоп J^{129} , несмотря на меры по его адсорбции, в небольшом количестве поступает в окружающую среду.

Твердые радиоактивные отходы, их хранение и удаление

Очень незначительная часть радиоактивных нуклидов, образующихся при производстве атомной энергии и переработке ядерного горючего, попадает в окружающую среду при нормальной работе АЭС. Основная же часть после регенерации урана и плутония концентрируется,

образу высокорadioактивные отходы производства. К концу нашего столетия вследствие развития атомной энергетики их количество достигнет весьма внушительного объема — около 10^4 м³.

Radioактивные отходы регенерирующих заводов содержат радионуклиды с длительным периодом полураспада. Среди них — рубидий-87 (п. п. $6,1 \cdot 10^{10}$ лет), стронций-90 (28 лет), цезий-137 (30 лет), иллиний-147 (2,2 года), церий-144, европий-155, рутений-106, марганец-54 (около одного года). По количеству на первом месте находятся стронций-90, цезий-137, рутений-106 и церий-144. Остальные присутствуют в сравнительно малом количестве. Эти радиоактивные отходы не должны поступать в окружающую среду. Их концентрируют, заключают в контейнеры и помещают на длительное хранение.

Хранение радиоактивных отходов — одна из сложнейших проблем ядерной промышленности. Ведь речь идет о тысячах мегаюри радиоактивных веществ! Среди них стронций-90 и цезий-137 имеют период полураспада около 30 лет. Это значит, что хранение должно предусматривать их изоляцию минимум на сотни лет вперед! Не случайно проблеме хранения радиоактивных отходов, т. е. проблеме безопасности атомной промышленности, было посвящено так много докладов на 4-й Женевской конференции 1974 г. (78 докладов из 505 представленных на конференции).

В настоящее время радиоактивные отходы в разных странах, на различных заводах хранят по-разному. Обычно после концентрации их помещают в бетон или битум. Часто используется захоронение в отработанных соляных шахтах. Многие заводы производят захоронение радиоактивных отходов на большую глубину в специально выбранных породах, находящихся в области с низкой сейсмической активностью и свободных от циркулирующих подземных вод. (Radioактивные отходы изолированы от подземных вод толстым непроницаемым слоем глины.)

Высокорadioактивные отходы перед захоронением включают в специальные раславы, затвердевающие при охлаждении (например, фосфатное стекло и др.). Некоторые страны практикуют сбрасывание бетонных контейнеров с радиоактивными отходами на большую глубину

в океан, что, конечно, потенциально несет большую опасность, чем захоронение в силикатных породах.

Как показала последняя Женевская конференция, в этой области еще много проблем, и возникают все новые и новые проекты их разрешения. Так, большое внимание привлек проект использования подземных ядерных взрывов для захоронения радиоактивных отходов. По идее автора этого проекта А. Вильсона из Австрии, в толстом пласте силикатной породы с низкой проницаемостью на глубине нескольких километров производится подземный атомный взрыв. В образовавшуюся полость вводят жидкие отходы с высокой активностью, которые от высокой температуры в полости испаряются, оставляя в ней твердые радиоактивные вещества. Вводя все новые и новые жидкие отходы, ими заполняют всю полость. Вследствие радиоактивного распада вся масса разогревается до высокой температуры, плавится и спелается с окружающей силикатной породой. Через десятилетия порода остывает, затвердеет, и радиоактивные вещества, связанные в решетке породы, смогут столетия храниться без соприкосновения с внешней средой.

Много других проектов и предложений обсуждается и используется на практике. Важно, что образовавшиеся радиоактивные вещества находятся под контролем: они не попадают в окружающую среду стихийно. Чем шире развивается ядерная энергетика, тем более совершенные методы будут изыскиваться для изоляции контролируемых радиоактивных отходов.

Следует сказать несколько слов о судьбе низкорadioактивных жидких отходов, образующихся в процессе работы силового реактора и генерирующих заводов. Широко практиковались в начале развития атомной промышленности сбросы отходов в близлежащие водоемы (озера, реки, моря) привели к местному радиоактивному загрязнению территорий вокруг этих заводов. Так, например, в Англии такие сбросы проводились и в моря, окружающие Британские острова, и во внутренние воды.

Английский исследователь Н. Т. Митчелл опубликовал в 1971 г. результаты обследования Трансвиннидского озера, в воды которого в течение ряда лет сбрасывались жидкие отходы из реактора, работающего в его окрестностях. По подсчетам Р. Брайанта и Ф. Марли, радиоактивность нуклидов, сброшенных за год этим реактором, со-

ставила около 4 Ки. Среди них преобладали радиоактивные элементы серы, кальция, стронция, цезия. Попадая в пресную воду озера, эти элементы поглощались водорослями, планктоном, а после их отмирания оседали на дно или попадали в организм рыб, поедающих планктон и водоросли.

В один из летних дней экспедиция, организованная Митчеллом, отобрала весь дневной улов примерно у ста рыбаков-любителей, ловивших окуньков и форель в этом озере. Рыба была тщательно исследована. На 1 г сырого веса форели приходилось около 1 пКи, а окуня — в 2—3 раза больше радиоактивных нуклидов из отходов (радиоактивность, вызванная осадками от испытания ядерного оружия сюда не входит). Была рассчитана доза облучения, которую бы получил человек за год, если бы он ежедневно съедал 100 г рыбы из Трансвиннидского озера. Она оказалась равной 20 мрад в год, т. е. примерно в 6—7 раз меньше, чем человек получает от естественной радиации (120—140 мрад в год).

Аналогичные исследования проводились в США на р. Гудзон, куда сбрасывались отходы атомного реактора. Концентрация радионуклидов в рыбе, обитающей в солоноватых водах Гудзона, была почти на два порядка ниже, чем в рыбе пресного озера Трансвиннид. Следовательно, и население, потребляющее эту рыбу, могло получить лишь десятые доли миллирад за год. Радионуклиды, попадающая в воды рек, по мере удаления от источника разбавляются, сорбируются и осаждаются с илом, что снижает возможность попадания в организм человека.

Тем не менее национальный санитарный надзор и рекомендации Международной комиссии по радиационной безопасности строго ограничивают размеры допустимых отбросов. Этому способствует и улучшение техники предварительной очистки жидких отходов от радиоактивных веществ.

Таким образом, с точки зрения глобального радиоактивного загрязнения биосферы нашей планеты на всех стадиях промышленного производства атомной энергии только три радионуклида — тритий, криптон-85 и радиоизотопы йода могут быть потенциально опасными.

Наибольшую опасность несет тритий. Это относительно долгоживущий изотоп: период его полураспада равен 12 годам. Следовательно, он будет накапливаться

в атмосфере. Определения показали, что уже к 1970 г. атомная промышленность выбросила в атмосферу около 1 МКи трития. С развитием ядерных энергетических реакторов есть все основания ожидать к 1980 г. увеличения содержания трития в атмосфере Земли до 34 МКи, к 1990 г. — до 200, а к 2000 г. — до 720 МКи.

Тритий, обладающий всеми химическими свойствами обычного водорода, будет легко образовывать воду, содержащую тритий ($\text{HН}^3\text{O}$). Это приведет к равномерному его распределению в атмосфере, в морях и океанах, а также в живых организмах, содержащих много воды и достаточно водорода во всех химических компонентах (жирах, белках, углеводах и др.). Молекулы воды, содержащие тритий, ничем химически не отличаются от обычной воды. Это делает практически невозможной очистку воды от трития, создает почти непреодолимые трудности в очистке от трития выходных газов. Но эти же свойства трития приводят к тому, что он не концентрируется в тканях организмов. Концентрация трития в живых организмах будет такой же, как и в окружающей среде.

Итак, 720 МКи трития поступит к 2000 г. в окружающую среду. Как оценить эту цифру? Какую реальную опасность несет она населению нашей планеты?

Прежде всего следует напомнить, что в воде рек, озер, морей и океанов, в питьевой воде, воде нашего тела тритий присутствует постоянно (правда, в очень малых количествах). (Выше говорилось о его образовании при ядерных, каскадных реакциях в атмосфере, вызываемых космическими лучами.) Мировые запасы трития в доатомный период оценивались в 27 МКи. Следовательно, к 2000 г. его содержание увеличится за счет атомных электростанций примерно в 30 раз. Если за норму принять содержание трития в 1963 г., то, как это ни странно, оно не только не повысится, но, наоборот, уменьшится!

Дело в том, что проведенные в 1956—1963 гг. экспериментальные взрывы ядерных бомб выбросили в атмосферу значительно большее количество трития. По подсчетам шведских ученых, количество образовавшегося трития в результате этих испытаний достигло к 1963 г. 1700 МКи. Таким образом, к 2000 г., когда пройдет три периода полураспада трития, выброшенного во время взрывов ядерного оружия, общее его содержание будет складываться из трех величин: 27 МКи естественного проис-

хождения, 210 МкКи нераспавшихся остатков трития от взрывов и 720 МкКи от атомной промышленности. Всего 957 МкКи . Это почти в два раза меньше, чем 1700 МкКи в 1963 г.

Средние дозы облучения мирового населения от трития в результате ядерных взрывов были очень тщательно вычислены и оказались к 1963 г. равными $0,7 - 2,8 \text{ мрад/год}$. Следовательно, облучение населения от трития, который поступит в окружающую среду в результате мирного использования атомной энергии к 2000 г., не превысит $0,8 \text{ мрад/год}$, т. е. будет составлять менее 1% от естественного фона облучения.

Таким образом, на первый взгляд устрашающе большие цифры радиоактивных веществ дают ничтожно малое усиление облученности населения. (Речь идет о неконцентрирующихся элементах, быстро разбавляющихся в огромных объемах атмосферы, морей и океанов нашей планеты.)

Второй радионуклид, вызывающий глобальное загрязнение атмосферы, — криптон-85. Он имеет период полураспада около 10 лет, образуется в сравнительно больших количествах (приблизительно $4 \cdot 10^8 \text{ Ки}$ на тонну регенерируемого топлива) и почти полностью выбрасывается в атмосферу при регенерации ядерного топлива. В 1970 г. содержание криптона-85 в атмосфере исчислялось в $16,5 \text{ МкКи}$. Если не будут использованы новые методы его поглощения, то можно ожидать, что к 2000 г. содержание этого радионуклида увеличится в 200—250 раз.

Радиоактивный криптон-85, как и его природные нерadioактивные изотопы (криптон-84 и др.), принадлежит к так называемым «благородным», или инертным газам. Он не входит в соединение с другими элементами и поэтому в ничтожном количестве поступает в организм (в силу своей небольшой растворимости в крови). Искуская сравнительно мягкие β - и γ -излучения, криптон-85 будет в основном облучать кожу, альвеолы легких и только в очень малой степени внутренние органы. В 1970 г. облучение человека криптоном-85 оценивалось лишь в $0,0004 \text{ мрад}$ на весь организм. К 2000 г. эта цифра возрастет до $0,4 \text{ мрад}$ в год, а на поверхность тела — до 20 мрад .

Оценка облученности от третьего радиоактивного легколетучего нуклида — йода — значительно сложнее,

При делении ядер урана образуется два радиоактивных изотопа — йод-129 с периодом полураспада $1,7 \cdot 10^7$ лет и короткоживущий йод-131. Как мы уже отмечали выше, йод-131, быстро распадаясь, не накапливается в атмосфере. Содержание йода-129 в атмосфере к 1970 г. составляло лишь $0,001 \text{ МкКи}$. К 2000 г., даже если не улучшится техника его поглощения, можно ожидать не более 2 МкКи , что составляет для глобального загрязнения ничтожную величину, хотя бы по сравнению с 420 МкКи трития.

Если суммировать все источники дополнительной радиации, то окажется, что к 2000 г. повышение естественного радиоактивного фона на Земле от атомных энергетических установок увеличится всего лишь на $1 - 2 \text{ мрад}$.

Научный комитет по действию атомной радиации при ООН дает два метода относительной оценки облученности населения от атомной промышленности. Первый метод заключается в определении так называемой средней коллективной дозы за год.

Коллективная доза отражает не только величину поглощенной дозы, измеряемую в радах, но и количество населения, получившего эту дозу. Поэтому она выражается в человеко-радах. Если доза мала, но ее получила большая популяция, то коллективная доза может быть велика. Наоборот, если дозы облучения значительны, но их получает очень ограниченное число людей, то коллективная доза будет мала. Она будет расти с ростом обеих величин. Средняя годовая коллективная доза для населения Земли от естественного фона радиации равна $3 \cdot 10^8$ человеко-рад. В табл. 11 приведены дозы для всех стадий производства атомной энергии.

Так как уже в 1976 г. количество вырабатываемой энергии оценивалось в 79 GW , то средняя коллективная доза, данная в таблице, должна быть умножена на 10^4 , т. е. будет равна $5 \cdot 10^5$ человеко-рад/год. Если ее сравнить с коллективной дозой от естественного радиоактивного фона, то она окажется примерно на три порядка ниже.

Второй метод сравнения заключается в сопоставлении продолжительности облучения мировой популяции естественным радиоактивным фоном, чтобы получить годовую дозу от данного источника. Для естественного радиоактивного фона эта величина будет, согласно определению, равна 365 дням. Годовая продукция всех существующих

Коллективная средняя доза, получаемая на различных стадиях производства атомной энергии

Стадия производства	Группа населения	Средняя коллективная доза, человек-радиант (МэВ) в год
Добытие руды и изготовление ядерного горючего	Рабочие на производстве	0,2—0,3
	Население, живущее в районе станции	1,0
Работа атомной электростанции	Рабочие на производстве	0,2—0,4
	Население, живущее в районе завода	Ничтожно мало
Регенерирующие заводы	Рабочие на производстве	1,2
	Население, живущее в районе завода	0,1—0,6
Исследовательские работы	Все население	1,1—3,3
	Лица, ведущие эти работы	1,4
Все производство	Все группы	5,2—8,2

атомных электростанций (производительность $8 \cdot 10^4$ MW(e)) даст в этих единицах величину 0,6, т. е. за год население нашей планеты от всей атомной индустрии получит такую дозу, которую оно получает менее чем за одни сутки от естественного фона радиации. Таким образом, даже к 2000 г., когда производство атомной энергии возрастет в 40—50 раз, избыток облученности все еще будет лежать в пределах обычных колебаний естественного радиоактивного фона. Эти расчеты ясно показывают, сколько неправы люди, призывающие к торможению развития атомной индустрии, дающей человечеству необходимую энергию.

Следует отметить, что развитие атомных электростанций затормозит увеличение тепловых электростанций, сильно загрязняющих окружающую среду выбросами в атмосферу ядовитых окислов азота и серы, потребляющих во всевозрастающих количествах кислород, который уже сейчас с трудом восполняется редкими лесами нашей планеты. Развитие атомной энергетики затормозит эти вредные процессы.

ИОНИЗИРУЮЩАЯ РАДИАЦИЯ В ПОВСЕДНЕВНОЙ ЖИЗНИ

В предыдущих главах обсуждалась радиационная обстановка на нашей планете в глобальном масштабе. Мы рассмотрели источники и уровни облучения естественного фона радиации, действующие в биосфере, остановились на изменениях радиоактивного фона вследствие испытаний ядерного оружия. Мы убедились, что радиационное воздействие от атомных электростанций вряд ли увеличит естественный уровень радиоактивности на нашей планете. Для тревоги нет оснований, особенно при сопоставлении пользы от атомных электростанций с их неизмеримо малым влиянием на радиоактивность окружающей нас среды. Все подчас велось крупномасштабно: в отношении всей планеты и человечества на десятки лет вперед.

Но естественно возникает вопрос: а не сталкиваемся ли мы с невидимыми лучами в повседневной жизни помимо этих глобальных источников? Не создает ли человек вокруг себя дополнительные источники радиации при той или иной деятельности, не пользуемся ли мы этими источниками, подчас не ассоциируя их с действием атомной радиации?

В современной жизни человек действительно создает ряд воздействующих на него источников, иногда очень слабых, а подчас и достаточно сильных. Читателю, наверное, интересно будет узнать, что это за источники и чего от них можно ожидать.

Прежде всего рассмотрим хорошо известные рентгеновские диагностические аппараты, которыми снабжены все поликлиники и с которыми мы сталкиваемся при всевозможных профилактических обследованиях, проводимых в массовом масштабе среди населения. Статистика показывает, что количество лиц, проходящих рентгеновское обследование, возрастает с каждым годом на 5—

15% в зависимости от страны, уровня медицинского обслуживания. Все мы хорошо знаем, какую огромную пользу приносит современной медицине рентгенодиагностика. Человек заболел. Врач усматривает признаки серьезного заболевания. Рентгеновское обследование часто дает решающие данные, следуя которым врач назначает лечение и спасает жизнь человеку. Во всех этих случаях уже не важно, какую дозу облучения получит больной при той или иной процедуре. Речь идет о заболевшем человеке, о ликвидации непосредственной угрозы его здоровью, и в этой ситуации вряд ли уместно рассматривать возможные отдаленные последствия от самой процедуры облучения.

Но за последнее десятилетие в медицине наметилась тенденция усиленного использования рентгеновских обследований здорового населения, начиная от школьников и призывников в армию и кончая населением зрелого возраста — в порядке диспансеризации. Конечно, врачи и здесь ставят перед собой гуманные цели: своевременно выявить начало еще скрытой болезни, чтобы вовремя и с большим успехом начать лечение. В результате тысячи, сотни тысяч здоровых людей проходят через рентгеновские кабинеты. В идеале врачи стремятся такие обследования проводить ежегодно. В результате общая облученность населения повышается. О каких же дозах облучения идет речь при медицинских обследованиях?

Научный комитет по изучению действия атомной радиации при ООН тщательно изучил этот вопрос, и полученные выводы многих удивили. Оказалось, что на сегодняшний день наибольшую дозу облучения население получает именно от медицинских обследований. Подсчитав общую среднюю дозу облучения для всего населения развитых стран от различных источников радиации, комитет обнаружил, что облученность от силовых реакторов даже к 2000 г. вряд ли превысит 2—4% от естественной радиации, от радиоактивных осадков 3—6%, а от медицинских облучений население ежегодно получает дозы, достигающие 20% естественного фона.

Каждое диагностическое «просвечивание» дает на исследуемый орган облучение, начиная от дозы, равной годовой дозе от естественного фона (примерно 0,4 рад), до дозы, превышающей его в 50 раз (до 5 рад). Особый интерес представляют дозы, получаемые при диагностических

просвечиваниях критических тканями, такими, как гонады (повышение вероятности генетического повреждения потомства) или кровеносные ткани, такие, как костный мозг.

В среднем медицинские диагностические «просвечивания» рентгеном для населения развитых стран (Англия, Япония, СССР, США, Швеция и др.) составляют среднюю годовую дозу, равную одной пятой части естественного фона радиации.

Это, конечно, в среднем очень небольшие дозы, сопоставимые с естественным фоном, и вряд ли здесь уместно говорить о какой-либо опасности. Тем не менее современная техника позволяет уменьшить дозовые нагрузки при профилактических осмотрах, и это должно быть использовано.

Старая медицинская заповедь «не повреди» должна строго соблюдаться при всяком рентгеновском обследовании, особенно при массовых обследованиях людей в молодом возрасте. Значительного снижения дозы облучения при рентгеновских обследованиях можно достигнуть, совершенствуя аппаратуру, защиту, повышая чувствительность регистрирующих устройств и сокращая время облучения.

Где еще в нашей повседневной жизни мы сталкиваемся с повышенной ионизирующей радиацией?

Одно время (примерно к середине нашего столетия) широкое распространение получили часы со светящимся циферблатом. Люминесцирующая масса, наносимая на циферблат, включала в свой состав соли радия. Излучения радия возбуждали люминесцирующую краску, и она светилась в темноте голубоватым светом. Но γ -излучение радия с энергией 0,18 МэВ проникало за пределы часов и облучало окружающее пространство. Обычные ручные светящиеся часы содержали от 0,015 до 4,5 мКи радия. Расчет показал, что наибольшую дозу радиации (около 2—4 рад) за год получают мышечные ткани руки. Мышечная ткань сравнительно радиоустойчива, и это обстоятельство не тревожило радиобиологов. Но светящиеся часы, находящиеся на руке очень много времени, расположены на уровне голеней и, следовательно, могут вызывать значительное облучение этих радиочувствительных клеток. Именно поэтому были предприняты специальные расчеты дозы, приходящейся на эти ткани за год.

Исходя из расчета, что часы находятся на руке 16 ч в сутки, была вычислена возможная доза облучения годов. Она оказалась лежащей в пределах от 1 до 60 мрад/год. Значительно большую дозу можно получить от больших карманных светящихся часов, особенно если их носить в кармане брюк или нижнем кармане жилета. При этом доза облучения может возрасти до 100 мрад. Обследование продавцов, стоящих за прилавком со множеством светящихся часов, показало, что доза облучения была около 70 мрад. Подобные дозы, удваивающие естественный радиоактивный фон, увеличивают вероятность появления наследственных повреждений в потомстве. Вот почему Международное агентство по мирному использованию атомной энергии в 1967 г. рекомендовало заменить радиий в светящихся массах такими радионуклидами, как тритий (H^3) или прометий-147 (Pm^{147}), обладающими мягким β -излучением, полностью поглощаемым часовой оболочкой.

Нельзя не упомянуть о множестве светящихся приборов в кабинах самолетов, пультах управления и др. Конечно, уровни радиации очень различны в зависимости от количества приборов, их расположения и удаленности от работающего, что постоянно должны учитывать органы санитарного надзора.

Мы не будем разбирать вопросы профессиональной вредности. Речь пойдет о телевизоре, который используется в повседневной жизни любого гражданина. Телевизоры распространены в современном обществе столь широко, что вопрос о дозе радиации, поступающей от телевизора, был тщательно исследован. Интенсивность слабого вторичного излучения экрана, бомбардируемого электронным лучком, зависит от напряжения, под которым работает данная система телевизора. Как правило, черно-белые телевизоры, работающие при напряжении в 15 кВ, дают на поверхности экрана дозы 0,5—1 мрад/ч. Однако это мягкое излучение поглощается стеклянными или пластиковым покрытием трубки, и уже на расстоянии 5 см от экранной радиация практически не обнаруживается.

Иначе обстоит дело с цветными телевизорами. Работающая на значительно большем напряжении, они дают от 0,5 до 150 мрад/ч вблизи экрана (на расстоянии 5 см). Предположим, вы смотрите цветной телевизор три—четыре дня в неделю по три часа в день. В год получим от 1 до 80 рад

(не миллирад, а рад!). Эта цифра уже значительно превосходит естественный фон облучения. В действительности получаемые людьми дозы значительно меньше. Чем больше расстояние от человека до телевизора, тем меньше доза облучения — она падает пропорционально квадрату расстояния.

Радиация от телевизоров не должна нас волновать. Системы телевизоров все время совершенствуются и внешняя радиация их снижается.

Еще один источник слабых излучений в нашей повседневной жизни — это изделия из цветной керамики и майолики. Для создания характерного цвета глазури, придающего художественную ценность керамической посуде, вазам и блюдам из майолики, издревле используются соединения урана, образующие жаропрочные краски. Уран — долгоживущий естественный радионуклид — всегда содержит дочерние продукты распада, дающие достаточно жесткое β -излучение, легко обнаруживаемое современными счетчиками вблизи поверхности керамических изделий. Интенсивность излучения быстро падает с расстоянием, и если в квартире на полках стоят керамические кувшины, майоликовые блюда или статуэтки, то, любясь ими на расстоянии 1—2 м, человек получает исчезающе малую дозу облучения. Несколькими иначе обстоит дело с довольно распространенными керамическими кофейными и чайными сервизами. Чашку держат в руках, прикасаются к ней губами. Правда, такие контакты кратковременны, и значительного облучения не происходит. Были проведены соответствующие расчеты для наиболее распространенных керамических чашек для кофе. Если в течение дня 90 мин непосредственно соприкасаться с керамической посудой, то за год от β -радиации руки могут получить дозу облучения от 2 до 10 рад. Эта доза в 100 раз превосходит естественный фон облучения.

Интересная проблема возникла в ФРГ и США в связи с широким применением для изготовления искусственных фарфоровых зубов особой запатентованной массы, в состав которой входили соединения урана и церия. Эти добавки вызывали слабую флуоресценцию фарфоровых зубов. Зубные протезы являлись слабыми источниками радиации. Но так как они постоянно находятся во рту, то десны получали опутимую дозу. Был издан специальный закон, регламентирующий содержание урана в фарфоре