

А.М.КУЗИН

# НЕВИДИМЫЕ ЛУЧИ ВОКРУГ НАС



ИЗДАТЕЛЬСТВО НАУКА

**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

© Издательство «Наука», 1980 г.

К  $\frac{21005-005}{054 (02)-80}$  28-79 НП 2001040000

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 каждую секунду можно обнаружить потоки излучений — радиацию. Огромные массы вещества в недрах звезд, вступая 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 во 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 сознавать их разнообразие, понимать отрывочность и неполноту наших представлений об окружающем и проникающем нас в биосфере мире излучений, об их основном с трудом постижимом уму, привыкшему к иным картинам мироздания, значении в окружающих нас процессах... 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...»<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Вернадский В. И. Биосфера. Л., 1926.

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, высказывавшего 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 радиотелескопы, сосредоточат внимание на многометровых радиоволнах. Специалистов радио и телевидения привлекут метровые и дециметровые радиоволны. Для радарной техники наиболее интересен сантиметровый и миллиметровый диапазон. Химиков, 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 уделят 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. Благоприятное 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	10		$10^9$	
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 оранжевый желтый зеленый синий фиолетовый	} $10^{-4}$	700 нм 620 нм 580 нм 530 нм 470 нм 420 нм	} $10^{16}$	1—3 эВ
Ближний ультрафиолет		300 нм		3—12 эВ
Далекий ультрафиолет		200 нм		
Длинноволновые рентге- новские лучи	$10^{-7}$	$10^3 \text{ \AA}$	$10^{18}$	41 эВ
Коротковолновые рентге- новские лучи	$10^{-8}$ $10^{-9}$	1 $\text{\AA}$	$10^{19}$	12 кэВ —0,12 МэВ
$\gamma$ -излучение	$10^{-10}$	$10^{-2} \text{ \AA}$		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 растительностью.

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  $\alpha$ - и  $\beta$ -лучи радионуклидов, потоки электронов и протонов, генерируемые современными ускорителями, нейтроны атомных реакторов или  $\pi$ -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  $\gamma$ -лучи, их часто объединяют в группу ионизирующей радиации.

Для биолога, исследующего последствия действия ионизирующей радиации на живые организмы, их сообщества 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 — рад<sup>1</sup>.

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.

<sup>1</sup> 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  $10^6$  рад=1 Мрад=10<sup>4</sup> Гр. Энергию излучений обычно измеряют в электронвольтах (эВ); широко используют следующие единицы: 1 кэВ=10<sup>3</sup>эВ и 1 МэВ=10<sup>6</sup>эВ.

## Глава 1

### 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 помещении, 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 свою 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 нуклидов<sup>1</sup>. Внешнее облучение складывается 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 высокоэнергетичных 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 высокоэнергетичных 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

---

<sup>1</sup> Как известно, радиоактивность обусловлена процессами, происходящими в ядре атомов. Радиоактивные элементы могут находиться в виде атомов, ионов, входить 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 высокоэнергетичных 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, низкоэнергетичных 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.

Высокоэнергетичные (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,  $\pi$ -мезонов (пионов),  $\mu$ -мезонов (мионов)<sup>2</sup>, образующих вторичное космическое излучение. Так как эти частицы тоже обладают энергией в десятки МэВ, то, сталкиваясь с другими ядрами,

---

<sup>2</sup> 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 10 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 раз<sup>3</sup>.

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. Определение плотности органического вещества на разных высотах показало, что именно на высоте 15—20 км она достигает наибольшей величины — до 10 частиц (аэронов) на 1 см<sup>3</sup>. На этой высоте аэроны будут находиться 3—4 месяца, медленно передвигаясь в области средних широт. Принимая во внимание высокую мощность космических лучей, доза, полу-

---

<sup>3</sup> 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, скомпенсирует 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 переобления 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 паходится 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		
		$\alpha$ -	$\beta$ -	$\gamma$ -
Уран $U^{238}$	$4,51 \cdot 10^9$ года	4,15—4,20	—	—
Уран $U^{234}$	$2,47 \cdot 10^5$ 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  $C^{14}$ . За счет ядерных столкновений образуются радионуклиды  $H^3$  (тригий),  $Be^7$  (радиоактивный изотоп бериллия),  $Na^{22}$  и  $Na^{24}$  (радиоактивные изотопы натрия). С точки зрения внешних облучателей  $C^{14}$  и  $H^3$  не принимаются во внимание ввиду очень мягкого излучения этих изотопов. Радиоактивные бериллий и натрий дают высокоэнергетичные и, следовательно, глубоко проникающие  $\beta$ - и  $\gamma$ -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 ( $K^{40}$ ), 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  $\beta$ -излучателями. Природный радий, например, излучает  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -лучи, так как всегда содержит некоторое количество таких продуктов распада (дочерние элементы).

Таблица 4

Концентрация радионуклидов в земных породах

Тип пород	Концентрация, Ки <sup>4</sup>			Поглощенная доза на вы- соте 1 м от поверхности, мкрад/ч
	K <sup>40</sup>	U <sup>238</sup>	Th <sup>232</sup>	
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
дюрит	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	10	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 естественном радионуклиде — тории (Th<sup>232</sup>), 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 Pb<sup>208</sup>.

Наконец, третий, самый распространенный естественный радионуклид — это радиоактивный <sup>40</sup>K 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).

<sup>4</sup> Единица измерения активности радионуклидов получила название Кюри (Ки). Для малых активностей используют Пикокюри (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 подвержена значительным колебаниям, 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 Тамил 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 моноцититовыми песками. На прибрежных моноцититовых песках расположены три города: Гуарапары, Миайпе и Кумуруксатиба.

В Гуарапары проживает около 12 тыс. жителей. Это приятное место для летнего отдыха и купания в океане. Каждый год летом около 30 тыс. отпускников приезжают сюда отдыхать. Мощность облучения, измеренная на улицах Гуарапары, колебалась от 100 до 200 мкрад/ч, а в отдельных местах прибрежного пляжа (моноцититовые 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 Гуарапары), в котором проживает около 300 человек. В городе Кумуруксатиба мощность облучения несколько ниже — в среднем около 50 мкрад/ч.

Другой район в Бразилии с повышенной радиоактивностью расположен в штате Минас-Жеранс, на вулканических породах, где находятся города Покос-де-Калдас и Аракса-Тапира. Наибольшая радиоактивность установлена недалеко от города Покос-де-Калдас. Мощность дозы здесь доходила до 2800 мкрад/ч. В области города 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 мрад/год в деревянных домах снижалась до 57, в кирпичных поднималась до 112, а в бетонных достигала 172 мрад/год.

Обратная зависимость наблюдалась в колебаниях облучения в районах с повышенной естественной радиоактивностью. Например, исследования, проведенные в районе Керала (Индия), показали, что в легких деревянных, бамбуковых и глиняных хижинах облучение было высоким (в некоторых местностях достигало 2800 мрад/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 мрад/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 мрад/год) и земной радиации (32 мрад/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  $\beta$ - и  $\gamma$ -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.  $\beta$ -частиц ежеминутно. 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 уголекислоту:  $C^{14} + O_2 \rightarrow C^{14}O_2$ . Последняя, равномерно перемешиваясь с обычной уголекислотой (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 углерод, 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 окружающем нас мире остается постоянной.

Установлено, что скорость образования  $C^{14}$  в верхних слоях атмосферы составляет 2,28 атома в  $1\text{ см}^3$  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 внутриклеточном 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 сыворотке 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 рассчитать, что  $K^{40}$  усилит общую мощность облучения на 19 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 получают 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 кишечнорастворимых до 9—19 у рыб. Соответственно будет варьировать и мощность облучения этих животных от аккумулированного 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, кипарисовник 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 немного урана ( $1,4 \cdot 10^{-3}$  пКи в день) поглощается за счет вдыхания пыли окружающего воздуха, которая всегда содержит небольшие количества этого нуклида (около  $7 \cdot 10^{-5}$  пКи/м<sup>3</sup>). 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  $2 \cdot 10^{-15}$  до  $3 \cdot 10^{-14}$  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  $\text{Po}^{210}$  и  $\text{Pb}^{210}$  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,  $\text{Po}^{210}$  и  $\text{Pb}^{210}$  концентрируются в мышцах морских организмов, где их содержание может доходить 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  $\text{Pb}^{210}$  и  $\text{Po}^{210}$ . 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  $\text{Po}^{210}$  и  $\text{Pb}^{210}$  в организм человека с пищей в течение дня \*

Страны	Дневное поступление, пКи/день		Страны	Дневное поступление, пКи/день	
	$\text{Pb}^{210}$	$\text{Po}^{210}$		$\text{Pb}^{210}$	$\text{Po}^{210}$
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  $Po^{210}$  и  $Pb^{210}$  в костях и мягких тканях.

Основная поглощенная доза обусловлена высокоэнергетичными  $\alpha$ -частицами  $Po^{210}$ . Для костной ткани она составляет 3 мрад/год для некурящих и около 4 мрад/год для курильщиков. В северных районах облученность от  $Po^{210}$  костной ткани достигает 10 мрад/год и для мягких тканей 5—7 мрад/год. Доля  $\beta$ -излучения  $Pb^{210}$  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, создающему определенный 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 бронхиальные эпителиальные клетки, непосредственно соприкасающиеся с радоном при дыхании и постоянно сорбирующие крупные частицы радиоактивного аэрозоля (дочерние продукты). Мелкие частицы (кюстеры) 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:				
космические лучи	28	28	28	28
земное облучение	32	32	32	32
Внутреннее облучение:				
калий-40	15	17	15	27
радон-222 (с дочерними нуклидами)	0,2	30	0,3	0,3
другие нуклиды	2	5,5	9,1	4
Всего	78	110	84	92

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.

## Глава 2

### 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 островке Тихого океана — Бикини, на тысячи 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. Мощность 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 общую и локальную повышенную облучаемость живых организмов. Человечество впервые столкнулось с таким явлением. Ничего не было известно ни о размерах растущего 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 Берtrandом 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 обоим сторонам!...»<sup>1</sup>

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.

Я 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

---

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

десятой сессии пункт, озаглавленный «Действие атомной радиации». 3 декабря 1955 г. была принята резолюция об учреждении Научного комитета ООН по действию атомной радиации (НКАДАР) 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 НКАДАР 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 упоминать те из них, у которых время полураспада меньше пяти суток (табл. 8).

В момент взрыва образуется мощный поток высокоэнергетичных 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 выбрасываются с грибообразным облаком в верхние слои атмосферы — 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 осаждение аэрозолей происходит несколько медленнее. Исследования, проведенные с использованием аэростатных зондов и авиации, позволили определить скорости миграции 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 основная 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 зависели 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 о-ва Бикини, когда там была взорвана американцами атомно-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  $\text{Sr}^{90}$  в почве различных стран пока-

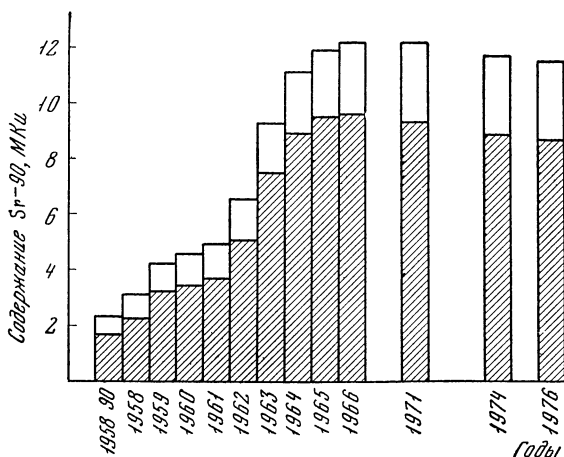
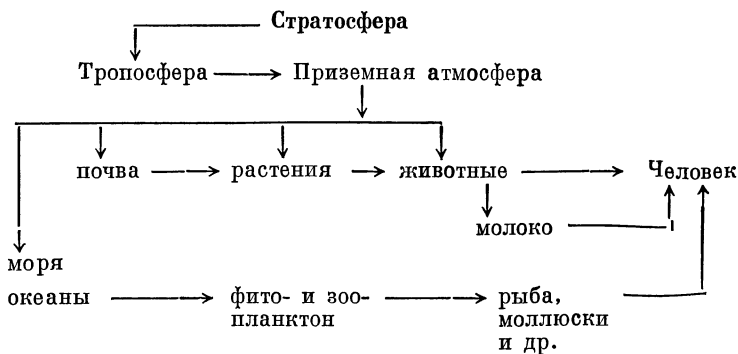


Рис. 1. Отложения  $\text{Sr}^{90}$  на Земле

Заштрихованная часть — северное полушарие, незаштрихованная — 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, выпадая 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  $\text{Cs}^{137}$ ,  $\text{Sr}^{90}$  и др. Каждый из них имеет свои

особенности. По химическим свойствам  $\text{Sr}^{90}$  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 молодняка 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  $\text{Sr}^{90}$ . Из молока радиоактивный стронций поступает в детский организм, где вслед за кальцием откладывается в быстро растущем скелете. Поэтому дети подвергались большому 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 листовой поверхностью. В годы, когда его выпадение совпадало 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 устлана сплошным покровом лишайника и мха. Выпадающий цезий-137 почти целиком поглощался этой растительностью. У оленей, питавшихся 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  $\text{Cs}^{137}$  в организме человека в 1964 г. в зависимости от продуктов его питания в разных странах.

Таблица 9

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

Страна, место жительства	Содержание цезия-137, пКи
Северная Америка	
Аляска	3400—9100
Нью-Йорк	130—480
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 фьорды	2000

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

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

видной железой, синтезирующей из него гормон — тироксин. Иод создает в ней повышенный очаг радиации. Вотдельные 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 отражал 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, произведенные 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  $\text{Sr}^{90}$  в продуктах в различные годы. Близкие данные были получены и для содержания  $\text{Cs}^{137}$  в молоке, фруктах, овощах, мясе. После 1965 г. стало заметно снижаться содержание  $\text{Sr}^{90}$  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-

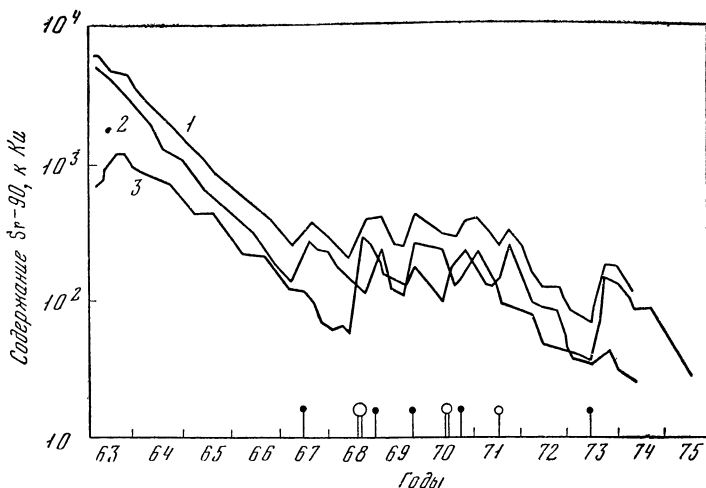


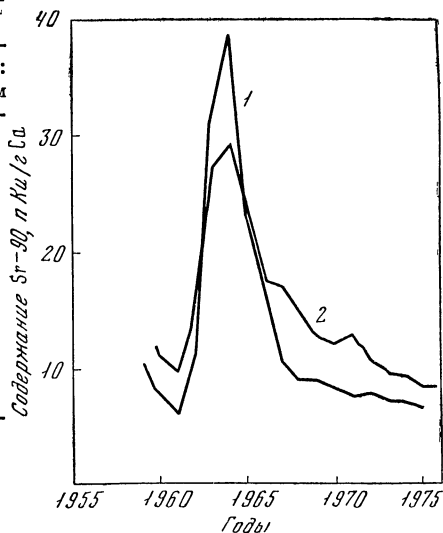
Рис. 2. Содержание  $\text{Sr}^{90}$  в стратосфере за 1963—1975 гг.

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  $\text{Sr}^{90}$  в продуктах питания

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



ловий 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

Таблица 10

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

Источник радиации	Северное полушарие			Южное полушарие			Для всего населения		
	Гонады	Костный мозг и клетки	Легкие	Гонады	Костный мозг и клетки	Легкие	Гонады	Костный мозг и клетки	Легкие
Внешнее облучение от короткоживущих радионуклидов	48	48	48	44	44	44	30	30	30
Cs <sup>137</sup>	62	62	62	48	48	48	38	38	38
Внутреннее облучение									
H <sup>3</sup>	2	2	2	0,2	0,2	0,2	2	2	2
C <sup>14</sup>	7	32—29	9	7	32—29	9	7	32—29	9
Sr <sup>90</sup>	—	84—120	—	—	24—33	—	—	52—71	—
Ru <sup>106</sup>	—	—	44	—	—	10	—	—	24
Cs <sup>137</sup>	27	27	27	8	8	8	17	17	17
Ce <sup>144</sup>	—	—	65	—	—	15	—	—	38
Другие радионуклиды	1	1	3	0,3	0,2	0,6	0,7	1,6	1,6
Всего	150	260—290	260	45	93—100	72	94	190	160

короткого периода полураспада, мощности и периода поступления радионуклидов в атмосферу. Все эти обстоятельства побудили Научный комитет по действию атомной радиации ООН, занимавшийся подсчетами, определить средние суммарные дозы, получаемые человеком и его критическими тканями<sup>2</sup> за весь период с начала первых испытаний и до последнего времени. Полученные величины представлены в табл. 10.

Из приведенных цифр видно, что в среднем человечество 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.

---

<sup>2</sup> Критическими тканями в радиобиологии называют радиочувствительные ткани, ответственные за радиационные повреждения всего организма,

## Глава 3

### **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 экономически 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. давали 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) широкую 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 настороженное 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, сообщающий 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 газообразные радиоактивные изотопы криптона, ксенона, аргона, загрязняющие мировую атмосферу. Указывается на образование радиоактивного изотопа водорода — трития, проникающего в сточные воды, и радиоактивного летучего изотопа иода  $I^{131}$ , 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-мегатонной 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, губительных 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.

Правы 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 яснее его себе представить, вспомним, что производство электроэнергии за счет ядерного деления складывается 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 отходов 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 радионуклидов. 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

ощутимого 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 добывания 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, выделяющими при своем распаде газообразный радон. Обследование, проведенное в 1971 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. Обследование воздуха в этих зданиях, проведенное в 1971 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. Измерения, проведенные в 1967 г., показали нормальное их содержание в водах этой реки.

Правильная технология замкнутого цикла, неглубокое захоронение отвалов 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 получение 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 покроют 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-

ловческой 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, тритий и элементы с наведенной активностью —  $\text{Ag}^{41}$ ,  $\text{C}^{14}$ ,  $\text{N}^{16}$ ,  $\text{S}^{35}$ .

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  $\text{CO}_2$  идет ядерная реакция внетопливных элементов  $\text{O}^{16} \xrightarrow{(n,p)} \text{N}^{16}$  с образованием короткоживущего радиоактивного азота (период полураспада 7,3 с) с жестким  $\gamma$ -излучением. Оно вносит значительный вклад в  $\gamma$ -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 трудностей в фиксации и относительно 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.

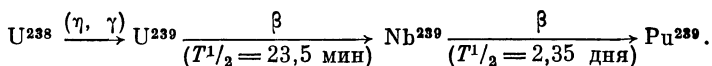
При делении урана и при радиоактивном распаде продуктов деления в работающем реакторе атомных электростанций постоянно образуется ряд легколетучих радиоактивных изотопов иода:  $J^{131}$  (п. п. 8 дней),  $J^{132}$  (2,3 ч),  $J^{134}$  (53 мин),  $J^{135}$  (6,7 ч) и  $J^{129}$  ( $1,6 \cdot 10^7$  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 иода, 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 иода-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 ( $\text{Pu}^{239}$ ) — 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 растворителями. 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 окружающее пространство и, пройдя ряд поглотителей 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  $\text{J}^{131}$  распадается, однако долгоживущий изотоп  $\text{J}^{129}$ , 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,

образуя высокорadioактивные отходы производства. К концу нашего столетия вследствие развития атомной энергетики их количество достигнет весьма внушительного объема — около  $10^4$  м<sup>3</sup>.

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), иллий-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 предусмотреть 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 1971 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 расплавы, 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 спекается с окружающей силикатной породой. Через десятилетия порода остынет, 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 поступают 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 практиковавшиеся 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 меньшей, 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, попадая 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 обыкновенного водорода, будет легко образовывать воду, содержащую тритий ( $\text{H}\text{H}^3\text{O}$ ). 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 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 большие количества 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 слагаться из трех величин: 27 МКи естественного проис-

хождения, 210 МКи нераспавшихся остатков трития от взрывов и 720 МКи от атомной промышленности. Всего 957 МКи. Это почти в два раза меньше, чем 1700 МКи 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 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 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  $4 \cdot 10^3$  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 МКи. 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 нерадиоактивные 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). Испуская сравнительно мягкие  $\beta$ - и  $\gamma$ -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 мрад на весь организм. К 2000 г. эта цифра возрастет до 0,1 мрад в год, а на поверхность тела — до 20 мрад.

Оценка облученности от третьего радиоактивного легколетучего нуклида — иода — значительно сложнее.

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

Таблица 11

Коллективная средняя доза, получаемая на различных стадиях производства атомной энергии

Стадия производства	Группа населения	Средняя коллективная доза, человеко-рад (МэВ) в год
Добывание руды и изготовление ядерного горючего	Рабочие на производстве	0,2—0,3
Работа атомной электростанции	Рабочие на производстве	1,0
	Население, живущее в районе станции	0,2—0,4
	Все население	Ничтожно мало
Регенерирующие заводы	Рабочие на производстве	1,2
	Население, живущее в районе завода	0,1—0,6
	Все население	1,1—3,3
Исследовательские работы	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, сколь 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 редющими 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 подсчеты велись 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 0,1 рад), до дозы, превышающей его в 50 раз (до 5 рад). Особый интерес представляют дозы, получаемые при диагностических

просвечиваниях критическими тканями, такими, как гонады (повышение вероятности генетического повреждения потомства) или кроветворные 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 светила в темноте голубоватым светом. Но  $\gamma$ -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 гонад и, следовательно, могут вызвать 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 гонад. 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 радий в светящихся массах такими радионуклидами, как тритий ( $\text{H}^3$ ) или протетий-147 ( $\text{Pm}^{147}$ ), обладающими мягким  $\beta$ -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 пучком, 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 стеклянным или пластиковым покрытием трубки, и уже на расстоянии 5 см от экрана радиация практически не обнаруживается.

Иначе обстоит дело с цветными телевизорами. Работая 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  $\beta$ -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. Несколько 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 соприкоснуться с керамической посудой, то за год от  $\beta$ -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 ощутимую дозу. Был издан специальный закон, регламентирующий содержание урана в фарфоре

искусственных зубов (не выше 0,1%). Даже при таком содержании ротовой эпителий будет получать в год дозу около 3 рад, т. е. дозу в 30 раз большую, чем от естественного фона.

Некоторые сорта оптических стекол изготавливают с добавлением в их состав тория (18—30%). Изготовление линз для очков из такого стекла приводило к слабому, но постоянно действующему облучению глаз. Сейчас содержание тория в стеклах для очков регламентируется законом.

Таковы наши встречи с невидимыми лучами в повседневной жизни.

## ДЕЙСТВИЕ РАДИАЦИИ БОЛЬШИХ ЭНЕРГИЙ НА ЖИВЫЕ ОРГАНИЗМЫ

В наш атомный век, когда возникла и еще не снята угроза ядерной войны, век бурного развития атомной энергетики и мирного использования атомной энергии, проблема действия ионизирующей радиации на живые организмы привлекает пристальное внимание.

Поражающее действие ионизирующей радиации человечество постигло дорогой ценой. Первое грозное предупреждение было получено в самом начале нашего столетия. Замечательное открытие В. К. Рентгена, продемонстрировавшего возможность видеть скелет и внутренние органы нашего организма при его «просвечивании» рентгеновскими лучами, было сразу же взято на вооружение медиками.

Сотни врачей начали работать с лучами Рентгена без всяких предосторожностей и защиты. Просвечивая своих пациентов, они ежедневно сами получали определенную дозу облучения. Скрытый вред, наносимый этими лучами, накапливался изо дня в день. Спустя 10—15 лет после такой практики началось массовое поражение врачей-рентгенологов злокачественными опухолями. Почти все энтузиасты этого нового метода диагностики погибли в течение нескольких лет. Обелиск, воздвигнутый в их память в Гамбурге, напоминает нам о грозном биологическом действии ионизирующей радиации.

Пример был устрашающим, однако установить, какие дозы (а они, вероятно, были весьма значительны) получили погибшие рентгенологи, было невозможно. Познание причины опасности — первый шаг к ее устранению. В рентгенологические кабинеты были введены свинцовые экраны. На пути коварных лучей ставили стекло, содержащее свинец, который задерживал их распространение. Было максимально сокращено время диагностических про-

цедур, улучшена конструкция аппаратов. Дозы облучения, получаемые врачами-рентгенологами, резко уменьшились.

Статистическое обследование, проведенное в Англии в 60-х годах, не смогло установить повышенного процента смертности среди врачей-радиологов по сравнению с врачами всех других специальностей.

Второе событие, говорящее об огромной разрушительной силе ядерной радиации, потрясшее умы и чувства всего человечества, — это ничем не оправданное атомное нападение на мирные города Хиросиму и Нагасаки, осуществленное Соединенными Штатами Америки на исходе второй мировой войны. Из 350 тыс. пострадавших от атомной бомбы в Хиросиме 70 тыс. стали жертвами ядерной радиации. И сейчас, более 30 лет спустя, в этом городе продолжают погибать люди от отдаленных последствий облучения.

Но только ли гибель и разрушение несут эти невидимые лучи всему живому? Несколько миллиардов лет тому назад уровни ионизирующей радиации на Земле были намного выше, чем в наше время. Именно в этих условиях на ней зародились простейшие формы жизни.

Какую роль играла ионизирующая радиация в пребиотический период существования Земли? Не способствовала ли она процессам возникновения жизни? На этот вопрос многие исследователи, работающие над проблемами возникновения жизни, дают положительный ответ.

А какова роль невидимых лучей в процессах эволюции жизни? Разрушали жизнь, препятствовали ее развитию, несли гибель и увядание живому или способствовали преобразованию живого, принимали участие в развитии, эволюции жизни на нашей планете?

Как действуют эти излучения на жизненные процессы — угнетают или стимулируют? Есть ли основание называть их лучами смерти или повсеместное распространение этого излучения в биосфере не случайно и несет что-то важное и нужное для явления жизни?

Ответить на эти вопросы очень важно, чтобы правильно определить отношение к окружающей радиации, точно знать, чего надо опасаться, с какой стороны грозит опасность, где надо проявлять бдительность и настороженность, а в каких случаях опасения и страхи неуместны и использование радиации несет огромные блага человечеству.

Прежде всего напомним, что для большинства хорошо известных нам физических факторов, влияющих на мир живых существ, ответ всегда будет не альтернативный, не «или-или», а диалектический — «и да и нет».

Что значит для жизни тепло? Конечно, тепло солнечных недр, измеряемое миллионами градусов, тепло горения и даже тепло кипящей воды несут безусловную смерть всем живым организмам. Но в то же время без тепла солнечных лучей, без тепла окружающей среды в диапазоне от 0 до 60° С жизнь невозможна.

Электричество разряда молнии или высоковольтных линий разрушает, несет гибель живому. В то же время неизвестны клетки, ткани, организмы, в которых отсутствовали бы электрические потенциалы, биотоки, электрические импульсы, играющие существенную роль в организации нервной раздражимости, проницаемости биомембран и многих других жизненных процессов.

Неужели радиация высоких энергий в ее взаимодействии с миром живых организмов является исключительно односторонним фактором? Несет только разрушение и гибель живому? Или и здесь проявляется общий закон количества воздействия? Не зависит ли окончательный эффект от дозы поглощенной энергии? В больших дозах это, несомненно, лучи смерти. А каково их действие в малых дозах?

Проблема малых доз ионизирующей радиации, в окружении которых мы живем и уровни которых, как мы видели, колеблются в широких пределах, приобретает исключительный интерес в наш век развития атомной промышленности, освоения космоса, все более широкого использования ионизирующей радиации в промышленности, сельском хозяйстве, медицине. Она настолько важна, что мы специально рассмотрим ее в следующих главах. А сейчас ближе познакомимся с тем, какие опасности несут живому достаточно большие дозы ионизирующей радиации. Этот вопрос стал особенно острым в наши дни, когда американское правительство пытается принять на вооружение нейтронные бомбы, поражающие все живое именно за счет больших доз ионизирующих излучений.

Рассмотрим некоторые наиболее важные особенности воздействия радиации на живой организм. Существующие ныне формы жизни, включая млекопитающих и человека, возникли и эволюционно сложились на уровне

постоянного фона радиации. У живых организмов не выработались специальные органы для распознавания этого постоянно действующего фактора. Мы не ощущаем действия ядерной радиации — не видим, не слышим, не чувствуем ее. Человек может получить смертельную дозу облучения и не знать об этом. Некоторое чувство дискомфорта и легкие признаки недомогания в первые часы быстро проходят, и несколько дней человек ощущает себя здоровым. Но процессы, возникшие во время облучения, развиваются, и через различное время, в зависимости от дозы облучения, начинается лучевая болезнь, угрожающая жизни. Это первое коварное свойство ядерной радиации — действие исподтишка. При достаточно больших дозах смерть может наступить через 7, 13, 30 дней после облучения.

Если доза облучения была ниже смертельной, то лучевая болезнь проходит, наступает выздоровление. Но скрытые последствия облучения остаются: сокращаются сроки жизни, увеличивается вероятность заболевания раком, катарактой, снижается сопротивляемость инфекционным заболеваниям. Способность вызывать отдаленные последствия — второе коварное свойство ядерной радиации.

Одно из наиболее опасных свойств ядерной радиации заключается в ее способности глубоко проникать в облучаемую ткань:  $\gamma$ -лучи радиоактивных элементов, нейтроны, протоны больших энергий легко пронизывают тело животного, его внутренние органы. При общем облучении поражается не только вся поверхность тела, но одновременно и печень, кишечник, костная ткань с заключенным в ней костным мозгом, центральная нервная система, все ткани и жидкости организма. Поэтому общее облучение гораздо опаснее локального, когда облучают часть организма, какой-то его орган.

Еще одно коварное свойство ионизирующей радиации — это суммарное, кумулятивное действие на организм. Поясним кумулятивное действие ядерной радиации на конкретном примере. Доза в 800 рад смертельна для многих животных, например для крыс. Если этих животных облучить в дозе 200 рад, то появляется лишь легкое, быстро проходящее недомогание. Если спустя некоторое время их снова облучить в такой же дозе, недомогание будет более значительным. Облучение в третий, четвер-

тый раз в той же дозе может уже вызвать у ряда животных лучевую болезнь и гибель.

Каждая доза облучения оставляет глубокий след в организме, их действия суммируются. При достижении определенного предела (более высокого по сравнению с одноразовой дозой) проявляется суммарный эффект. Кумулятивное действие оказывается особенно сильным при попадании в организм радиоактивных веществ, отлагающихся в определенных тканях. Такие радиоактивные вещества, присутствуя в организме (в небольшом количестве) изо дня в день в течение длительного срока, облучают близлежащие клетки и ткани. Это так называемое инкорпорированное хроническое облучение. Под его влиянием происходит перерождение нормальных клеток в злокачественные, возникновение лейкемии.

В 1925 г. советские ученые Г. А. Надсон и Г. С. Филиппов впервые в мире обнаружили мутагенное действие ионизирующей радиации на низших организмах. В 1927 г. в США это открытие было подтверждено на насекомых, а в 1928 г. на растениях.

Известно, что гигантские молекулы ДНК хранят в своей структуре в закодированном виде всю информацию, нужную для развития организма данного вида. В процессе эволюции для сохранения вида в организме выработалась сложная система защиты этих макромолекул, обеспечивающая точное воспроизведение структуры ДНК при каждом делении клетки и надежную сохранность информации в молекулах ДНК. Но при облучении элементарные частицы ионизирующей радиации, глубоко проникая в организм, как бы бомбардируют молекулы ДНК. Они нарушают структуру ДНК, вызывают перестройку кода, в результате чего наступают изменения в потомстве, появляются новые признаки, исчезают или видоизменяются ранее существовавшие. Так как мутанты содержат видоизмененную ДНК, то новые их свойства наследуются, передаются потомству.

В сложном организме человека мутации, возникающие в клетках тела эмбриона (соматические мутации), могут приводить к аномалиям развития, рождению уродов. В клетках взрослого человека мутации повышают вероятность злокачественного перерождения. Возникновение мутаций в зародышевых клетках (гонадах) ведет к увеличению вероятности появления детей с наследственными

заболеваниями, умственной недостаточностью, различными уродствами развития, макро- и микроэнцефалией, болезнью Дауна и многими другими.

Одна из самых удивительных особенностей действия ядерной радиации заключается в том, что радиационный эффект возникает при ничтожных количествах энергии, поглощенных облучаемым организмом. Доза облучения в 1000 рад (крад) эквивалентна тепловой энергии, способной повысить температуру тела человека лишь на тысячную долю градуса. Когда мы выпиваем стакан горячего чая, то вводим в организм энергию в виде тепла, примерно равную 1 крад. А доза в 1 крад ионизирующих излучений смертельна для большинства млекопитающих, включая и человека.

Чем объясняется чувствительность живого организма к действию ионизирующей радиации? Почему, казалось бы, ничтожно малые количества энергии, привнесенные этим видом излучения, способны резко изменить ход жизненных процессов вплоть до гибели организма? Ответить на этот вопрос не легко. Он еще более усложняется, если принять во внимание, что различные организмы по-разному реагируют на одинаковые дозы ионизирующей радиации. Действительно, радиобиологи уже давно установили, что в мире живых существ радиочувствительность варьирует в широких пределах.

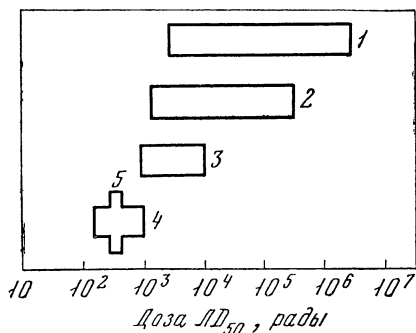
Что же известно в наше время о радиочувствительности организмов? Какие закономерности выявлены? Чтобы ответить на эти вопросы, надо прежде всего обратить внимание на то, что радиационные эффекты проявляются по-разному в зависимости от дозы. Как оценить радиочувствительность организма? По какому критерию?

Легко наблюдаемый критерий — гибель организма. Но и тут не все обстоит просто. Гибель не наступает тотчас после облучения (за исключением очень больших доз облучения). Следовательно, в эксперименте, наблюдая радиочувствительность, надо обусловить какой-то срок, когда процессы, вызванные облучением, приведут к видимому эффекту — гибели организма. Для млекопитающих обычен срок в 30 дней. Однако трудности в определении радиочувствительности этим не ограничиваются. Приведем обычный радиобиологический эксперимент.

Если популяцию мышей одинаковой линии облучить равномерно дозой в 400 рад, то за 30 дней наблюдения

Рис. 4. Радиочувствительность различных организмов

- 1 — микроорганизмы,  
2 — растения,  
3 — холоднокровные животные,  
4 — теплокровные животные,  
5 — человек



часть животных погибнет, часть выживет. Если увеличить дозу облучения до 600 рад, погибнет около 50% всей популяции, а 50% выживет. Доза в 700 рад будет смертельной уже для 70—80% популяции. При дозе в 1000 рад погибнут все животные. Этот пример ясно показывает, что радиационный эффект (в данном случае гибель) — явление вероятностное. Вероятность его наступления возрастает с увеличением дозы. Обычно для характеристики радиочувствительности пользуются той дозой, которая вызывает гибель половины популяции —  $LD_{50}$  (летальная доза для 50% популяции). Для млекопитающих пользуются величиной  $LD_{50/30}$ , т. е. летальной дозой, при которой гибнет 50% популяции за 30 дней.

Еще сложнее сравнивать по радиочувствительности представителей живого мира, стоящих на различных ступенях эволюции, имеющих неодинаковые циклы развития, специфику обмена и по-разному реагирующих на облучение.

На рис. 4 представлены пределы радиочувствительности различных классов живых организмов. Чем выше на эволюционной лестнице стоят организмы, чем сложнее их организация, тем они радиочувствительнее и тем более узкие диапазоны радиочувствительности у отдельных представителей данного класса.

Микроорганизмы — бактерии, одноклеточные водоросли, простейшие дрожжи и другие в целом наиболее радиоустойчивы, и их радиочувствительность может варьировать в очень широких пределах. Среди представителей этого класса встречаются организмы, выдерживающие миллионы рад и чувствительные уже к нескольким кило-

радам. Растения в целом несколько более радиочувствительны: диапазон их радиочувствительности почти на порядок сужен. При переходе в мир животных значительно повышается чувствительность, резко суживается и область различий. К самым радиочувствительным организмам принадлежат теплокровные животные, из них наиболее радиочувствителен человек.

Ниже показаны конкретные примеры радиочувствительности отдельных представителей микроорганизмов (табл. 12). Из приведенных цифр мы видим, как значительно разнится радиочувствительность одноклеточных организмов, сильно варьируя даже у различных штаммов одного и того же вида.

Таблица 12

Сравнительная радиочувствительность некоторых микроорганизмов

Микроорганизм	Доза, угнетающая размножение 63% популяции, крад
Микрококк радиодуранс	1000
Парамеции (инфузории)	300
Бациллы мезентерикус	150
Амеба	100
Туберкулезные бактерии	35
Дрожжи (разные расы)	15—47
Кишечная палочка (разные штаммы)	0,012—0,0024
Стафилококк золотистый	3
Эвглена	3
Хламидомонада	2,4
Псевдомона флюоресценс	1,1

Большой материал по радиочувствительности растений получен при облучении семян (табл. 13).

Как следует из таблиц, представители животного мира также сильно отличаются по радиочувствительности (табл. 14). Радиочувствительность у разных организмов отличается в сотни и тысячи раз. Различия в радиочувствительности касаются отдельных тканей, органов и систем в сложном организме. Наиболее радиочувствительна функция деления клеток.

При облучении животного в первую очередь страдают кроветворная ткань (костный мозг, лимфатические узлы, селезенка) и эпителий кишечника. Именно в этих тканях

Таблица 13

Радиочувствительность семян растений

Вид растения	Дозы, вызывающие 100%-ную гибель растений, крад	Вид растения	Дозы, вызывающие 100%-ную гибель растений, крад
Бобы конские	10	Люпин синий	50
Кукуруза Днепропетровская	15	Овес Победа	50
Пшеница	15	Клевер красный	100
Конопля Черкасская	25	Клецевина Ново-Кубанская	100
Гречиха Красноуфимская	25	Редис розовый	300
		Горчица белая	400

Таблица 14

Радиочувствительность различных представителей животного мира

Вид животного	ЛД <sub>50/30</sub> , рад	Вид животного	ЛД <sub>50/30</sub> , рад
Морская свинка	300	Лягушка	1000
Собака	400	Черепаша	1500
Свинья	430	Змея	8 000—
Обезьяна	500		20 000
Мышь	550	Моллюск	12 000
Крыса	600	Насекомое (взрослое)	10 000—
Кролик	800		100 000
Золотистый хомяк	900		

идет постоянное деление клеток, поставляющих смену недолговечным клеткам крови (в первую очередь лимфоцитов), и кишечного эпителия. Прекращение деления и размножения этих клеток приводит организм к гибели. Клетки мышечной ткани с невысоким митотическим индексом<sup>1</sup> относительно устойчивы и могут перенести значительную дозу облучения без утраты своих функций.

Особое положение занимает ткань мозга — центральной нервной системы (ЦНС) у млекопитающих. У взрос-

<sup>1</sup> Митотический индекс — процент клеток, находящихся в стадии деления.

лого организма клетки головного мозга не делятся, поэтому они не гибнут даже при смертельных дозах облучения. Долгое время ткань ЦНС рассматривалась как самая радиоустойчивая ткань высших организмов. Однако дальнейшие исследования показали, что функции ЦНС, регулирующие все процессы в организме млекопитающих, видоизменяются даже при небольших дозах облучения. У животных наблюдаются изменения в поведении, условных рефлексах, в регуляции обмена веществ ЦНС. Облучение ЦНС изменяет функции желез внутренней секреции, в тканях развиваются процессы, сходные с таковыми при непосредственном их облучении.

Что же известно в настоящее время о природе различной чувствительности организмов к действию ионизирующей радиации? Если говорить о сложном организме млекопитающих и судить о радиочувствительности по выживаемости, то решающее значение будет иметь облучение так называемых «критических органов», к которым в первую очередь принадлежит система кроветворения — костный мозг и лимфатическая ткань. Быстроделяющиеся клетки костного мозга очень радиочувствительны. После облучения даже в малых дозах падает содержание белых клеток крови (лейкоцитов, лимфоцитов).

Процессы восстановления зависят от количества сохранившихся при облучении так называемых стволовых клеток, дающих начало новому ряду делящихся. Стволовые клетки в состоянии покоя более устойчивы к действию радиации. Их количество и устойчивость к действию радиации неодинаковы у разных организмов, что существенно сказывается и на выживаемости организма в целом.

То же наблюдается и при облучении растений: в первую очередь страдают делящиеся клетки меристемной ткани, кончиков корней, верхушек роста. Однако в целом растении всегда имеются клетки, находящиеся в глубоком покое (например, осевые клетки корня). Они более устойчивы и, переходя к делению, обеспечивают выживание всего растения и его дальнейшее развитие. Из этих примеров видно, что различная радиоустойчивость сложных организмов в конечном итоге сводится к неодинаковой радиоустойчивости клеток. Таким образом, разгадку разной радиочувствительности в живом мире надо искать в причинах неодинаковой радиочувствительности клеток.

Для этого необходимо ближе познакомиться с действием радиации на клетку, с изменениями в ее структуре, с процессами, возникающими в клетке при ее облучении.

Многочисленные радиобиологические исследования указывают на важную роль в радиационном поражении клетки клеточного ядра, хромосом и прежде всего ДНК. Мутагенное действие радиации несомненно связано с нарушением информации, заложенной в молекулах ДНК. При микроскопическом исследовании митотического аппарата облученной клетки в процессе митоза можно наблюдать хромосомные поломки, образование мостов, фрагментов, различные хромосомные перестройки. Облучение клетки ведет к остановке синтеза ДНК, к задержке клеточного деления, а иногда и к полной остановке размножения, что тесно связано с нарушением функций ядерных структур.

Многочисленные эксперименты с микропучками ионизирующих излучений, позволяющими облучать участки или органеллы клетки, с несомненностью показали, что при непосредственном облучении ядра легко нарушается дальнейшее развитие, деление клетки. Чтобы вызвать аналогичные эффекты при облучении отдельных участков цитоплазмы требуются значительно большие дозы облучения. Все эти факты, как и сведения о роли ядра в жизнедеятельности клетки, привели радиобиологов к выводу, что радиационное поражение клеточного ядра, и в первую очередь ДНК, — главное решающее событие при облучении клетки.

Действительно, при облучении ДНК наблюдаются одиночные и двойные разрывы в двухцепочечной интерфазной ДНК, происходит радиационно-химическое окисление пиримидиновых колец и дезаминирование пуринов в нуклеотидах.

Но клеточное ядро не живет самостоятельно. Его нормальное функционирование возможно только в целой, неповрежденной клетке. Многочисленные связи между ядром и цитоплазмой определяют нормальное существование клетки в целом. Ионизирующая радиация в равной мере воздействует на все органеллы клетки, теснейшим образом связанные друг с другом обменом веществ и энергии.

В облученной клетке наряду с ДНК повреждаются и многочисленные мембраны, регулирующие обменные про-

цессы, продукцию энергии, активность многих связанных с мембранами ферментов. В присутствии кислорода свободные радикалы, которые образуются под влиянием ионизирующей радиации, переходят в перекиси, семихиноны, гидроксиды, повышающие окислительный потенциал клетки и вторично вызывающие повреждения макромолекул ядра.

Облученная клетка мобилизует все регуляторные механизмы для противодействия наступающим в ней изменениям, в первую очередь очень сложную систему ферментов, восстанавливающих ДНК, стоящих на страже сохранения генетической информации, заключенной в ДНК. Эти ферменты выпещляют поврежденные участки ДНК и застраивают образующиеся бреши в одной спирали ДНК по образу и подобию второй сохранившейся спирали. Клетка мобилизует резервные пути метаболизма, чтобы снабжать энергией процессы репарации ДНК, использует имеющиеся антиокислители, чтобы затормозить образование токсических перекисей и хинонов, направляет запасные липиды на восстановление структуры биомембран и нарушенного при облучении ионного баланса. Современная структурно-метаболическая теория действия ионизирующей радиации на клетку учитывает возникающие в клетке противоположные процессы, с одной стороны, усиливающие поражение генома, и с другой — направленные на возвращение клетки в нормальное состояние.

Вероятностный характер взаимодействия противоположно направленных процессов и будет определять вероятность того, выживет или погибнет данная клетка. Кривые, отражающие зависимость проявления радиационного эффекта от дозы, получаемые экспериментально, и являются типичными кривыми для вероятностных процессов.

Из всего сказанного следует, что, отвечая на вопрос о том, почему одни клетки устойчивы, а другие чувствительны к действию радиации, нельзя указать какую-либо одну причину, определяющую радиочувствительность клетки. В истории радиобиологии попытки свести радиочувствительность только к одному фактору, например к интенсивности деления, объему генома<sup>2</sup>, интенсивности

<sup>2</sup> Геном — обобщенное название генетического аппарата клетки, заключенного в ядре и состоящего из ДНК, связанных с ней белков, образующих хромосомы.

репарирующих процессов и т. д., неизменно терпели поражение и не соответствовали всему фактическому материалу.

Радиочувствительность — это многофакторная характеристика. Какие дозы радиации может выдержать и не погибнуть данная популяция клеток, зависит одновременно от целого ряда причин: от объема генетического материала, активности энергообеспечивающих систем, интенсивности метаболизма клетки, активности и соотношения ферментов, обеспечивающих репарацию клетки, от устойчивости биомембран и их репарируемости, от уровня антиоксидантов и, следовательно, интенсивности образования токсических продуктов окисления — липидных и хиноидных радиотоксинов, от наличия в клетке предшественников радиотоксинов.

Клетки отличаются друг от друга по любому из этих показателей, но отсутствие одного может быть компенсировано другим, и только в комплексе они формируют радиоустойчивость клетки к действию радиации. Ясно, что чем выше доза облучения, тем больше возникает в клетке первичных измененных центров — в ДНК, хроматине, биомембранах, энергопродуцирующих системах, в регулирующих системах клетки. Тем больше вероятность, что регулирующие, репарирующие, выводящие токсические продукты системы клетки не справятся с процессами, усиливающими первичное радиационное повреждение, разрушающими единую, строго отрегулированную живую систему клетки; тем больше вероятность ее гибели.

Еще сложнее обстоит дело, когда облучается сложный, многотканевый организм теплокровных животных и человека. Здесь к процессам, идущим на клеточном уровне, присоединяются процессы межклеточных взаимодействий, взаимосвязи тканей и органов. В облученном организме изменяются циркуляция веществ, функции эндокринной системы, иммунные реакции; возникают процессы регенерации, замещения погибающих клеток новыми из запасных фондов организма; изменяются нейрогуморальные связи, регулируемые и интегрируемые ЦНС.

Ионизирующая радиация воздействует на все системы сложного организма. При облучении в сублетальных и летальных дозах изменяется проницаемость существенных барьеров (биомембран) организма. Повышается проницаемость стенок кишечника, и микрофлора кишечника

начинает проникать во внутренние жидкости организма. Возникает угроза бактеримии. Изменяются свойства гематоэнцефалического барьера, поддерживающего постоянство среды в ЦНС.

Благодаря изменению проницаемости и сорбирующих свойств тканей желез внутренней секреции происходит выброс в кровь многих гормонов, характеризующих стрессовое состояние организма. Резко падает неспецифический иммунитет и способность организма противостоять инфекциям патогенными микробами; радиотоксины, образовавшиеся в одних тканях, проявляют свое действие, разносясь с током крови, в соседних и отдаленных органах. Все эти процессы будут усиливать вероятность общей дезорганизации и гибели организма.

С другой стороны, организм мобилизует все свои защитные механизмы. В ответ на массовую гибель кровяных клеток начинается усиленная выработка эффе́кторов<sup>3</sup> типа эритропоэтина, под влиянием которых начинается размножение покоящихся стволовых клеток, их дифференциация и замена, возмещение погибших клеток. Выделительная система организма очищает его от радиотоксинов и токсических веществ, распадающихся, пораженных радиацией клеток. Усиливается липидный обмен, ускоряется замена поврежденных липидов мембран нормальными, восстанавливаются свойства мембран. Включаются резервные энергопроизводящие системы, ликвидирующие недостаток макроэ́ргов<sup>4</sup>, необходимых для репарационных процессов.

Согласно структурно-метаболической теории, конечный результат будет зависеть от того, какие процессы, усиливающие или ликвидирующие лучевую болезнь, возьмут верх. Этот прогрессивный взгляд на развитие лучевой болезни дает врачам реальные указания применять при лечении все средства, тормозящие процессы, которые усиливают первоначальное поражение, и всячески способствовать процессам восстановления, регенерации, удаления токсических веществ.

---

<sup>3</sup> Эффе́кторы — вещества, вызывающие в клетках синтеза новых соединений, переводящие клетки из одной стадии развития в другую.

<sup>4</sup> Макроэ́рги — вещества, несущие в своей структуре запасы энергии.

В клинике уже широко применяются такие мероприятия, как снижение уровня токсинов путем кровезамещения, увеличение количества здоровых стволовых клеток путем пересадки иммунологически совместимого костного мозга. Эффективно введение антибиотиков для борьбы с бактеримией и интерферона для предупреждения инфекций. Действенно введение нейтральных макромолекулярных сорбентов для детоксикации организма, а также ДНК и составляющих ее компонентов для усиления процессов репарации поврежденного генетического аппарата. Вот далеко не полный список мероприятий для спасения облученного организма, используемый медициной на основе современных теоретических представлений в радиобиологии.

В этой главе автор попытался дать общее представление о том, чем угрожают организму ионизирующие излучения в сублетальных и летальных дозах. При уменьшении дозы облучения будут ослабевать процессы, усиливающие радиационное повреждение организма, начнут преобладать защитные восстанавливающие силы организма.

Естественно возникает вопрос: существует ли какой-то предел, порог вредного действия радиации? Или в связи с кумулятивным характером ее действия малые дозы радиации все же несут опасность, пусть и небольшую, для живых организмов?

Наблюдая действие значительных доз ионизирующей радиации, радиобиологи твердо установили: чем выше доза, тем вероятнее проявление вредоносного действия радиации. Для многих эффектов существует линейная зависимость вероятности проявления эффекта от дозы. Сохраняется ли эта зависимость и для случая малых доз? Правильный ответ на этот вопрос имеет не отвлеченный, а огромный практический интерес. Как уже говорилось в предыдущих главах, малые дозы ионизирующей радиации получают все живые организмы на нашей планете. С малыми дозами мы постоянно сталкиваемся в наш атомно-ядерный век..

Проблема порога, правильности концепции линейности для области малых доз ионизирующей радиации, сопоставимых с колебаниями окружающего нас естественного фона радиации, настолько актуальна и злободневна, что ей стоит посвятить специальную главу.

## Глава 6

### ЧТО ИЗВЕСТНО О БИОЛОГИЧЕСКОМ ДЕЙСТВИИ РАДИАЦИИ В МАЛЫХ ДОЗАХ?

Как было уже отмечено выше, проблема действия малых доз радиации на биосферу, живые сообщества, отдельные виды живых организмов и на человека приобретает в настоящее время исключительно большое значение.

Из предыдущей главы мы знаем, что в достаточных дозах ионизирующее излучение несет гибель живым организмам. Если дозы облучения снижаются, то после лучевой болезни той или иной тяжести может наступить выздоровление. Однако выздоровление далеко не полное. В облученном организме развиваются скрытые от внешнего наблюдения процессы. По прошествии некоторого времени (исчисляемого месяцами и годами) проявляются так называемые отдаленные последствия облучения. Из них наибольшее внимание привлекают сокращение сроков жизни, появление злокачественных опухолей, катаракт, наследственных заболеваний в потомстве.

В настоящее время огромное количество исследований подтверждает зависимость между дозой облучения и проявлением того или иного радиобиологического эффекта. Твердо установлено, что проявление отдаленных последствий носит вероятностный характер. Это значит, что если облучается достаточно большая популяция животных, то далеко не у всех проявится то или иное поражение. Чем выше доза облучения, тем больше вероятность проявления отдаленных последствий, тем ранее во времени они начнут возникать. Поясним это на конкретном примере.

Облучили 100 белых крыс дозой 125 рад. Это достаточно высокая, но не смертельная доза: она вызывает легкую, скоро проходящую лучевую болезнь. После выздоровления за облученной популяцией наблюдали в течение многих месяцев (следили за появлением опухолей грудных желез у облученной популяции). Через два месяца все животные были здоровы! Но прошло еще два—

четыре месяца, и у нескольких крыс появились опухоли грудных желез. Через 8 месяцев процент заболевших повысился. Последние наблюдения были сделаны через 12 месяцев (для крыс это уже глубокая старость, так как нормальный срок их жизни 14—16 месяцев). Рак был обнаружен у 30 из 100 животных. При увеличении дозы облучения в два раза (250 рад) через 12 месяцев заболело уже 55%. Только 45 из 100 были здоровы. Из этого опыта и на основании многих других, давших аналогичные результаты, можно сделать два очень важных вывода.

Первый вывод заключается в том, что при облучении опухоль возникает не всегда. Облучение только способствует ее образованию. Неизвестно, у каких животных она возникнет, у каких нет. Это вероятностный процесс. Чем выше доза облучения, тем больше вероятность появления опухоли. И наоборот, чем ниже доза, тем менее вероятно возникновение опухоли, т. е. тем у меньшего количества облученных особей она появится.

Второй, не менее интересный вывод: чем больше времени проходит после облучения, тем выше процент заболевших животных, а чем ниже доза облучения, тем длительнее период времени, в течение которого нет проявлений его бластомогенного действия<sup>1</sup>.

Из этих двух бесспорных выводов естественно следует весьма вероятное предположение, что, снижая дозу облучения, можно дойти до некоторого порога, при котором вероятность возникновения опухоли в популяции будет не выше вероятности ее возникновения в норме или, что почти то же самое, при котором время, необходимое для появления опухоли, превысит сроки жизни у данного вида животных.

Вопрос о том, есть ли порог вредного действия ионизирующей радиации, ниже которого не выявляются опасные последствия облучения, очень важен для правильного понимания и оценки безвредности малых доз радиации. В радиобиологии долгое время принималась концепция беспороговости действия радиации. Работая со сравнительно большими дозами радиации, радиобиологи установили зависимость того или иного радиационного эффекта (гибель, возникновение опухолей, появление на-

---

<sup>1</sup> Бластомогенез — образование опухолей.

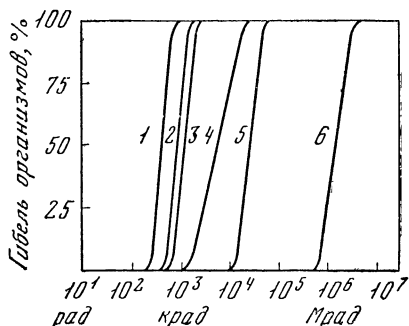
следственных заболеваний в потомстве и др.) от дозы. Чем меньше доза, тем реже проявлялся наблюдаемый эффект. Устанавливалась математическая зависимость проявления эффекта от дозы. Пользуясь ею, можно было рассчитать, что будет при очень малых дозах. Из этих расчетов следовало, что при любых малых дозах всегда остается (хоть и незначительная) вероятность проявления эффекта, т. е. порог не существует!

Однако в подобных рассуждениях и расчетах допускалось, что закономерности, действующие при больших дозах облучения, полностью сохраняются при сколь угодно малых дозах. Но исследования последних лет показали, что это допущение неверно. В живых организмах открыты механизмы, восстанавливающие радиационные повреждения; обнаружены и изучены ферменты, присутствующие во всех нормальных клетках, быстро восстанавливающие радиационные повреждения ДНК. Были изучены системы, удаляющие из организма поврежденные радиацией клетки и замещающие их здоровыми. Открыты механизмы мобилизации резервных путей обмена вместо поврежденных при облучении. При больших дозах облучения, когда повреждений очень много, эти системы не справляются с их ликвидацией, и наблюдаются законы развития поражения. Но чем меньше доза, тем отчетливее проявляется их действие. А при малых дозах они способны полностью ликвидировать все повреждения, т. е. существует порог вредного действия радиации, ниже которого уже нельзя говорить об опасности ионизирующей радиации!

Какая же из этих двух концепций (пороговость или беспороговость) ближе к истине? Начнем с самого опасного действия радиации — с гибели организма. Здесь имеется большой экспериментальный материал, и кривые «доза—эффект» дают вполне определенный ответ. Он особенно нагляден, если эти кривые построить в полулогарифмическом масштабе (для выявления событий при малых дозах в логарифмическом масштабе возьмем шкалу дозы). На рис. 5 мы видим, что даже для наиболее радиочувствительных организмов — млекопитающих — имеется надежный порог. Облучение до 100 рад не ведет к гибели. Все остальные виды организмов еще более устойчивы к действию радиации (данные для взрослых животных). Известно, что развивающийся эмбрион более радиочув-

Рис. 5. Зависимость смертности организмов от дозы облучения

- 1 — собаки,
- 2 — мыши,
- 3 — крысы,
- 4 — насекомые, (амбарный долгоносик),
- 5 — растения (кукуруза),
- 6 — синезеленые водоросли



ствителен, чем взрослый организм. Исследования по облучению животных в различные периоды беременности показали, что при облучении дозой менее 20 рад не удается выявить снижения приплода, отклонений в развитии, появления уродств. При этих дозах процессы репарации полностью ликвидируют редкие и небольшие повреждения, наносимые облучением.

Переходя к рассмотрению отдаленных последствий облучения, остановимся прежде всего на преждевременном старении облученного организма и, как следствие, на сокращении сроков жизни.

В 1967 г. большое исследование было проведено на  $\gamma$ -облученных мышах А. Аптоном в США. На основании полученных им данных составлен рис. 6, на котором показано, что обнаружить небольшое сокращение сроков жизни (5,3%) удастся лишь при дозе 100 рад. При дозе в 300 рад сокращение достигает 19%. При дозе в 25 и 50 рад отмечено обратное явление — увеличение сроков жизни. При хроническом облучении (1—5 рад в сутки) сокращение сроков жизни отмечалось лишь при накоплении суммарной дозы в 400 рад. Хроническое облучение мышей в дозе 300 рад в течение года (около 1 рад в день) не сокращало продолжительности жизни мышей, а, наоборот, в среднем увеличивало ее на 5%.

Приведенные данные наглядно показывают, что закономерности, найденные при больших дозах облучения, не проявляются при действии малых доз.

Исходя из экспериментов на животных, нет оснований ожидать сокращения продолжительности жизни человека при остром облучении в дозе 50 рад и ниже, а при

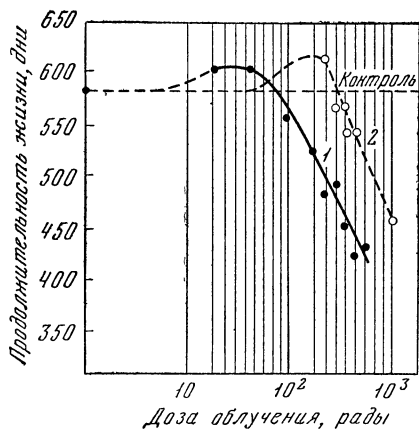


Рис. 6. Продолжительность жизни мышей после облучения  
 1 — острое облучение,  
 2 — хроническое облучение (1–5 раз в день), контроль — необлученные животные

хроническом облучении — до накопления суммарной дозы в 200—300 рад.

По рекомендациям Международного комитета по радиационной защите поглощенная доза, допустимая в производственных условиях, составляет  $D=5 (B-18)$  рад, где  $D$  — доза в рад,  $B$  — возраст человека в годах. Это значит, что к 60 годам в организме человека может накопиться суммарная доза  $D=5 (60-18)=210$  рад, т. е. доза, не сокращающая сроков жизни.

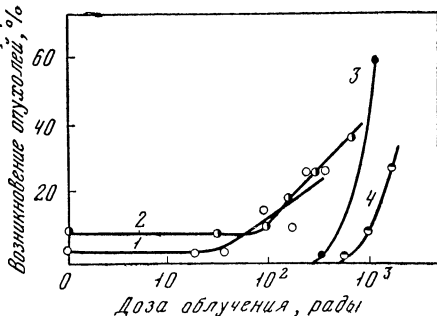
Восстановительные силы организма и идущие в нем репаративные процессы обуславливают наличие отчетливого порога по этому признаку, ниже которого нет научно обоснованных данных о влиянии облучения на среднюю продолжительность жизни популяции.

Говоря об отдаленных последствиях облучения, следует особенно тщательно рассмотреть вероятность заболевания раком, в том числе лейкемией — злокачественным перерождением кроветворной ткани.

Эксперименты на животных показали, что возникновение различных форм рака наблюдается при весьма различной дозе облучения. Некоторые из этих данных приведены на рис. 7. В то время как заболевание лейкемией проявлялось при дозах выше 50 рад, другие формы рака наблюдались лишь при дозе более 100—400 рад, а для возникновения рака кожи требовались дозы выше 600 рад. Остеосаркома костной ткани при ее облучении поглощенными радиоактивными веществами (радий, строн-

Рис. 7. Возникновение опухолей у мышей в зависимости от дозы облучения

- 1 — миеловидная лейкемия,  
2 — лимфома тимуса,  
3 — опухоли почек,  
4 — кожные опухоли



ций-90) наблюдалась только после накопления дозы около 1000 рад.

Отчетливо проявляются пороги бластомогенного действия радиации. Сторонники беспороговой концепции исходили из гипотезы, что при попадании ионизирующей частицы в нормальную клетку вследствие мутации она превращается в злокачественную. Далее допускалось, что через какое-то время злокачественная клетка начинала безудержно делиться и давала опухоль. Так как для возникновения мутации достаточно одной частицы, то подобная ситуация может возникнуть при любом малом облучении, т. е. порог не существует.

Однако исследования последних лет показали, что образование опухоли — более сложный процесс, который зависит от ряда факторов. Прежде всего, присутствующий в здоровых тканях в неактивной форме онкогенный вирус должен под влиянием радиации превратиться в активную форму. Одновременно должно произойти второе событие — мутация в клетке, делающая ее восприимчивой к внедрению активированного онкогенного вируса.

Как уже говорилось, доказано, что радиационные повреждения в молекуле ДНК, ведущие к возникновению мутации, легко восстанавливаются специальными ферментами. Только в том случае, если повреждений возникает настолько много, что ферменты репарации не успевают их ликвидировать, возникает мутация. Если все перечисленные события произойдут одновременно (концепция одного попадания здесь явно несостоятельна), то образуется чуждая организму злокачественная клетка.

Однако образование злокачественной клетки совершенно не означает появления злокачественной опухоли.

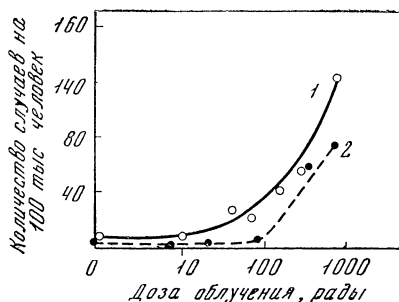
Сейчас есть все основания полагать, что единичные перерождения нормальной клетки в злокачественную постоянно происходят в организме животного под влиянием естественного фона радиации и благодаря присутствию в окружающей нас среде различных канцерогенных веществ. Однако организм животного и человека в процессе эволюции выработал иммунные механизмы для уничтожения чуждых организму клеток. Иммунными силами организма (например, макрофагами) постоянно уничтожаются проникающие в ткани болезнетворные микробы и возникающие злокачественные клетки. Чтобы под влиянием радиации повысилась частота случаев прорыва этих клеток через иммунологический барьер, должна ослабиться иммунологическая защита организма. Действительно, облучение ослабляет иммунитет. Однако это удается обнаружить лишь при дозах выше 100 рад. Только при ослаблении иммунитета начнется развитие злокачественной клетки в опухоль с большей вероятностью, чем это происходит спонтанно.

Таким образом, современные теоретические представления говорят о многофакторности образования опухолей и, следовательно, о существовании порога. Более того, обнаружено, что облучение в малых дозах (около 25 рад) стимулирует активность иммунной системы, что может даже снижать вероятность образования опухолей при малых дозах облучения.

Исследование радиационного канцерогенеза на животных показало, что частота возникновения опухолей у различных видов млекопитающих варьирует в широких пределах. Поэтому переносить количественные соотношения, полученные на животных, на человека не вполне оправданно. Что же известно о бластомогенном действии различных доз радиации на человека?

Наблюдение в течение 25 лет за частотой возникновения лейкемии у жителей Хиросимы и Нагасаки, перенесших атомную бомбардировку в 1945 г., позволило установить количественную зависимость возникновения лейкемии от дозы острого облучения. На рис. 8 представлена зависимость возникновения лейкемии от дозы облучения по данным Научного комитета по действию атомной радиации, опубликованным в 1972 г. Из этих данных видно, что в Нагасаки у населения, получившего  $\gamma$ -облучение менее 100 рад, не обнаружено повышения заболеваемости

Рис. 8. Возникновение лейкемии у жителей Хиросимы (1) и Нагасаки (2), переживших атомный взрыв



лейкемией. В Хиросиме, где поток радиации содержал значительное количество нейтронов, порог действия снизился до 10 рад.

При экспериментальном взрыве атомно-водородной бомбы, осуществленном США в 1954 г. на уединенном коралловом рифе в Тихом океане, 17 тыс. жителей Маршалловых островов (удаленных более чем на 300 км от места взрыва) подверглись  $\gamma$ -облучению от радиоактивных осадков в дозе около 175 рад. Однако среди них в течение 15 последующих лет не было обнаружено ни одного случая заболевания лейкемией.

Для лечения заболеваний щитовидной железы широко применяется раствор солей радиоактивного йода. При приеме внутрь радиоактивный йод почти полностью поглощается щитовидной железой, оказывая лечебное действие. Однако некоторое небольшое его количество, циркулируя в крови, осуществляет общее облучение организма. В течение курса лечения организм оказывается облученным в дозе 15—20 рад. Обследование десятков тысяч таких больных отчетливо показало, что при этих дозах облучения не происходит заболевания лейкемией.

Из имеющегося фактического материала можно сделать вывод, что при остром облучении в малых дозах (10 рад и ниже) и тем более при хроническом облучении в течение длительного времени нельзя говорить о риске возникновения лейкемии с большей вероятностью, чем она наблюдается в нормальных условиях в современной жизни человека. В еще большей степени это справедливо для других форм рака, имеющих более высокий порог действия радиации.

Интересны с точки зрения проблемы малых доз результаты обследования рабочих урановых, радиевых и

других шахт (в Чехословакии, Канаде, Великобритании, США, Швеции), где систематическое вдыхание радона приводит к  $\alpha$ -облучению эпителия бронхов с большой плотностью ионизации. При обследовании за единицу была принята доза, получаемая на рабочем уровне за месяц (РУМ), соответствующая дозе  $\alpha$ -облучения бронхиального эпителия 1—2 рад. У рабочих, получивших менее 120 РУМ (т. е. менее 120—240 рад), не выявлено увеличения количества заболеваний раком легких по сравнению с окружающим населением. Большая смертность от рака легких наблюдалась лишь у рабочих, получивших 360 и более РУМ.

Из всего сказанного видно, что при малых дозах облучения (25 рад и ниже) нет никаких оснований утверждать, что они повышают количество раковых заболеваний по сравнению с нормой.

Снижение иммунитета животных и человека под влиянием больших, сублетальных и летальных доз ионизирующего излучения в настоящее время твердо установлено. Опасность снижения сопротивляемости человеческого организма различным вирусным, бактериальным и другим инфекциям, падение способности к выработке защитных антител в результате облучения побудили провести специальные исследования его систем в зависимости от дозы облучения.

Сопоставление всех имеющихся данных о влиянии ионизирующего излучения на иммунный ответ человеческого организма позволило Научному комитету по действию атомной радиации при ООН сделать вывод, что только дозы порядка 100 рад приводят к повышению чувствительности организма к инфекциям. Из этого заключения следует, что облучение в малых дозах (50 рад и ниже) нельзя рассматривать как вредное для иммунитета человека.

Наиболее сложен вопрос об определении опасности облучения для потомства, т. е. определении так называемых генетических последствий облучения.

При облучении гонад в воспроизводящих клетках (сперматозоидах, яйцеклетке) возможно повреждение ДНК, в структуре которой, как известно, в виде генетического кода хранится вся информация, необходимая для нормального развития плода. Радиационное нарушение генетического кода (мутация), в зависимости от его ха-

рактера и локализации нарушения, может привести к тем или иным дефектам развития, ведущим к рождению потомства, отягощенного наследственными заболеваниями.

За последние годы накоплен значительный материал по радиационному поражению генома мышей. Повышение генетических повреждений в потомстве при облучении ниже 25 рад не удалось обнаружить. Экстраполировать эти данные на человека очень трудно. Имеется большое различие в размерах генома мыши и человека, различно время созревания половых клеток, период репродуктивной жизни, количество потомства.

Введя ряд поправочных коэффициентов на отличие генома человека от генома мыши, Научный комитет по действию атомной радиации при ООН на основе концепции беспороговости и линейности (не доказанной для малых доз и дающей верхний возможный предел поражаемости) рассчитал, что при облучении всего населения в дозе 1 рад на миллион новорожденных возможны 2—20 случаев тяжелых генетических дефектов.

Статистическое обследование в ряде стран показало, что около 4% новорожденных имеют различные отклонения от нормы, связанные с наследственностью. Это, как говорят генетики, тот генетический груз, которым отягощено современное человечество. Четвертая часть (1%) страдает серьезными генетическими дефектами, такими, как слабоумие, шизофрения, физические уродства и др. Это значит, что из 1 млн. новорожденных около 10 тыс. имеют тяжелые наследственные дефекты. Достаточно сопоставить цифры — 2—30 и 10 тыс., чтобы стало ясно, что при дозах в несколько рад нет оснований говорить о реальном риске генетических дефектов для потомства.

С генетическим грузом человечество живет, и он не останавливает процесс увеличения населения на нашей планете, не препятствует социальному прогрессу, нормальной жизни общества, хотя сопровождается страданиями отдельных людей. Небольшие колебания процента генетических дефектов в сторону уменьшения или увеличения практически не заметны для общества, и говорить о риске, опасности, по-видимому, можно лишь при его существенном увеличении. Генетики рассчитали, что заметно и опасно для общества увеличение генетического груза в два раза. Доза облучения, которая способна привести к удвоению образования мутаций, удвоению наслед-

ственных аномалий, получила название «удваивающей дозы». Генетики согласились, что облучение всего человеческого общества в размерах удваивающей дозы уже следует рассматривать как реально ощутимую для человечества опасность.

Анализируя имеющиеся данные, Научный комитет пришел к выводу, что удваивающая доза для человеческой популяции лежит в области 70 рад. Следует особенно подчеркнуть, что все расчеты генетической опасности справедливы при условии облучения всей популяции. Облучение небольших групп населения резко снижает вероятность появления генетических отклонений.

Суммируя все сказанное в этой главе, мы приходим к выводу об отсутствии научных оснований для представлений об опасности для человечества ионизирующей радиации в малых дозах, сопоставимых с колебаниями естественного фона радиации, т. е. в дозах, с которыми реально сталкивается население в своей повседневной деятельности.

## ДЕЙСТВУЕТ ЛИ НА БИОСФЕРУ ЕСТЕСТВЕННЫЙ ФОН РАДИАЦИИ?

Итак, поражающее действие ионизирующей радиации, ее способность нести гибель, лучевую болезнь, снижать иммунную защищенность, вызывать отдаленные последствия — все эти свойства начинают проявляться и могут быть обнаружены только после некоторой дозы облучения. В зависимости от радиочувствительности организма и выбранного критерия действия радиации этот порог вредного действия по своей величине варьирует в широких пределах. Для более радиоустойчивых растительных организмов он достигает десятков тысяч рад, в то время как для гораздо более радиочувствительных млекопитающих и человека лежит в диапазоне 25—100 рад острого облучения или 100—300 рад при хроническом длительном облучении малой мощности. Эти величины облучения в сотни, тысячи раз превосходят естественный фон радиации.

С другой стороны, в результате мирного использования атомной энергии облученность населения нашей планеты будет варьировать в пределах долей естественного фона радиации. Да и сам естественный фон в различных районах Земли изменяется в достаточно широких пределах: от 60 до 10 000 мрад в год. Естественно, возникает вопрос: безразлична ли слабая облученность для жизни на Земле? Ведь жизнь возникла, развивалась и существует в настоящее время, непрерывно получая эти слабые потоки  $\gamma$ -лучей, протонов, нейтронов,  $\beta$ - и  $\alpha$ -частиц и других компонентов космических и земных излучений.

В начале нашего столетия отдельные ученые обращали внимание на то, что эти излучения, как и другие физические факторы, которые в больших дозах несут гибель живым организмам, в очень малых дозах оказываются полезными и даже необходимыми для жизненных процессов. Эти идеи базировались и на общих соображе-

ниях о способности живых существ в процессе эволюции наиболее целесообразно использовать факторы окружающей среды и на отдельных наблюдениях, показывающих, что очень слабые потоки ионизирующей радиации стимулируют рост и развитие.

Одним из первых явление стимуляции размножения под влиянием излучений урана и эманации радия описал в 1913—1914 гг. известный чешский исследователь Ю. Стоклаза. Отсутствие в те времена точной дозиметрии, возможность влияния на эффект микроэлементов и необычность результата, побудили многих отнестись критически к выводам Стоклаза. Однако в 1938 г. аналогичные эксперименты повторил в точно контролируемых условиях Е. А. Штерн в Ленинграде, в 1953 г. — Г. Даниель и Х. Парк в Великобритании, в 1956 г. — Е. Н. Сокурова в Свердловске, в 1961 г. — А. Джеймс и И. Мюллер в Канаде. Эти ученые убедительно показали на различных клетках (дрожжах, азотобактере, инфузориях) ускорение деления под влиянием малых (для данной культуры) доз ионизирующей радиации. Чем радиочувствительнее была исследуемая культура клеток, тем при меньших дозах воздействия наблюдалась стимуляция развития.

По данным советского исследователя Ю. П. Добрачева, опубликованным им в 1973 г. следует, что у такой радиочувствительной культуры клеток, как эмбриональные фибробласты, суммарно поглощенные дозы 0,02—10 рад вызывают стимулирование роста. Наиболее отчетливый эффект (увеличение числа клеток на 140—160% по сравнению с контролем за сутки) наблюдался при облучении в дозе 0,1—0,3 рад. Интересно, что в областях малых доз (от 1 рад) автор отмечал уменьшение числа мертвых клеток (открепившихся от стекла) по сравнению с контролем. При дозе выше 10 рад рост культуры угнетался и гибель клеток возрастала. Стимуляция наиболее отчетливо наблюдалась при накоплении за 5 дней эксперимента дозы в 260 мрад. Это примерно в 100 раз больше, чем они получают за это время от естественного фона радиации.

В настоящее время имеется обширная литература о стимуляции прорастания, роста и развития растений при облучении семян ионизирующей радиацией. Благодаря большой радиоустойчивости растений одномоментные дозы облучения семян (наиболее устойчивой покоей формы существования растений), которые дают

стимулирующий эффект, лежат далеко от естественного фона радиации, а именно в пределах 300—4000 рад для разных культур. Однако как только переходят от облучения семян к длительному облучению растущей (т. е. гораздо более радиочувствительной фазе) культуры, то дозы, вызывающие эффект стимуляции, резко снижаются (они сопоставимы с естественным фоном облучения). Так, например, в опытах советских ученых Л. П. Бреславец и Н. М. Березиной с сотрудниками, впервые поставившими вопросы радиационной стимуляции сельскохозяйственных растений на строго научную основу, показано, что хроническое облучение вегетирующих растений, в 10—40 раз превосходящее их облучение от естественного фона, приводило к стимуляции их развития, увеличению количества генеративных органов и повышению урожая.

Стимулирующее действие малых доз радиации обнаружено и на животном организме.

Стимулирующее действие малых доз ионизирующих излучений на развитие и продуктивность птиц было показано в нашей совместной работе с И. Г. Костиным, Л. Н. Шершуновой и Л. А. Збруевой, опубликованной в 1963 г. Мы моделировали в инкубаторах Томилинской птицефабрики слегка повышенный фон естественной радиации в процессе эмбриогенеза, внося под лотки с яйцами запаянные стеклянные трубки с солями урана. Суммарная доза, получаемая за 20 дней инкубации, составляла 1,4 рад. На большом материале проводился учет по ряду показателей по сравнению с такой же контрольной партией. Оказалось, что такое слабое облучение повысило на 2,4% количество вылупившихся здоровых цыплят, уменьшило отход за первые два месяца их развития на 2,1%, а за последующие четыре месяца на 4,1%, что указывало на общее повышение жизненного тонуса, лучшую сопротивляемость неблагоприятным факторам внешней среды. По сравнению с контрольной партией молодки из опытной партии начали нестись на 10 дней раньше, за первый месяц в этой партии было получено яиц в полтора раза больше — 160%, и в последующие 12 месяцев наблюдения яйценоскость опытной партии оказалась на 2—7% выше. Близкие результаты были получены нами совместно с П. А. Хакимовым в 1975 г. на Ташкентской птицефабрике при однократном облучении яиц до начала инкуба-

ции (в состоянии покоя). При дозах в 1—3 рад повышалась жизнеспособность цыплят, ускорялось развитие и увеличивалась яйценоскость. Повышение дозы облучения быстро приводило к угнетению всех этих показателей. (Доза в 1—3 рад лишь в 10—30 раз превышает годовой уровень облучения от естественного фона.)

Для решения вопроса о том, можно ли говорить о благоприятном действии малых доз радиации на животный организм, исключительный интерес имеют исследования по продолжительности жизни различных животных при хроническом  $\gamma$ -облучении в очень малых дозах. Впервые в 1950—1955 гг. американский ученый Е. Лоренц опубликовал свои наблюдения об увеличении средней продолжительности жизни у мышей и морских свинок при ежедневном облучении, начиная с одного месяца и до конца жизни в дозах 0,1 рад. Если у мышей (самцов) средняя продолжительность жизни составляла 683 дня, то в опытной группе она равнялась 783 дням, т. е. на 100 дней больше.

В 1957—1959 гг. Л. Карлсон с сотрудниками в Отделе физиологии и биофизики университета города Сиэтла в США провели подобные опыты, но только в более строго контролируемых идентичных условиях содержания подопытных и контрольных крыс. При средней продолжительности жизни контрольных животных 445 дней у опытных (получавших ежедневно в течение 8 ч 0,8 рад) она составила 585 дней, т. е. 131% по отношению к контролю. Интересно, что по мере старения у контрольных крыс закономерно уменьшалась интенсивность дыхания. В опытной партии уменьшение было замедленным. Интенсивность дыхания 17—22-месячных опытных крыс равнялась интенсивности 9—13-месячных контрольных, т. е. достоверно показывала более медленное старение облученной группы.

В 1967 г. были опубликованы результаты большого исследования, проведенного в Окриджской национальной лаборатории (США) А. Аптоном с сотрудниками с целью проследить зависимость сокращения продолжительности жизни мышей от мощности дозы  $\gamma$ -излучения и быстрых нейтронов. Авторы не интересовала проблема малых доз. Однако, просматривая полученные ими данные под этим углом зрения, мы установили (см. рис. 9), что в каждой серии экспериментов наблюдаются исключения из общего

правила: не сокращение, а продление жизни при облучении в малых дозах (средняя продолжительность жизни определялась для группы, состоящей, как правило, из 100 особей и более, т. е. полученные результаты были вполне достоверны). Так, при облучении 554 самок средняя продолжительность жизни контрольных животных равнялась 582 дням. При остром облучении в дозах 25 и 50 рад средняя продолжительность жизни увеличивалась на 17 и 18 дней. Только при дозе 100 рад было отмечено сокращение времени жизни (на 31 день), возраставшее с увеличением дозы. При дозе 300 рад сокращение достигало 112 дней. Однако при облучении в дозе 300 рад в течение 300 дней (по 1 рад в день) в группе из 125 особей отмечалось увеличение средней продолжительности жизни на 28 дней.

Самцы оказались более радиочувствительными. У них наблюдалось сокращение времени жизни на 15 дней уже при облучении в дозе 25 рад. При остром облучении в дозе 300 рад продолжительность жизни сокращалась на 169 дней. Однако если близкая доза (329 рад) давалась в течение 63 дней, наблюдалось удлинение продолжительности жизни на 43 дня.

Следует отметить, что во всех перечисленных опытах увеличение средней продолжительности жизни происходило в основном за счет сокращения количества животных, быстро стареющих и умирающих в ранние сроки, и соответственно увеличения количества долгожителей, что опять-таки говорило об общем повышении жизненного тонуса, увеличении сопротивления неблагоприятным факторам внешней среды.

Наконец аналогичное благотворное влияние на человека очень малых доз радиации хорошо исследовано в практике курортного лечения радоном. На всемирно известных курортах Цхалтубо, Пятигорск, Белокуриха в СССР, Брамбах в ГДР, Висбаден и Баден-Баден в ФРГ, Масутами-Спрингс в Японии и других используются источники с повышенным содержанием радона для  $\alpha$ -облучения людей с лечебными целями. Целебные свойства этих источников были обнаружены еще в XVII—XVIII вв., но только в начале XIX в. открыли радиоактивность — причину их замечательных, благоприятных для здоровья человека свойств.

В Советском Союзе ежегодно около 700 тыс. курортных больных принимают радоновые ванны, пьют радон-содержащие воды и вдыхают обогащенный радоном воздух во время отдыха на соответствующих курортах. Снижение болезненных симптомов, подчас полное выздоровление, повышение жизненного тонуса и улучшение самочувствия, отмеченные в сотнях тысяч историй болезни и обобщенные в ряде монографий, приводят врачей-курортологов к твердому убеждению, что в этом случае проявляется стимулирующее действие малых доз радиации на человеческий организм.

Врачи применяют три основных приема лечения: ванны (общие или только для ног), питье воды и вдыхание радона. Курс лечения обычно включает 15—20 ванн по 15—20 мин каждая, один или два раза в день по стакану лечебной воды, вдыхание радона по 1 ч. в день в течение 15 дней.

Что же представляют собой эти процедуры с точки зрения облученности организма? Какие дозы облучения получает больной? Какие органы и ткани подвергаются облучению? Каков характер самого облучения?

Рассмотрим более подробно радиационную обстановку на нашем прославленном Кавказском курорте в Цхалтубо.

Лечебные воды, прежде чем вырваться на поверхность, проходят через толщу песка, содержащего радий, уран и торий. При радиоактивном распаде этих веществ образуется газообразное радиоактивное вещество — радон  $Rn^{222}$ . Этот газ растворяется в слабоминерализованной воде. Когда она наполняет ванны или ее пьют больные, в ней содержится радон. Именно в этот момент — в источнике наибольшая целительная сила. Разлейте эту воду в бутылки, развезите ее в отдаленные края — и никаких лечебных свойств вода иметь не будет! Происходит это потому, что, во-первых, радон — газ с плохой растворимостью: как только вода выходит на поверхность, он выделяется в виде пузырьков в воздух. Во-вторых, радон имеет очень короткий период полураспада — всего 3,8 дня. При хранении вода теряет свои радиоактивные свойства, так как радон распадается.

При радиоактивном распаде радона выделяются так называемые  $\alpha$ -лучи с большой энергией (5,48 МэВ). Эти лучи не глубоко проникают в ткани, так что облучению (при принятии ванны) подвергается в основном только

поверхностный слой тела. Правда, в силу газообразных свойств немного радона (как газа) проникает через поры кожи в кровь и с кровью быстро разносится по всему организму.  $\alpha$ -лучи радона будут облучать стенки сосудов, артерий, по которым стремительно гонит кровь постоянно работающее сердце.

Еще одно замечательное свойство радона надо иметь в виду: быстро распадаясь, он дает целую серию полупродуктов распада, которые, в свою очередь, оказываются радиоактивными. В отличие от радона это твердые вещества, а период их полураспада еще короче, чем у радона. Вот почему, когда человек выйдет из ванны, на поверхности его тела оседает тончайший радиоактивный слой из продуктов полураспада радона, которые будут еще около 3 ч продолжать бомбардировать кожу  $\alpha$ -частицами, электронами и  $\gamma$ -квантами. Через 3 ч все распадается, и, следовательно, облучение организма заканчивается.

В среднем за месячный курс лечения принимают 15—20 радоновых ванн, что дает общую облученность не выше 70—80 мрад. От естественного фона человеческий организм получит 8—33 мрад, т. е. и здесь мы имеем дело с облучением, сопоставимым с естественным фоном. Однако при различных процедурах (ванны, питье радоновой воды у источника, вдыхание радона) облученность различных органов нашего тела будет сильно варьировать. Так, при приеме ванн основной радиоактивный «удар» принимает кожа (до 300—400 мрад) и очень небольшой — внутренние органы (желудок, почки — около 10 мрад; легкие — только 1 мрад).

Питье воды из радоновых источников обуславливает значительно большую дозу на внутренние органы. Для питья рекомендуются наиболее радиоактивные источники. Желудочно-кишечный тракт получает за месяц около пяти годовых норм естественного радиационного фона. Наиболее облучаемые ткани не получают за месяц более 1 рад, т. е. это величина из области малых доз, обуславливающих стимулирующий эффект в экспериментах на животных.

Наконец, при вдыхании радона во время общего облучения организма в дозе, близкой к той, которую он получает при приеме ванн, значительная ее часть приходится на органы дыхания. Доза на эпителиальную

ткапь альвеол легкого за курс лечения (по 1 ч в день за 15 дней) достигает 16—48 рад, что уже близко к верхним пределам диапазона малых доз.

Как показала многолетняя клиническая практика, использование радоновых вод (в первую очередь радоновых ванн) оказывает положительный эффект при подагре, усиливает выведение из организма мочевой кислоты и уменьшает гиперуремию при ранних стадиях атеросклероза, нормализует холестериновый, липидный и углеводный обмен в организме человека. Хороший терапевтический эффект наблюдается при различных заболеваниях суставов, ревматоидном полиартрите и др. Под влиянием радоновых ванн интенсифицируется основной обмен. Питье радоновых вод повышает желчно-секреторные функции печени, моторные и секреторные функции желудка, двигательную функцию толстой кишки, снижает кровяное давление. Радопотерапия, усиливая неспецифический иммунитет организма, обладает противовоспалительным действием. Уже одно только перечисление (еще далеко не полное) весьма разнообразных эффектов, наблюдаемых клиницистами при использовании радоновых вод, приводит к выводу, что здесь проявляется неспецифическое общее стимулирующее действие малых доз радиации на организм в целом, при котором мобилизуются естественные защитные силы, что и помогает организму справляться с тем или иным заболеванием.

Итак, на ряде примеров убедительно показано, что очень малые дозы, имитирующие небольшие повышения естественного радиоактивного фона, не только не оказывают вредного действия, но, напротив, усиливают сопротивляемость организма неблагоприятным факторам внешней среды, повышают жизненный тонус организма, способствуют его активной деятельности. В свете этих наблюдений все с большей остротой встает вопрос: а не оказывает ли естественный радиоактивный фон полезное влияние на биосферу нашей планеты?

С того времени как были открыты природные радиоактивные вещества и их широкое распространение в почве, минералах, горных породах, обнаружено проникновение космических излучений в биосферу, показано присутствие радиоактивных веществ в организме, тканях, в каждой клетке (радиоактивный изотоп калия  $K^{40}$ , углерода  $C^{14}$  и др.). Не раз высказывались предположения,

что ионизирующие излучения естественного фона, быть может, играют и некоторую положительную роль в явлениях жизни, однако непосредственные, убедительные экспериментальные доказательства этих предположений до недавнего времени отсутствовали.

Большое внимание с этих позиций привлекал калий. Как известно, калий обязательно входит в состав живых организмов. Без него не могут существовать ни растения, ни животные. Калий не может быть заменен никаким другим элементом. Между тем природный калий состоит из трех изотопов:  $K^{39}$ ,  $K^{40}$  и  $K^{41}$ , из которых  $K^{40}$  радиоактивен. Он имеет большой период полураспада ( $1,3 \cdot 10^9$  лет) и является  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучателем. Правда, его содержание в естественной изотопной смеси очень невелико (около 0,01%), но возможно это-то и необходимо для поддержания жизненных процессов.

В 50-х годах нашего столетия академик А. П. Виноградов поставил, казалось бы, решающие эксперименты, чтобы ответить на эти вопросы. Он получил калий, обогащенный радиоактивным изотопом (содержание последнего было повышено с 0,0119 до 1,34%), и калий, содержащий в 50 раз меньше  $K^{40}$  (вместо 0,0119% всего лишь 0,0002%). Приготовили три питательные среды для роста простейшего грибка *Aspergillus niger*, одна из которых содержала обычный калий, другая — обогащенный и третья — обедненный. На эти среды высевали грибок и в течение четырех суток визуально определяли рост грибка, а по прошествии четырех суток устанавливали вес сухой массы и количество щавелевой кислоты, выделенной грибом в окружающую среду.

Ни визуально, ни по сухому весу не удалось выявить различия в росте. Автор делает категорический вывод, что радиоактивность  $K^{40}$  не влияет на рост и развитие грибка. Можно ли полностью согласиться с автором? В статье приводятся данные о продукции щавелевой кислоты растущим грибом.

Эти определения приведены в табл. 15.

Если эти данные верны, можно сделать вывод о том, что даже небольшие вариации условий облучения сказываются на скорости обменных процессов, а это неизбежно связано со скоростью роста и развития.

Для проверки правильности такого предположения автор этой книги поставил серию экспериментов по на-

Таблица 15

Продукция щавелевой кислоты *Aspergillus niger* в зависимости от условий эксперимента

Условия эксперимента	Титр щавелевой кислоты	Продукция щавелевой кислоты (за вычетом фона), усл. ед.
Среда без грибка	13,3	—
Среда с развивающимся грибом в присутствии:		
обыкновенного калия	20,04	6,7
обогащенного $K^{40}$	24,25	10,9
обедненного $K^{40}$ ( $K^{39}$ )	13,71	0,4

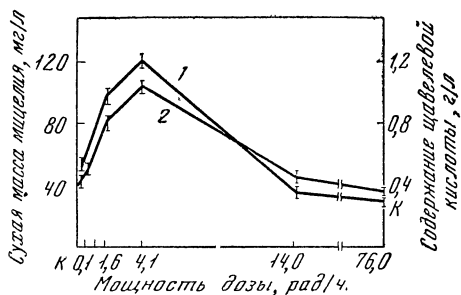
блюдению за развитием и образованием органических кислот грибом *Aspergillus niger*, растущим при повышенной мощности дозы от 0,1 до 76 рад/ч. Данные о сухой массе культуры и продукции щавелевой кислоты на седьмые сутки представлены на рис. 9, из которого видно, что если облучение при мощности дозы 0,1 рад/ч мало влияет на скорость роста, то облучение при мощности дозы 1,6—4,1 рад/ч более чем в два раза увеличивает сухую массу культуры и в 1,8 раза продукцию щавелевой кислоты; увеличение мощности дозы до 14 рад/ч резко снижает эффект стимуляции.

Следует подчеркнуть, что различие в росте стало выявляться лишь на 6—7-й день культивирования. Уникальные опыты А. П. Виноградова не позволяют сделать общих выводов по двум обстоятельствам: первое — это кратковременность наблюдения, второе (и, пожалуй, самое существенное) — снижение содержания  $K^{40}$  в питательной среде очень мало должно сказаться на общей облученности организма, так как окружающий естественный радиоактивный фон не был снят. Радиация от  $K^{40}$  составляет лишь 16% от естественного радиоактивного фона, и, конечно, снижение облученности растущей культуры *Aspergillus niger* лишь на 16% могло не сказаться в кратковременном эксперименте.

Более радикально подошел к решению вопроса о роли естественного радиоактивного фона в жизнедеятельности организмов французский исследователь Г. Планель. В 1966 г. на III Международном конгрессе по радиационным исследованиям в Кортино Д'Ампеццо (Италия)

Рис. 9. Влияние мощности дозы  $\gamma$ -облучения на развитие *Aspergillus niger*

1 — сухая масса,  
2 — продукция щавелевой  
кислоты



он впервые сообщил о своих экспериментах по наблюдению за темпом размножения простейшего организма парамеции (*Paramecium caudatum*) при экранировании от естественного фона радиации. Для экранирования он применил свинец толщиной в 5 и 10 см. Измерение активности  $\gamma$ -лучей спинцилляционным счетчиком в области от 0 до 2 МэВ показало, что толщина свинца в 5 см снижает естественный фон облучения в 10 раз, а 10 см — примерно в 25 раз. В этих условиях за 10 дней наблюдения Планель с сотрудниками отметил снижение размножения парамеций. Оно было уже достоверно при 5 см свинца, и эффект увеличивался при защите в 10 см.

Чтобы убедиться в том, что снижение деления связано с экранированием от ионизирующей радиации, а не с какими-либо другими неучтенными факторами, были поставлены контрольные опыты, в которых за свинцовый экран толщиной 10 см вносили слабые источники радиации, восстанавливающие естественный уровень облучения. В этих условиях парамеции делились с той же скоростью, что и неэкранированные в контроле. Автор делает вывод, что ионизация, вызываемая природной радиацией, необходима для размножения клеток.

Свои эксперименты Планель продолжил в подземной лаборатории, расположенной на глубине 200 м в доломитовом массиве, что значительно снижало интенсивность космической радиации. В качестве защиты от слабой  $\gamma$ -радиации использовали свинец толщиной 5 см. Измерения интенсивности  $\gamma$ -радиации различной энергии показали значительное снижение естественного фона как высокоэнергетических лучей (космический компонент), так и низкоэнергетических от окружающих пород по

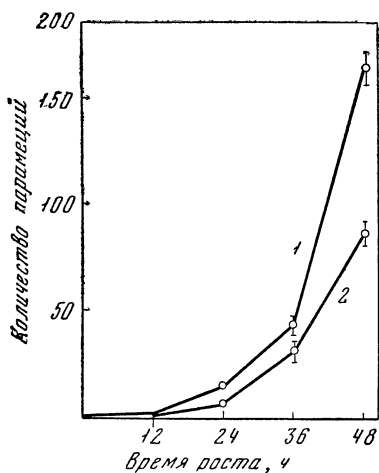


Рис. 10. Рост культуры *Paramecium aurelia*

1 — в надземной лаборатории без защиты,

2 — в подземной лаборатории со свинцовой (5 см) защитой

сравнению с лабораторными условиями на поверхности Земли.

Сравнивали скорость размножения *Paramecium aurelia* в надземной и подземной лабораториях. Результаты, полученные за двое суток наблюдения, представленные на рис. 10, свидетельствуют о замедлении размножения. Оно еще более усилилось при использовании свинцового экрана. Удлинялось время, нужное для деления клеток. С шести часов оно удлинялось до восьми при наиболее полном экранировании от естественного фона, т. е. эффект достигал 33%. Экранирование от естественного фона сказывалось и на скорости развития более сложных организмов.

Планель с сотрудниками поставил эксперименты по выяснению роли радиационного фона в развитии яиц дрозофилы. Стеклообразные пробирки с яйцами *Drosophila melanogaster* на обычной питательной среде помещали в контейнер со свинцовыми стенками толщиной 10 см. Контрольные яйца находились в нормальных условиях. Температура и аэрация были строго идентичными. В случае экранирования от внешнего облучения вылупление личинок задерживалось на 24 ч. Авторы пришли к выводу, что естественный радиационный фон влияет на скорость прохождения определенных стадий развития дрозофил.

Чтобы подтвердить этот вывод, эксперименты были повторены, причем за развитием яиц наблюдали как в свинцовом контейнере, так и в контейнере с радиоактивным кобальтом, имитировавшим естественный радиационный фон (мощность дозы 125 мрад/год). Было показано, что задержка развития при защите от внешнего облучения свинцом полностью снимается в случае внесения  $\text{Co}^{60}$ .

Можно думать, что естественный фон радиации имеет особое значение для прорастающих растений, семена которых и пачальные проростки получают в почве значительно большую дозу облучения от находящихся в ней естественных радиоактивных нуклидов и выделяемого ими радона. Чтобы подтвердить роль естественного фона радиации в развитии растений, в нашей лаборатории создана подземная камера с водяной защитой (слой в 3 м) от естественного фона радиации. В центре этой камеры был помещен герметически закрытый термостат, в котором проращивались семена редиса. Контрольный эксперимент проводился в аналогичном термостате, находящемся в надземных лабораторных условиях. Измерение радиоактивного фона в контейнере с водяной защитой показало снижение примерно в 20 раз. Чтобы убедиться, что наблюдаемые эффекты обусловлены именно снижением естественного фона радиации, а не какими-либо другими неучтенными факторами, в ряде опытов в экранированную камеру вносился азотнокислый уранил, восстанавливающий естественный фон радиации. Измеряли интенсивность роста проростков за 4 дня развития по длине корня и проростка. Наблюдалось угнетение роста в условиях экранирования от естественного фона и возвращение к норме при внесении в низкофоновую камеру азотнокислого уранила в количествах, создающих нормальный фон радиации.

Все приведенные эксперименты заставляют нас прийти к выводу, что естественный радиоактивный фон не безразличен для нормального течения жизненных процессов на нашей планете.

Описанные в этой главе новые факты заставляют более внимательно относиться к гипотезе, сформулированной еще в 1932 г. А. Г. Гурвичем — талантливым советским исследователем, открывшим митогенетические излучения в биологии. Гурвич, обнаружив ускорение деления кле-

ток при облучении коротковолновым ультрафиолетом (190—220 нм) очень малой интенсивности (порядка нескольких квантов), пришел к выводу, что деление клетки обусловлено двумя факторами: во-первых, метаболическими процессами, приводящими клетку в состояние, готовое к делению, и, во-вторых, пусковым фактором, роль которого выполняют высокоэнергетичные кванты ультрафиолета. По-видимому, роль «пусковых факторов» могут играть и кванты ионизирующей радиации, что хорошо объясняет результаты опытов, описанных выше.

Весьма вероятно, что в делящейся ткани всегда имеется значительное количество клеток, которые за счет предыдущих метаболических процессов подготовлены к делению. Поглощение одной из этих клеток высокоэнергетического кванта энергии вызовет в ней цепную радикальную реакцию окисления. Это приведет к образованию биологически активных веществ, активирующих определенный участок генома, после чего клетка начинает делиться. Увеличение естественного фона радиации приводит к более частому попаданию квантов в готовые к делению клетки, что вызовет стимуляцию деления, роста и развития, о чем говорилось в начале главы.

Имеется еще один путь решения вопроса о значении естественного радиоактивного фона для жизненных процессов. Это путь установления корреляций между уровнем тех или иных проявлений жизнедеятельности и колебаниями естественного фона радиации. Конечно, это менее надежный путь, так как в природных условиях действуют многие факторы, и установление корреляции с одним из них может лишь указать на соответствие гипотезе, но, конечно, не однозначно решить ее истинность.

Приведем несколько примеров.

При подъеме в горы с высотой растет естественный фон радиации. Осадочные породы равнин сменяются базальтом, гранитом со значительно более высоким содержанием урана и тория. Чем выше подъем, тем сильнее влияние космических излучений в общей облученности организмов. Увеличивается интенсивность ультрафиолетовых лучей. И вот на какой-то высоте вы попадаете в зону альпийских лугов. Обычные травы, цветы, растения здесь в два-три раза выше, мощнее, чем в долинах! Вас поражает буйство растительности. Поднимитесь еще на несколько сот метров выше. Уровень радиации ока-

жется еще выше — он превысил оптимум, и пышная растительность пропадает — кругом голые скалы. Объяснение увлекательное, но строго не доказанное.

По данным А. А. Богомольца и И. В. Базилевича, наибольшее количество долгожителей обнаружено в горах Дагестана и Абхазии. Согласно переписи, количество долгожителей в Дагестане и Абхазии значительно превосходит их количество среди равнинного населения Поволжья. Можно предполагать, что это связано с повышенным радиоактивным фоном в горах, но для утверждения такой связи, к сожалению, еще не хватает более точных данных.

Интересное статистическое обследование было проведено Н. А. Фригеро и Р. С. Стоу в Аргоннской национальной лаборатории в США. Они определили естественный радиоактивный фон в 50 штатах Северной Америки. При этом оказалось, что если в среднем в этих штатах фон был равен 130 мрад/год, то в 14 штатах он был немного понижен (118 мрад/год), в 14 достигал 170 мрад/год и в 7 был значительно повышен — в среднем 210 мрад/год. На основании статистических данных в этих штатах была определена за 15 лет общая смертность, смертность от злокачественных опухолей и частота генетических повреждений. Вместо ожидаемой положительной корреляции была получена отрицательная, т. е. чем выше был естественный фон радиации, тем здоровее было население, уменьшалась смертность, смертность от злокачественных опухолей, от врожденных уродств в детском возрасте. Автор обследовал около 20 других факторов, таких, как годовая температура, выпадение осадков, процент урбанизации, состояние медицинской помощи, характер питания, уровень образования, количество безработных, насыщенность воздуха парами бензина, и нигде не обнаружил той четкой корреляции, которая наблюдалась по отношению к естественному радиоактивному фону.

Конечно, и это исследование ввиду множества возможных действующих факторов (химические мутагены и канцерогены) не решает вопроса, но хорошо согласуется с представлением о положительной роли естественного фона радиации.

В связи с рассматриваемой проблемой нельзя пройти мимо исследований А. Л. Чижевского, показавших на-

личие определенной связи между размножением патогенных микроорганизмов, возникновением эпидемий и периодической деятельностью Солнца. На примере эпидемий холеры, гриппа, возвратного тифа он выделяет 11-летний период вспышек этих заболеваний, коррелирующих с солнечной активностью.

В 30-х годах нашего столетия А. Л. Чижевский выдвинул гипотезу о «специфических излучениях» в годы, следующие за максимальной деятельностью Солнца, «регулирующих жизнедеятельность патогенных микробов». Следует подчеркнуть, что, по данным Чижевского, максимумы вспышек возвратного тифа, чумы, дифтерии (до введения вакцинации), как правило, возникали на 1—2 года позже максимума солнечной активности. Сопоставим эти наблюдения с современными данными о влиянии солнечной активности на уровни радиации на Земле.

Согласно теории солнечного ветра (1966—1967 гг.) в годы повышенной солнечной активности усиливается выделение потока плазмы, состоящей в основном из низкоэнергетических протонов и электронов, летящих от Солнца со скоростью нескольких сот километров в секунду. Солнечный ветер создает межпланетное магнитное поле и в значительной мере искажает дипольное распределение магнитного поля Земли. Протоны солнечного ветра, имеющие малую энергию, отклоняются магнитным полем Земли и не влияют на естественный радиационный фон на ее поверхности. Малоэнергетичные галактические космические лучи тоже отклоняются от солнечной системы межпланетным магнитным полем, создаваемым солнечным ветром.

Таким образом, в годы повышенной солнечной активности усиливается солнечный ветер, увеличивается магнитная защита нашей планеты от малоэнергетичных галактических космических лучей и вклад космических лучей в естественный фон радиации на поверхности Земли уменьшается. Космическая радиация составляет около 30% всего естественного фона, причем на поверхности Земли он создается в основном высокоэнергетичными компонентами космических излучений.

Таким образом, облученность земных организмов в зависимости от 11-летнего периода солнечной активности будет колебаться в пределах 10—20% естественного радиационного фона. Это значит, что в годы активного

Солнца облученность окажется на 10—20% ниже средней величины, а в период спокойного Солнца — на ту же величину выше.

Но в период максимального появления пятен на Солнце наблюдаются солнечные вспышки, приводящие к выбросу огромного количества энергии в форме видимой, ультрафиолетовой и рентгеновской радиации, выброса высокоэнергетических протонов и  $\alpha$ -частиц. Это так называемое солнечное космическое излучение может вызвать увеличение мощности дозы излучения в верхних слоях атмосферы. За 20 лет, с 1942 по 1962 г. было зарегистрировано 13 подобных подъемов облученности и закономерно резко увеличилась мощность радиации в верхних слоях атмосферы. На высоте 15—20 км над поверхностью Земли мощность дозы излучения может возрастать в 100 и более раз в зависимости от величины вспышки. Мощность дозы космического излучения всегда резко возрастает с высотой, составляя на высоте 15—20 км величины порядка 120 мрад в сутки, поэтому во время солнечной вспышки она может в сутки достигать десятков рад.

Из работ Ю. Розена, К. Юнга и других ученых следует, что в тропических широтах Земли мощные потоки нагретого воздуха уносят в стратосферу значительные количества микроорганизмов, бактерий, спор. Они достигают высоты 15—20 км. Именно на этой высоте образуется слой с максимальным содержанием микрочастиц (аэронов), достигающих 10 частиц на 1 см<sup>3</sup>. На этой же высоте в годы активного солнца под влиянием солнечных вспышек микроорганизмы будут подвергаться облучению (к действию высокоэнергетичных протонов прибавится и действие короткого ультрафиолета) в дозах, достаточных, чтобы вызвать впоследствии стимуляцию их размножения.

Исследования по миграции радионуклидов в атмосфере показали, что микрочастицы стратосферы из экваториальных широт передвигаются к северу и югу и в районах 30—60° широт поступают в тропосферу, а затем через 1—2 года с осадками выпадают на поверхность Земли. Невольно возникает предположение, что максимумы эпидемий, возникающих, по данным Чижевского, спустя 1—2 года после максимума солнечной активности, связаны с облучением микроорганизмов в страто-

сфере и их последующей миграцией на поверхность Земли.

Как известно, в клетках, находящихся в покое, эффект облучения может длительно сохраняться до начала их активного размножения. Конечно, это только рабочая гипотеза для дальнейших исследований. Однако она основывается на точно установленных фактах.

Подводя итог всему сказанному выше о действии ионизирующей радиации на биосферу, на различные живые организмы на Земле, можно заключить, что «невидимые лучи» в достаточно высоких дозах несут гибель, лучевую болезнь, тяжелые отдаленные последствия всем живым организмам. Облучение сложного биоценоза, включающего различные виды живых организмов с неодинаковой радиочувствительностью, приведет к вымиранию радиочувствительных организмов, сохранению, а возможно, и усиленному распространению радиоустойчивых представителей флоры и фауны.

Для человека дозы порядка 100 рад и выше уже представляют серьезную опасность. По мере снижения дозы облучения уменьшается вероятность проявления вредных радиобиологических эффектов. Для млекопитающих и человека, как мы видели выше, нет строго научных данных о вреде облучения в дозах ниже 20—10 рад. Можно с уверенностью утверждать, что дозы в пределах колебаний естественного радиационного фона (а тем более составляющие доли такого фона) не несут прямой опасности для живых организмов, включая и человека. Более того, очень низкие дозы ионизирующей радиации могут стимулировать деление клеток, ускорять рост и развитие, повышать иммунную сопротивляемость организма к неблагоприятным факторам внешней среды, усиливать восстановительные процессы, тем самым они могут быть полезными в ряде случаев и для человека.

Не лишена основания гипотеза (пока еще строго не доказанная), что естественный радиационный фон не только не вреден, но даже необходим для нормального существования биосферы. Следует подчеркнуть, что значительные изменения уровня естественного радиационного фона, хотя они и безвредны и даже полезны для отдельных видов биоценоза, все же мало желательны в силу их возможного воздействия на эволюционно сложившиеся экологические взаимоотношения в нем.

## НЕВИДИМЫЕ ЛУЧИ УПРАВЛЯЮТ ЖИЗНЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ

В наши дни после освоения методов получения искусственных радиоизотопов, создания атомных реакторов и различных систем ускорителей ионизирующая радиация стала легкодоступным физическим фактором, находящим все новое и новое применение в человеческой деятельности. Такие радиоактивные изотопы, как кобальт-60 и цезий-137 (жесткое  $\gamma$ -излучение, длительный период полураспада), прочно заняли свое место как удобные излучатели, стоимость которых быстро снижается по мере увеличения масштабов их применения и усовершенствования методов производства.

Благодаря ядерным реакторам все шире используются не только  $\gamma$ -излучение, но и потоки нейтронов различной энергии, а современные ускорители могут дать широкий ассортимент лучей, состоящих из электронов, протонов, дейтронов, осколков ядер тяжелых атомов,  $\pi$ -мезонов и многих других.

Из предыдущих глав нам уже известно, сколь могучим фактором являются эти невидимые излучения в случае их воздействия на живые организмы. Мы рассматривали излучения с точки зрения их опасности, безвредности или пользы для биосферы, живых организмов и, конечно, человека. Нас особенно интересовали те уровни радиации, которые существуют на Земле и которые создает человек в процессе своей деятельности.

В этой главе мы рассмотрим те же воздействия, но с другой точки зрения. Нас будет интересовать, какую пользу может получить человечество от сознательного, целенаправленного использования воздействия ионизирующей радиации на живую природу. На каких научных основах может и должно базироваться практическое использование «невидимых лучей» в таких сферах человеческой деятельности, как медицина, сельское хозяй-

ство, пищевая и микробиологическая промышленность. Как использовать радиацию для повышения благосостояния общества, увеличения его ресурсов, укрепления здоровья, улучшения производительности многочисленных производств, связанных с сырьем растительного или животного происхождения.

Хорошо известно, что результат воздействия любого физического фактора (ионизирующая радиация не является исключением) на живые организмы зависит прежде всего от дозы, от количества поглощенной энергии. Из предыдущих глав мы узнали, что в малых дозах ионизирующая радиация может стимулировать течение многих биологических процессов. При несколько больших дозах начинает заметно проявляться мутагенное действие радиации. В еще более значительных дозах облучение будет задерживать и даже полностью подавлять рост, развитие организма. И наконец, при дальнейшем увеличении дозы воздействия начинается массовая гибель клеток, тканей, живых организмов.

Следует подчеркнуть, что разделение на малые, средние и большие дозы облучения весьма условно, так как зависит от радиочувствительности облучаемого организма, которая, как мы видели, выше, может меняться в значительных пределах у представителей разных видов. Так, например, для растений дозы в пределах 500—1000 рад часто стимулирующе действуют на развитие — их следует отнести к относительно малым дозам, но эти же дозы для теплокровных животных могут быть смертельными, т. е. они будут отнесены к классу больших доз облучения.

В табл. 16 приведена схема практического использования различных уровней радиации. На ней показано, что в 18 видах практической деятельности человек использует «невидимые лучи». Область их применения расширяется с каждым годом. Рассмотрим вкратце успехи, трудности и перспективы в некоторых из перечисленных областей применения.

## **Радонотерапия в медицине**

Это самый древний и весьма действенный путь использования общего стимулирующего действия очень малых доз радиации для повышения сопротивляемости на-

Таблица 16

## Практическое использование ионизирующей радиации

Диапазон доз	Радиобиологический эффект	Область практического применения
Малый	Стимуляция биологических процессов	Радонотерапия в медицине Предпосевное облучение семян в сельском хозяйстве Предынкубационное облучение яиц в птицеводстве Стимуляция оплодотворения на рыбозаводах Ранняя выгонка цветов в садоводстве
	Задержка и остановка развития	Увеличение сроков хранения пищевого картофеля в весенне-летние месяцы Лучевое ослепление черенков в виноградарстве Лучевой андрогенез в шелководстве Уничтожение насекомых—вредителей сельского хозяйства
Средний	Мутагенный эффект	Получение новых ценных сортов сельскохозяйственных растений Получение высокопродуктивных промышленных штаммов микроорганизмов в микробиологической промышленности
	Снижение иммунитета	Облучение при пересадке органов и тканей в медицине Отдаленная гибридизация в плодоводстве и виноградарстве
	Частичная гибель клеток	Удлинение сроков хранения сельскохозяйственной продукции Радиотерапия злокачественных опухолей в медицине
Большой		Лучевое консервирование продуктов в пищевой промышленности
	Полная гибель клеток	Лучевая стерилизация материалов, препаратов и тканей в медицине Лучевое обезвреживание отходов крупных животноводческих хозяйств

шего организма различным неблагоприятным факторам. Еще задолго до открытия человеком ионизирующих излучений народная медицина обнаружила природные источники, обладающие целебным действием. Так, например, уже более двух столетий назад стали известны целебные свойства источников Цхалтубо, и только в 1913 г. Н. Д. Купчис обнаружил в них значительное содержание радона, а в 30—40-х годах было уже экспериментально доказано, что лечебный эффект, наблюдаемый после приема ванн и питья воды из этих источников, обязан очень слабому облучению во время месячного прохождения лечения. Примерно такова же история всемирно известных радиоактивных источников: Баден-Бадена в ФРГ, Брамбаха в ГДР, Масутами-Спрингс в Японии и многих других.

Как мы уже отмечали в главе 6, радонотерапия с успехом применяется при самых различных заболеваниях, что объясняется воздействием не на пораженный орган, а на весь организм — т. е. общим оздоравливающим действием, мобилизацией всех защитных сил организма, нормализацией его естественных функций. Это позволяет организму преодолевать те нарушения, которые являются причиной заболевания.

Действительно, в многочисленных экспериментальных исследованиях на животных, наблюдениях и анализах у человека было показано, что под влиянием очень небольших облучений за месяц лечения стимулируется активность ряда систем организма. Так, например, почти в два раза повышается активность макрофагов. Это одна из ведущих систем, стоящих на страже нашего здоровья, постоянно уничтожающих в нашем организме отмершие клетки, посторонние инфекционные начала. Таким образом, активируются те клетки, которые, по меткому выражению И. И. Мечникова, являются «подметателями» в нашем организме, очищающими его от посторонних вредных вторжений.

Чешские ученые на морских свинках показали резкое возрастание синтеза лизоцима в тканях и крови животных после радонотерапии. Его содержание растет в процессе воздействия радоновых ванн и затем в течение нескольких месяцев удерживается на более высоком уровне по сравнению с нормой.

Лизоцим — один из важных компонентов общего неспецифического иммунитета животных организмов, повышающий их сопротивляемость различным инфекциям. Под влиянием радоновых ванн усиливается иммуногенез (увеличивается в крови титр агглютининов, антител). При радонотерапии усиливается общий обмен организма, что способствует ликвидации различных патологических отклонений от нормы и повышает общий жизненный тонус.

Естественно возникают вопросы: почему столь слабые воздействия радиации на человеческий организм оказывают значительный оздоровительный эффект? Каковы механизмы такого действия радиации? Как понять наблюдаемые явления на молекулярном уровне?

Прежде всего необходимо подчеркнуть, что речь идет о влиянии на естественные регуляторные процессы. Малые дозы радиации ничего не разрушают и ничего не создают — они только способствуют проявлению имеющихся возможностей у организма, т. е. играют роль спускового устройства, триггера-эффектора<sup>1</sup>, как бы запускающего в действие ту систему, которая до этого находилась в нерабочем или малоактивном состоянии.

Регуляция жизненных процессов достаточно хорошо изучена. Ведущее место в такой регуляции занимают реакции, возникающие в биомембранах клетки. Рассмотрим в общем виде современные представления о стимуляции развития, о переходе из состояния физиологического покоя в активное.

Покоящаяся клетка имеет в своем геноме всю нужную информацию для перехода из одного состояния в другое. Заключенная в определенных участках ДНК, она зарепрессирована, не считывается в синтезе информационной РНК, и клетка пребывает в покое.

Но вот в клетку попадает одна молекула гормона, несущая функции возбудителя, — триггера. Связываясь с молекулой рецептора, включенного в мембрану клетки, она вызывает изменение липидной структуры мембраны. В результате многие ферменты, включенные в липидный слой мембраны, из неактивного состояния переходят в активное. Особый интерес представляет активация

<sup>1</sup> Триггер-эффектор — вещества, возбуждающие в организме те или иные процессы. Все гормоны действуют как триггер-эффекторы.

фермента аденилатциклазы, которая в активном виде превращает АТФ в биологически активное соединение, именуемое циклическим аденозинмонофосфатом или, коротче, ц-АМФ.

Надо помнить, что ферменты работают с поразительной скоростью. Одна молекула активированной аденилатциклазы за секунду сумеет синтезировать сотни молекул ц-АМФ. Повышение уровня ц-АМФ ведет к активации протеинкиназы, запускающей механизм дерепрессирования ряда генов, на которых и начинается синтез информационной РНК. Из ядра и-РНК поступает в цитоплазму, а там по программе, заложенной в ней, синтезируются ферменты, необходимые для перехода клетки в следующую фазу развития. Так, ничтожный толчок — действие только одной молекулы гормона — приводит к пуску сложной цепи процессов. В результате проявляется уже видимый эффект на всей системе: клетка делится, дифференцируется, из состояния покоя переходит в активное состояние метаболизма.

Богатые энергией кванты ионизирующей радиации, проникая в биомембраны, будут образовывать на своем пути весьма биологически активные перекиси и семихиноны. Достаточно образования одной-двух молекул таких активных веществ в липидном слое биомембраны, чтобы произошли изменения ее структурной упаковки, ведущие к активации ферментов, включенных в эту структуру, в том числе и аденилатциклазы. (То, что подобная активация под влиянием малых доз облучения действительно происходит, было показано в эксперименте.) Далее все идет по естественному пути, описанному выше. Очень малое первоначальное воздействие приводит к активации именно тех систем, которые в норме, согласно генетической программе, должны функционировать в данных клетках, тканях и органах. Но опасайтесь увеличивать дозу воздействия. Массовое образование тех же перекисей и хинонов оказывает токсическое действие на мембраны, клетки и организм в целом. Если при ничтожно малых дозах облучения в процессе радионотерапии вероятность повреждений уникальных генетических систем практически равна нулю, то с повышением дозы она может приобрести практически значимую величину — со всеми вредными для организма последствиями, которые мы рассмотрели в главе 4.

## Предпосевное $\gamma$ -облучение семян сельскохозяйственных культур

Исстари и до наших дней в погожие весенние дни человек высевает семена в почву, ухаживает за всходами, с упованием глядит на небо, дарующее влагу дождя, тепло и свет солнца, чтобы налилось зерно, созрел урожай, который несет ему жизнь, чтобы получить из одного посеянного зернышка 10, 20, 40 полновесных семян; собрать с засеянного гектара 20, 40, 60 ц зерна; иметь в собранном урожае повышенное содержание белка, масла, сахара; добиться более раннего созревания урожая или собрать его до наступления холодов — все это задачи первостепенной важности, от правильного решения которых зависит благосостояние народа, процветание страны.

Для получения высоких урожаев используются передовые достижения науки и техники. Почва обрабатывается не вручную, мотыгой или сохой, а мощными тракторами с сельскохозяйственной техникой. В нее вносятся в виде удобрений все необходимые для развития растений элементы. Для посева используют сортовые семена, терпеливо выведенные на селекционных станциях. Широко применяют мелиорацию и искусственное орошение полей. Растущие растения обрабатывают культиваторами, дают подкормку, их охраняют от насекомых-вредителей. Урожай убирают специальными уборочными машинами.

Урожаи растут, но не беспредельно. В каждой стране, области, районе устанавливается определенный лимит в зависимости от почвенно-географических и климатических условий, культуры земледелия, уровня технической и химической оснащенности, качества районированных сортов. Повысить этот лимит оказывается нелегко. Как показали радиобиологи, «невидимые лучи» в этом могут оказать немалую помощь сельскому хозяйству. Посмотрим на задачу повышения и улучшения качества урожая не с агрохимических, а с современных общепромышленных позиций.

Все развитие растения, его цветение и плодообразование запрограммировано в генетическом материале семени. В процессе эволюции и последующей длительной селекции данного сорта в молекулах его ДНК сложился

тот уникальный набор генов, который при правильном ведении семенного хозяйства передается из поколения в поколение, обуславливая передачу всех наследственных свойств, в том числе определенного типа обмена веществ, который приводит к формированию конечного результата — урожая.

Можно изменить и количество и качество урожая, изменяя генетическую программу растения. Ионизирующая радиация является одним из мощных факторов, меняющих наследственные программы развития. Предпосевное  $\gamma$ -облучение семян ставит задачу полностью сохранить их наследственные свойства, не затронуть генетическую программу развития, но повысить количество и улучшить качество урожая, затрагивая другие системы. Что же это за системы?

Каждый агроном-практик знает, что иметь высоко-сортные семена, т. е. семена с наиболее хорошей генетической программой, — существенное условие успеха, но далеко не единственное. Мало иметь хорошую генетическую программу, надо создать условия для ее возможно более полной реализации. Известно, что для реализации генетической программы, заложенной в хроматине клеток зародыша семени, т. е. для его прорастания, роста, развития, цветения и созревания необходимы влага, тепло, свет, макро- и микроэлементы почвы и углекислота в атмосфере. Наибольший эффект будет при определенном оптимуме каждого из этих многочисленных факторов. Понизьте или повысьте любой из перечисленных факторов — и реализация генетической информации пойдет с иной скоростью, конечный результат ухудшится.

В условиях любого хозяйства почти никогда не достигается оптимум всех факторов, т. е. возможности, заложенные в генетической программе, не реализуются в полной мере. Таким образом, приходится тем или иным приемом способствовать более полной реализации (при данных условиях) максимальных возможностей данного сорта. Именно такую стимуляцию, оказывается, и способны осуществить  $\gamma$ -лучи при предпосевном облучении семян в оптимальных дозах.

Чем же объясняется подобное свойство ионизирующей радиации?

$\gamma$ -кванты, кванты ультрафиолетового излучения Солнца и, наконец, кванты видимого света — это только

различные представители (с различной энергией) лучистой энергии, в потоках которой шла эволюция жизненных форм на нашей планете и возникла именно такая форма (растения), которая не может существовать и развиваться без лучистой энергии видимого света.

Кванты видимого света по сравнению с ультрафиолетовым излучением,  $\gamma$ -квантами, наименее богаты энергией. Чтобы использовать их энергию, у растений есть специальные молекулы — пигменты, поглощающие видимые лучи той или иной длины волны. При этом молекула пигмента переходит в энергетически возбужденное состояние, что дает ей возможность осуществить определенные реакции. Всем известно, что молекулы хлорофилла за счет энергии поглощенных квантов красного света осуществляют фотосинтез. Гораздо менее известны другие фотореакции, связанные с возбуждением молекулы рецептора квантом лучистой энергии, но которые активируют геном, заставляют его реализовывать заложенную в нем информацию.

Эти процессы были хорошо изучены на семенах обычного салата. Если взять жизнеспособные сортовые семена салата и выдержать их в темноте при низкой температуре, а потом в темноте поместить в условия, благоприятные для прорастания (влажа, кислород, тепло), то такие семена не прорастают. Генетическая информация, необходимая для прорастания, у них сохранена, но она не может проявиться в темноте, так как геном блокирован, и нет фактора, снимающего этот вынужденный покой. Облучим такие семена красным светом в течение 10—15 мин и перенесем их в прежние условия. Семена начнут прорасти. Достаточно было поглощения нескольких квантов лучистой энергии, чтобы «пробудить», казалось бы, безжизненные семена.

Физиологи растений детально исследовали это явление. Оказалось, что в мембранах клеток зародыша находится особый белок — фитохром, поглощающий кванты красного света. Поглотив лучистую энергию, он переходит в возбужденное состояние, меняет свою пространственную структуру, что приводит к изменению липидного слоя мембраны и активации ряда ферментов, в том числе аденилатциклазы. Начинается синтез циклической АМФ. Это вещество, как нам уже известно, непосредственно участвует в деблокировании генома. Начинается

синтез информационной РНК и соответствующих ферментов, т. е. реакции обмена, которые необходимы для прорастания. Кванты лучистой энергии оказались тем спусковым устройством, которое стимулировало к жизни готовую систему, заключенную в микроструктурах семени, в геноме его клеток.

А как действуют кванты с гораздо большей энергией —  $\gamma$ -кванты? Известно, что, помимо ионизации, они способны и возбуждать любые молекулы. Автор этой книги с сотрудниками провели эксперименты с семенами салата, находящимися в состоянии покоя, в полной темноте. Очень малые дозы (50 рад) не оказывали эффекта. Облучение в дозе 100 рад вызвало прорастание 5—10% семян. Оптимальной оказалась доза в 200 рад: она дала тот же эффект, что и облучение красным светом. Особенно сильный эффект давало  $\gamma$ -облучение в 200 рад на фоне красного света, значительно усиливая действие последнего.

Интересно, что эффект прорастания у семян салата можно вызвать, действуя на них растительным гормоном — гиббереллиновой кислотой. И красный свет, и гиббереллиновая кислота пробуждают к прорастанию около 30% взятых для эксперимента семян. Но если действуют одновременно оба фактора, то прорастает почти 100%. Близкая картина получилась и при облучении  $\gamma$ -квантами на фоне гиббереллиновой кислоты. Все эти эксперименты указывают, что стимулирующее действие малых доз  $\gamma$ -радиации тесно связано с возбуждением молекул в мембранах зародыша, с их вмешательством в процессы, активирующие геном.

Действительно, во многих исследованиях было показано, что под влиянием  $\gamma$ -облучения (в очень небольших дозах) меняется проницаемость биомембран для молекул и ионов, изменяется скорость транспорта таких важных для процессов регуляции ионов, как ионы калия, натрия, кальция, магния. При этом изменения в одном направлении при малых дозах облучения, благоприятном для процессов жизнедеятельности, сменялись противоположным, неблагоприятным действием при больших дозах облучения. Первичные продукты окисления полифенолов, ненасыщенных жирных кислот, образующиеся при  $\gamma$ -облучении растительной ткани, принимают активное участие в изменениях биомембран и, как следствие, в активации

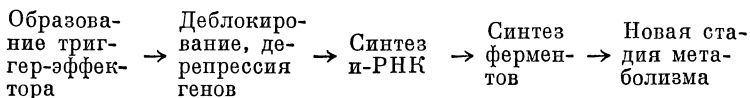
ции и угнетении генома, т. е. в стимуляции или замедлении развития.

Если подействовать этими веществами в концентрации  $10^{-3}$ — $10^{-4}$  М на семена, то можно наблюдать угнетение их развития, роста, аналогичное их облучению в дозе несколько тысяч рад. Но достаточно снизить концентрацию этих веществ в сто—тысячу раз, и они будут оказывать стимулирующее воздействие (увеличивая процент проросших семян, ускоряя рост проростков), подобно действию малых доз радиации, что указывает на их непосредственное участие в этом явлении.

Радиобиологи тщательно исследовали процессы, происходящие в облученных семенах растений во время их прорастания и дальнейшего развития. Накоплен большой экспериментальный материал на молекулярном, субклеточном, клеточном и организменном уровнях. Опираясь на эти данные, можно следующим образом представить цепь событий, лежащую в основе повышения урожая и улучшения его качества при предпосевном  $\gamma$ -облучении семян.

В момент облучения в структуре семян возникает множество длительно живущих свободных радикалов и возбужденных молекул. Основная их часть находится в лигнине оболочки, в белках и липидах биомембран. В первые часы после намачивания семян при доступе кислорода эти радикальные и возбужденные формы молекул будут давать перекиси, хиноны, что приведет к изменению структуры биомембран, изменению активности ферментов, связанных с мембранами, изменению транспорта ионов, т. е. отразится на регулирующих функциях биомембран.

Перекисные и хиноидные молекулы (вероятно, возникающие и при нормальном развитии) будут играть роль неспецифических триггер-эффекторов, дерепрессирующих через циклическую АМФ определенные участки генома. Под влиянием облучения как бы запускается цепь событий, лежащая в основе развития:



Действительно, экспериментально было показано, что в первые же часы намачивания в семенах, облученных

в стимулирующих дозах, почти в два раза интенсивнее идет синтез и-РНК, синтез белков ферментов. Интенсификация приводит к усилению на самых ранних стадиях развития синтеза в клетках зародыша специфического триггер-эффектора — гиббереллиновой кислоты. Этот важный природный гормон, поступая в клетки аллейронового слоя, запускает там синтез гидролизующих ферментов ( $\alpha$ -амилазы, протеазы, липазы). В облученных семенах в запасных частях начинает интенсивнее идти гидролиз углеводов, белков и липидов, продукты их гидролиза в большем количестве притекают к клеткам зародыша, что вызывает интенсификацию их роста, ускорение деления, дифференциации и увеличение синтеза других ростовых гормонов — ауксина, кинетина. Повышенный уровень неспецифических и специфических триггер-эффекторов в клетках проростков семян, облученных стимулирующей дозой, приводит к усилению образования таких важнейших органелл клеток, как митохондрии и хлоропласты.

Экспериментально показано в проростках из облученных семян, что идет усиление дыхания, увеличение содержания хлорофилла, повышение интенсивности фотосинтеза (по отношению к контролю). Несомненно, что все это существенно для дальнейшего ускорения роста и перехода в следующую стадию развития.

Повышенное содержание неспецифических и специфических триггер-эффекторов (гормонов роста) вызывает на следующих стадиях развития снятие репрессии генома не только в клетках верхушечной точки роста, куда обычно направляются гормоны, но и в боковых почках, что приведет к увеличению у стимулированных растений боковых побегов, зеленой массы.

Действительно, было показано, что у растений, развивающихся из семян, облученных в стимулирующих дозах, образуются боковые ветви, усиливается кустистость, происходит дополнительное ветвление. Значительное увеличение зеленой массы у таких растений (на 20—40% по сравнению с контрольным) в основном вызвано пробуждением точек роста, остающихся в глубоком покое в обычных условиях.

В течение длительного периода роста в растениях, кроме синтеза углеводов, липидов, белков и нуклеиновых кислот, количественного увеличения биомассы, происхо-

дят обменные процессы, которые приводят к образованию нового триггер-эффектора — так называемого фактора цветения. Образуется он в ничтожно малом количестве, что еще сейчас создает трудности для его выделения и определения химической природы. По последним данным, циклические пуклеотиды и гиббереллиновые кислоты играют ведущую роль в проявлении активности фактора цветения.  $\gamma$ -облучение семян, вызвавшее ускорение начальных фаз развития, повышение уровня гормонов роста, усиление фотосинтеза, приводит и к ускорению синтеза фактора цветения. Он появляется раньше и в большем количестве. На это указывают многочисленные наблюдения над развитием растений из облученных семян: они зацветают на несколько дней раньше контрольных, у них большее количество клеток претерпевает дифференциацию, необходимую для образования плодоносящих органов.

В процессе онтогенеза растение претерпевает несколько фаз развития. Каждая из них возникает благодаря образованию определенного уровня триггер-эффекторов в предыдущей фазе развития. Стимуляция, вызванная облучением на первых фазах развития пробуждающегося семени, инициирует более раннее и более интенсивное образование эффекторов в последующих стадиях, что приводит к общей стимуляции развития и увеличению урожая. Анализ урожая, полученного от посева облученных в оптимальной дозе семян, показал, что происходит не только увеличение его количества (в среднем на 10—15%), но и изменение химического состава, т. е. качества. В моркови, например, увеличивается содержание каротина, в сахарной свекле — сахарозы, у масличных культур — содержание масел.

Эти наблюдения показывают, что при предпосевном  $\gamma$ -облучении семян в стимулирующих дозах не происходит изменения эволюционно сложившегося типа обмена веществ для различных видов растений. Усиливается лишь интенсивность данного обмена. Это делает понятным, почему у моркови, растения, у которого обмен веществ направлен на синтез каротина, увеличивается именно содержание каротина, а у сахарной свеклы, в которой длительной селекцией выработан обмен, направленный на накопление в ее клубнях сахарозы, увеличивается содержание именно этого вещества.

Согласно представлениям, выдвинутом А. М. Кузиным в 1974 г., о роли триггер-эффекторов в стимуляции развития растений  $\gamma$ -облучением семян, осуществляется эстафетная передача результатов начального облучения семян на последующие стадии онтогенеза. Каждая стадия развития наступает раньше и проходит интенсивнее, что и ведет к повышению урожая.

Как использовать способность  $\gamma$ -лучей повышать всхожесть семян, стимулировать рост, вызывать к развитию большее количество почек, увеличивать урожай и улучшать его качество в практике сельского хозяйства? Для этого требовалась новая техника, позволяющая быстро облучать семена в нужной дозе, непосредственно в полевых условиях, не нарушая правил агротехники. Впервые такая техника была создана в Советском Союзе.

В качестве источника радиации взяли цезий-137, нуклид, излучающий не очень жесткие  $\gamma$ -лучи, что давало возможность создать вокруг него сравнительно легкую, но надежную защиту. Источники цезия-137 располагались радиально вокруг рабочего канала, через который проходили семена. Механические устройства позволяли точно регулировать скорость прохождения зерна и тем самым дозу  $\gamma$ -облучения, которую они за это время получали. Установка смонтирована на автомобиле ЗИЛ-131, снабжена транспортерами и другими приспособлениями, позволяющими непрерывно пропускать зерно через облучатель, а затем загружать в сеялки. Мощность источников радиации позволяет обрабатывать около 1 т семян в час, в зависимости от дозы. Эта самоходная автоматизированная установка получила название «Колос». В 1968 г. по инициативе Института биологической физики АН СССР с помощью этой установки начались широкие производственные испытания метода предпосевного  $\gamma$ -облучения семян. Производственные испытания этого метода проводились в течение трех лет в Молдавской ССР в содружестве с Кишиневским институтом сельского хозяйства Молдавской ССР. За три года было облучено 230 т семян, проанализировано 202 производственных опыта на общей площади 9193 га. В среднем урожай зерна кукурузы увеличился на 11—13% и силосной массы на 30%.

С 1972 г. метод предпосевного облучения семян был внедрен в Молдавской ССР в практику. В 1975 г. на

полях Молдавии работало уже 8 установок «Колос», в Павлодарской области Казахской ССР — 10 установок. Началось внедрение метода в Киргизской ССР (две установки «Колос»), в Грузинской ССР и Белорусской ССР (по одной установке), в Рязанской области РСФСР (одна установка).

В 1977 г. начались испытания метода в северных районах нашей страны по инициативе филиала Академии наук Коми АССР. Установки «Колос» работают в Болгарии и на полях ГДР. Метод дал экономически выгодные результаты на ряде сельскохозяйственных культур. Облучение семян кукурузы позволяет увеличить урожай зерна и силосной массы, а при  $\gamma$ -облучении подсолнечника повышается не только урожай, но и содержание масла в ядрах семени. Этот прием дает возможность увеличить сахаристость сахарной свеклы, содержание каротина в моркови, витамина С в капусте. Метод очень перспективен в тепличных хозяйствах. Его широко применяют в Болгарии при получении раннеспелых помидоров.

Большая исследовательская работа, проведенная НИИ картофельного хозяйства РСФСР, показала перспективность предпосевного облучения клубней картофеля ускоренными электронами. При этом увеличивается урожай на 15% и повышается питательная ценность картофеля за счет увеличения содержания крахмала, витамина С и содержания незаменимых аминокислот в белках. В настоящее время разрабатывается производственная установка для облучения клубней картофеля ускоренными электронами.

Метод предпосевного облучения представляет интерес для труднопрорастающих семян и медленнорастущих кустарниковых и лесных пород. В лабораторных и полупроизводственных условиях показана перспективность метода для обработки семян ценных лекарственных растений. Так, например, у солодки уральской на 20—40% увеличивается прорастание трудновсхожих семян и почти двукратно усиливается скорость роста корня, из которого добывается ценная для медицины глицирризиновая кислота. Предпосадочное облучение черенков значительно повышает их укоренение или прививку.

Ионизирующая радиация — не единственный физический фактор, способный стимулировать развитие семян

при всех прочих равных агрохимических условиях. Близкие результаты были получены при предпосевной обработке семян ультрафиолетовым светом, лучами лазера, светимпульсным облучением, токами высокой частоты.

Теория триггер-эффекторов активирующих геном клеток зародыша хорошо объясняет получение одинаковых эффектов при действии столь разнородных факторов. Все они, воздействуя на биомембраны, осуществляют первичную активацию генов (эволюционно подготовленных к восприятию сигнала от триггер-эффектора). Последующая картина усиленного синтеза новых триггер-эффекторов и эстафетная передача первичного импульса в дальнейшие стадии онтогенеза идут уже по одному механизму, и, несмотря на различную природу первичного толчка, конечный результат оказывается очень сходным. Действительно, все эти факторы дают близкие эффекты по ряду показателей — ускорению роста, более раннему цветению, увеличению урожая.

В практику следует внедрять такие факторы, которые более экономичны, легко могут применяться в полевых условиях, не требуют для своего применения высококвалифицированных специалистов и специальной техники. По этим показателям полевые передвижные установки с  $\gamma$ -излучателями имеют ряд неоспоримых преимуществ, что гарантирует им дальнейшее, все более широкое внедрение в практику передового сельского хозяйства.

## **Использование малых доз $\gamma$ -радиации в птицеводстве**

Современные крупные птицефабрики по индустриальному производству яиц и птицы требуют простых, доступных, легко вписывающихся в технологию методов, стимулирующих темпы роста и развития молодняка, повышающих яйценоскость несушек и тем самым увеличивающих продукцию фабрики. Прирост в 5—10% выражался бы в миллионах яиц дополнительной продукции. Вот почему в Советском Союзе и за рубежом были проведены исследования возможностей использования стимулирующего действия  $\gamma$ -радиации в птицеводстве.

Было исследовано облучение цыплят, яиц в процессе инкубации и прединкубационное облучение яиц.

При однократном облучении в диапазоне 10—25 рад некоторые авторы отмечали более быстрое развитие и половое созревание цыплят. Курочки облученной группы начинали яйцекладку на 7—10 дней раньше контрольных: яйценоскость за первые 12 месяцев увеличилась на 15—25%. Ученые показали ведущую роль облучения гипоталамуса, интенсификации нейросекреторных процессов в активации секреции гонадотропинов и длительной стимуляции овогенной функции яичника птицы. В данном случае теория триггер-эффекторов полностью объясняет наблюдаемые факты.

В главе 7 уже сообщались результаты облучения яиц в процессе инкубации и перед закладкой в инкубатор.

Несмотря на близость результатов всех трех приемов облучения, для внедрения в практику следует рекомендовать прединкубационное облучение яиц в дозе 4 рад как наиболее легко осуществимое в производственных условиях.

В настоящее время разрабатывается стационарный  $\gamma$ -облучатель, через который будут проходить лотки с яйцами перед закладкой в инкубатор. При малых дозах, необходимых для стимуляции, на процедуру облучения потребуются считанные секунды, что не нарушит ритм работы птицефабрики и позволит получить за год несколько миллионов дополнительной продукции.

### **Использование малых доз $\gamma$ -радиации в рыбной промышленности**

При строительстве гидроэлектростанций резко нарушен ход рыбы к ее естественным нерестилищам, и все большее значение стали приобретать рыбозаводы с искусственным оплодотворением икры, выращиванием мальков и их последующим выпуском в естественные водоемы. Среди многих трудностей, с которыми сталкиваются при этом работники рыбной промышленности, не последнее место занимает плохая оплодотворяемость икры в искусственных условиях и низкая жизнеспособность получаемых мальков. Применение «невидимых лучей» в рыбной промышленности весьма перспективно.

Исследование, проведенное канадскими учеными в 1972 г. по оплодотворению икры радужной форели спермой, облученной в дозах 25—400 рад, показало, что при относительно малых дозах в 25—50 рад увеличивается процент оплодотворения и выживаемость эмбрионов на ранних и поздних стадиях развития, что может быть с пользой применено на рыбозаводах. Полезный выход продукции значительно перекрывает вредный мутагенный эффект (уродства развития), проявляющийся при этих дозах крайне редко. Авторы не исследовали более низкие дозы, которые могут быть еще более перспективны для использования в практике.

## УВЕЛИЧЕНИЕ СРОКОВ ХРАНЕНИЯ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ ПУТЕМ $\gamma$ -ОБЛУЧЕНИЯ

В такой важной проблеме, как обеспечение населения полноценными продуктами питания, немаловажное значение имеет не только получение их в достаточном количестве, но и надежное хранение, предупреждение порчи.

По данным Всемирной продовольственной и сельскохозяйственной организации при ООН, более 15% добытых пищевых ресурсов погибает при хранении, а в тропических странах эта цифра возрастает до 30—35%. Часто портятся и не доходят до потребителя морские уловы, ягоды, плоды и фрукты. Прорастает и теряет пищевую ценность картофель в весенне-летние месяцы хранения. Насекомые-вредители портят при хранении зерно, крупу, муку, сухофрукты. Мясные продукты имеют весьма ограниченный срок хранения.

Известно, какие огромные усилия и большие затраты производятся, чтобы продлить сроки хранения ценных продуктов питания. Создана целая холодильная индустрия для предупреждения порчи путем замораживания. Используются (не без вреда для потребителя) многочисленные химикаты, чтобы сохранить от насекомых зерно в элеваторах, продлить хранение картофеля в овощехранилищах, законсервировать те или иные пищевые изделия. Консервная промышленность позволяет хранить после тепловой обработки мясные, рыбные и овощные продукты.

Естественно, когда ионизирующая радиация стала доступным фактором в промышленности, то во многих странах мира стали исследовать возможности применения радиации для увеличения сроков хранения продуктов питания. Введение в пищевую промышленность нового технологического приема требует доказательства его целе-

сообразности, технической осуществимости, экономической рентабельности, сохранения у обработанных продуктов пригодности для питания.

Наиболее быстро и убедительно был решен первый вопрос. Многочисленные исследования, проведенные в СССР, США, Франции и других странах, убедительно показали, что ионизирующее излучение дает подчас значительно лучшие результаты, чем другие химические и физические методы.

Еще в 1955 г. на Первой всемирной конференции по мирному использованию атомной радиации демонстрировался картофель, облученный перед закладкой в овощехранилища  $\gamma$ -лучами в умеренной дозе 8—10 крад. Облученные клубни не прорастали, не тратили свои компоненты на развитие проростков и имели вид полноценного картофеля. Контрольные клубни к этому времени (конференция проходила в августе) проросли и полностью утратили пищевую ценность.

Дальнейшие исследования показали, что при умеренном облучении угнетается лишь прорастание глазков, в то время как структура ткани, содержание крахмала, азотистых веществ, витаминов существенно не меняются. Таким образом, целесообразность применения  $\gamma$ -радиации для сохранения картофеля (а также лука, чеснока) в весенне-летние месяцы не вызывает сомнения.

Несколько большие дозы облучения потребовались, чтобы предупредить размножение насекомых-вредителей в зерне и продуктах его переработки при их хранении. Исследования показали, что взрослые насекомые устойчивы к действию радиации и для их уничтожения нужны очень большие дозы. Личинки на разных стадиях развития весьма радиочувствительны. Дозы в 20—25 крад полностью прерывали размножение насекомых-вредителей: их воспроизводительная функция радиочувствительна. Таким образом, если зерно (или продукты его переработки) облучить перед хранением в этих дозах, то вредители, обычно содержащиеся в нем в малом количестве, не размножаются и не портят продукт в процессе его хранения. Эксперименты с амбарным долгоносиком, мельничной огневкой, рисовым долгоносиком и другими вредителями показали полную целесообразность использования лучевой задержки развития насекомых-вредителей на практике. Применяя более высокие дозы (100—

300 крэд), можно подвергать дезинсекции сухофрукты, сушеные овощи и пищевые концентраты.

Быстрая порча ягод, плодов и фруктов при хранении вызывается развитием микроорганизмов, в первую очередь, плесени и грибкового мицелия. Если герметически упакованные ягоды или фрукты подвергнуть  $\gamma$ -облучению дозой 200—300 крэд, то можно значительно снизить их обсемененность плесневыми спорами и грибковым мицелием и тем самым продлить срок хранения. Так, например, облучение упакованной клубники дозой 250 крэд позволяет удлинить сроки хранения (при пониженной температуре) с 5—6 до 12—13 дней, что делает возможным ее транспортировку на значительные расстояния. На 10—15 суток продлевался срок хранения при температуре 22—25° С черешни, мандаринов, апельсинов, томатов, винограда при их облучении в упакованном виде дозами 150—250 крэд.

Используя «невидимые лучи», можно значительно продлить сроки хранения фруктовых соков. Обычный метод консервирования — прогревание до 80—100° С — неприемлем: меняется вид и вкус сока. Одно  $\gamma$ -облучение требует высоких доз ввиду сравнительной радиостойчивости дрожжей, вызывающих брожение и порчу сока при хранении. Радиобиологи предложили использовать свойство живых клеток резко повышать свою радиочувствительность при небольших изменениях температуры. Если прогрев соков до 50° С или их облучение в дозе 500 крэд не давали значительного продления сроков хранения соков, то одновременное действие радиации (500 крэд) и прогрева (50° С) приводило к прекрасному эффекту: виноградный и яблочный соки после такой обработки могли храниться более года при 20° С.

Хорошие результаты были получены при лучевой обработке упакованной свинины, ветчины, птицы. Жареные продукты при облучении их (600 крэд) в пластиковых пакетах могут храниться более года при комнатной температуре.

Многочисленные исследования показали перспективность использования  $\gamma$ -облучения для продления сроков хранения продуктов моря: рыбы, креветок, крабов и др. Так, например, облучение в дозах 400—600 крэд многих сортов свежей рыбы позволяет продлить ее хранение с 4—7 дней до 6—7 недель при 0—5° С. Усиливающее

действие облучения и прогрева было продемонстрировано на многих рыбных продуктах.

Таким образом, в настоящее время на основании обширных исследований стало ясным, что  $\gamma$ -радиация способна существенно продлить сроки хранения многих пищевых продуктов. Во многих странах также продемонстрирована техническая осуществимость лучевой обработки пищевых продуктов. В СССР, Канаде, Франции, Японии и ряде других стран сконструированы и испытаны производственные установки для поточного облучения различных пищевых продуктов: картофеля, зерна, плодов и ягод и др. Используются передвижные установки с цезием-137, смонтированные на автомобиле, снабженные транспортной техникой, перемещающей тару с продукцией через активную зону при дистанционном управлении и соответствующей защите. Существуют мощные стационарные установки с конвейерной подачей материала для облучения, монтируемые за бетонной или земляной защитой.

В настоящее время опытно-промышленные установки, действующие в различных странах, используют в качестве источников радиации более четырех миллионов кюри.

Экономическое обследование использования радиации для продления сроков хранения пищевых продуктов показало рентабельность этого приема при крупномасштабном применении с достаточно высокой производительностью. Так, например, экономические расчеты, проведенные в Канаде, СССР, Нидерландах для крупных промышленных установок, показали экономическую рентабельность их при задержке прорастания картофеля и лука, дезинсекции риса, бобов, кукурузы, пшеницы, муки. Экономическая выгода при хранении продуктов этим методом во много раз превышает затраты на этот процесс. Капитальные затраты на установки при полной их загрузке окупаются в течение двух-трех лет эксплуатации.

И, наконец, последнее, что требовалось для широкого внедрения в практику методов лучевой обработки пищевых продуктов — строгое доказательство возможности использования их для питания, их полноценности и безвредности для населения. Необходимо было также преодолеть и психологический барьер, существующий у населения, наслышанного о вредном действии радиации

и в силу этого опасаящегося «облученных» продуктов. Все эти вопросы настолько важны, что для их решения производилась многолетняя работа не только отдельными институтами в разных странах, но и в рамках крупных международных проектов, организованных Международным агентством по мирному использованию атомной энергии.

Прежде всего следует отметить, что распространенные среди населения опасения, не могут ли облученные продукты стать источниками радиации, ни на чем не основаны и являются следствием незнания элементарных законов физики. Дело в том, что  $\gamma$ -радиация и ускоренные электроны тех энергий, которые используются для облучения пищевых продуктов, по своим физическим параметрам не могут (при любых дозах) вызвать наведенную радиоактивность. Таким образом, для опровержения таких опасений даже не требовались специальные исследования.

Более серьезен вопрос о сохранении полноценных питательных свойств у облученных продуктов. Большая исследовательская работа показала, что в составе облученных продуктов отмечены очень небольшие изменения. Анализы пищевого картофеля, облученного в дозах 8—10 крад, показали, что в нем значительно лучше сохраняется крахмал, белки, азотистые вещества и витамины по сравнению с необлученным, который уже в весенние месяцы при прорастании начинал расходовать эти вещества. Анализы зерна, облучаемого с целью уничтожения вредителей в дозах 25—100 крад, показали отсутствие изменения в нем содержания белка, крахмала, жира и витаминного комплекса.

Облучение сухофруктов для дезинсекции не только не изменяло их вкус, цвет, запах и питательные свойства, но, напротив, повышало на 15—30% их набухаемость и скорость разваривания при кулинарной обработке.  $\gamma$ -облучение с целью продления сроков хранения кулинарных изделий из мяса, рыбы, битой птицы, свинины, бекона не отражалось на питательной ценности этих продуктов и их органолептических свойствах. Сравнение методов лучевой обработки пищевых продуктов с другими способами консервирования (замораживание или прогревание) показывает значительно лучшее сохранение свежего продукта при действии радиации.

Значительно более сложным оказался вопрос о безвредности пищевых продуктов после лучевой обработки. Первоначально проведенные исследования как у нас в стране, так и в США, Канаде и ФРГ имели целью проследить, не выявятся ли токсические свойства у облученных пищевых продуктов при длительном скормливании подопытным животным. В опыте использовались облученные мясо, рыба, зерно. Обычно более 50% общего рациона подопытных животных состояло из облученных продуктов. Исследования были проведены на крысах, собаках, птице, обезьянах. Длительность эксперимента от 1,5 до 5 лет (в ряде работ охватывалось до 5 поколений крысы). Исследовались дозы облучения продуктов питания от 500—600 крэд до 5 мрад. В процессе экспериментов учитывались общее состояние и поведение животных, их вес, продолжительность жизни, заболеваемость, морфология крови, фагоцитарная активность, биохимические показатели обмена, патолого-анатомические показатели, воспроизводительные функции. Все эти исследования не позволили выявить каких-либо токсических свойств у облученных продуктов. На их основании органы санитарно-гигиенического контроля ряда стран выдали разрешения на выпуск опытных партий облученных продуктов для употребления человеком.

Однако к концу 60-х годов в печати стали появляться отдельные сообщения об образовании в облученных растительных и животных тканях веществ, обладающих мутагенными свойствами. Так, советские ученые показали, что при облучении клубней картофеля в них возрастает количество хиноидных токсинов, обладающих свойствами мутагена. Аналогичные данные опубликовали индийские и японские исследователи.

По предложению объединенного комитета экспертов трех международных организаций (ФАО, МАГАТЭ и ВОЗ) было решено провести дополнительные исследования мутагенных свойств облученных пищевых продуктов. Исследования облученного мяса в широком масштабе проводились в течение ряда лет в США. Большая программа, финансируемая 23 странами, была выполнена в рамках международного проекта в Карлсруэ (ФРГ) по заданию МАГАТЭ.

В СССР детально исследовались мутагенные вещества, образующиеся в облученном картофеле. При скорм-

ливании этих веществ мышам (самцам) выявилось повышение мутировавших клеток в сперме. Но в то же время образующиеся под влиянием облучения мутагены оказались очень нестойкими. Их удавалось обнаружить только немедленно после облучения в сыром картофеле. При хранении мутагенные вещества быстро исчезали, и через 3—4 месяца клубни их уже не содержали. Эти вещества также распадались при нагревании. Сваренный картофель, приготовленный тотчас после облучения, не содержал и следов этих мутагенов.

В 1976 г. Всемирная организация здравоохранения рассмотрела данные международного проекта по исследованию токсичности облученных пищевых продуктов и заключила, что они не более вредны, чем обычные пищевые продукты, содержащие в неумовимо малых количествах мутагены. Действительно, тонкие методы исследования позволили установить образование (в малых количествах) продуктов окисления ненасыщенных жирных кислот, обладающих мутагенными свойствами, при поджаривании продуктов на растительном масле. Все копченые изделия из рыбы и мяса содержат следы мутагенов, образующихся в процессе копчения. Зерно, продаваемое на международном рынке, содержит мутагенные пестициды и средства, которыми окуривали его при хранении на элеваторах для защиты от насекомых-вредителей. Таким образом, в облученных пищевых продуктах не выявлено образования мутагенов в опасных для здоровья количествах.

В настоящее время в 18 странах в промышленном масштабе невидимые лучи используются для продления хранения более 25 видов различных пищевых продуктов. Люди уже начинают привыкать, когда на борту американских самолетов на завтрак они получают бифштекс в пластмассовой упаковке, на которой написано: «Стерильность гарантирована лучевой обработкой». На внутренние и международные рынки поступают куры, гуси, индейки, долго хранящиеся благодаря лучевой консервации.

В Японии в промышленном масштабе облучают и выпускают на рынок картофель. Население покупает его охотнее, так как он лучше сохраняется в жаркое время.

Решение ряда технологических и экономических проблем позволит лучевому методу занять прочное место в пищевой промышленности.

### ЛЮДИ, БУДЬТЕ БДИТЕЛЬНЫ!

Если при разумном использовании невидимые лучи несут здоровье, повышение урожаев, способствуют благосостоянию народа, то в руках мировой реакции они легко превращаются в орудие массового убийства и военного шантажа. Нейтронная бомба — новая разновидность ядерного оружия, поражающая сила которого обусловлена в первую очередь мощным нейтронным излучением.

Ионизирующая радиация — это принципиально новый фактор, которым отличается любое ядерное оружие от применявшегося ранее. Атомные бомбы поражают прежде всего огромной силой взрывной волны, высокой температурой (миллионы градусов в эпицентре) и радиацией от взрыва и от выпадающих радиоактивных осадков. Водородная, или термоядерная, бомба дает значительно более сильное нейтронное излучение. Нейтронная бомба — это уменьшенный вариант водородной, со сниженной ударной волной, так что на первый план выдвигается нейтронное облучение большой энергии, проникающее за броню танков и стены бомбоубежищ.

При взрыве одно- или двухкилотонной нейтронной бомбы в радиусе 0,5 км от места взрыва, где доза облучения будет превышать 10 крад, вследствие поражения центральной нервной системы у людей будет уже в первые 5 мин наступать коматозное состояние и медленная смерть в течение 24—48 ч. Люди, находящиеся дальше от места взрыва (на расстоянии до 1 км), получают меньшую, но все же смертельную дозу. У них сохранится сознание, но через 24—28 ч начнется тяжелая лучевая болезнь; смерть наступит в течение нескольких недель. В радиусе до 2 км все обречены на отдаленные последствия облучения.

Нужно дойти до крайнего цинизма, чтобы рекламировать нейтронную бомбу, как это делают генералы НАТО,

как какое-то новое, гуманное оружие, мало разрушающее города и несущее «быструю» и «легкую» смерть. Понятна та волна возмущения и протеста, которая прокатилась по всем странам Европы, против размещения нейтронных бомб в этих странах, как это планируют стратеги из Пентагона. Опасность принятия нейтронного оружия заключается в том, что оно как бы узаконивает использование ядерного оружия и создает реальную угрозу ядерной войны с ее губительными последствиями для человечества.

Мобилизуя общественность на активную борьбу против гонки вооружений и угрозы ядерной войны, великий гражданин нашего столетия, неутомимый борец за мир Фредерик Жолио-Кюри на Всемирном конгрессе сторонников мира в Париже в 1949 г. сказал: «Каждый из миллионов людей, составляющих народы, которым угрожает война, должен понять, что проблема Войны и Мира является его личной проблемой, что она его затрагивает непосредственно и он не может от нее уклониться... Мы укажем на опасность войны тем, кто ее еще не видит...»<sup>1</sup>.

О возможных последствиях ядерной войны не раз писали специалисты. Сейчас, когда наметились пути смятения международной напряженности, сделаны первые шаги разрядки, идеи мирного сосуществования завоевывают умы человечества, нельзя ни на минуту забывать, к чему может привести нагнетание напряженности, пропаганда новой мировой войны. Группа экспертов Организации Объединенных Наций в докладе, представленном Генеральной Ассамблее ООН 10 октября 1967 г., подробно проанализировала последствия попадания мегатонной термоядерной бомбы в современный город площадью 250 км<sup>2</sup> с населением 1160 тыс. жителей. При наземном взрыве около трети домов будет полностью разрушена, а вторая треть будет сильно повреждена. Только одна треть будет разрушена частично, т. е. дома потеряют двери, крыши, окна. Взрывная волна разрушит водоснабжение, канализационную систему, подачу газа и электричества; будут разрушены дороги и все средства сообщения.

При аналогичном взрыве в воздухе над городом (на высоте примерно 3 км) разрушения на всей площади го-

---

<sup>1</sup> *Шаскольская М. Жолио-Кюри. М.: Молодая гвардия, 1959, с. 180.*

рода скажутся еще сильнее. Однако гибель людей и общий хаос в таком городе вызовет не только взрывная волна, но и тепловое и световое излучение в момент взрыва. Температура в несколько миллионов градусов образует огненный шар, буквально сжигающий все в радиусе нескольких километров. Огненный смерч, возникший в месте взрыва, пожары, вспыхнувшие одновременно на всей территории города (при полном отсутствии средств борьбы с ними из-за разрушенного водоснабжения), будут способствовать общей дезорганизации.

Подсчеты показывают, что при попадании бомбы мощностью в 1 Мт треть населения города, т. е. около 300 тыс. человек, погибнет от взрыва и пожаров, а до 90 тыс. — получит серьезные ранения, требующие медицинской помощи. Около 90 тыс. погибнет в первые два дня в результате сильного облучения. Таким образом, погибнет 50% всех жителей.

По подсчетам американского ученого Т. Стонье, опубликованным в 1964 г., в случае взрыва в воздухе бомбы в 20 Мт над Манхэттенем (центральная часть Нью-Йорка), имеющим 8 млн. жителей, будет убито около 6 млн. человек. Конечно, использование убежищ и укрытий, предварительная эвакуация населения из города снизят эти цифры. Тем не менее приведенные примеры достаточно ярко демонстрируют поражающую силу современных ядерных бомб.

Чтобы полностью представить последствия использования ядерного оружия, мало иметь представление о разрушающем действии одной бомбы. Надо знать, о каком количестве таких бомб может идти речь в случае возникновения ядерной войны. Хотя размеры ядерных запасов никогда не публиковались, однако американский исследователь Р. Лэпп еще в 1962 г. в выпущенной им книге представил эти цифры на основании опубликованных данных о промышленном потенциале основных производств по созданию ядерного оружия. По его подсчетам, США к 1967 г. будут иметь запасы ядерного оружия, оцениваемые миллиардами тонн тринитротолуола (ТНТ).

Дж. Кеннеди еще в 1960 г. заявил, что запасы ядерного оружия во всем мире эквивалентны 30 млрд. т. ТНТ. По минимальным оценкам в 1970 г. эта цифра увеличилась в два раза. Это означает, что в арсеналах мира хранится, вернее находится в состоянии боевой готовности,

около 60 тыс. бомб мощностью 1 Мт или 3 млн. таких бомб, какие в 1945 г. были сброшены на Хиросиму и Нагасаки.

Ф. Барнаби, директор Международного института мира в Стокгольме, в статье, опубликованной в 1977 г., пишет, что только в Европе находится около 10 тыс. единиц тактического ядерного оружия, из которых 6 тыс. американского происхождения.

Трудно вообразить всю мощь и потенциал разрушительного действия, скрытый за этими цифрами. Запасы ядерного оружия достаточны, чтобы несколько раз уничтожить цивилизацию и культуру на нашей планете.

В литературе не раз анализировались случаи условного ядерного нападения на ту или иную страну. Еще в 1959 г. в США Объединенный комитет по атомной энергии опубликовал свои подсчеты результатов ядерного нападения на 224 советских объекта, в том числе на 71 город. Предполагалось, что будет сброшено 263 бомбы общей мощностью 1446 Мт. По этим подсчетам, при таком нападении 42 млн. человек будут убиты, 17 млн. человек тяжело ранены и 21 млн. человек погибнет от радиоактивных осадков. Итог — 80 млн. жертв!

В докладе генерального секретаря ООН в 1967 г. приводятся гипотетические данные о результатах атомного нападения на США. Если будет сброшено 400 бомб мощностью в 10 Мт на районы больших городов, более половины всего населения США (около 200 млн. человек) погибнет, от 70 до 90% основных отраслей промышленности выйдет из строя. Разрушение коммуникаций, линий энергопередач, отсутствие продуктов питания вызовет общую дезорганизацию экономической жизни страны.

Таких расчетов было сделано множество. Языком сухих цифр повествуют военные стратеги о процентах гибели, о размерах поражения. Но эти цифры не отражают того непередаваемого хаоса, который возникнет в стране, подвергшейся нападению. Груды развалин вместо цветущего города. Пожары, охватившие все кварталы. Огненные смерчи, бушующие на всем пространстве. Обезумевшие оставшиеся в живых люди, без средств сообщения, без продуктов питания, без медицинской помощи. Миллионы трупов, заражающих воздух. Тысячи сошедших с ума. Отсутствие электричества, газа, канализации, дорог и средств передвижения. Толпы обезумевших людей без

крова и пищи, раненые обожженные, ослепленные во время взрыва. Вот тот фон, на котором вступает в действие второй, не менее страшный фактор ядерной войны — радиоактивность.

При взрыве любой ядерной бомбы возникают три источника радиационной опасности: нейтронное и  $\gamma$ -излучение в момент взрыва; выброс в окружающее пространство радиоактивных продуктов деления (радиоактивные осадки); образование под влиянием нейтронного излучения радиоактивных изотопов в окружающей среде (наведенная радиоактивность). Величины этих источников, их значение и последствия будут сильно варьировать в зависимости от качества примененного оружия, его мощности, одиночного или совместного действия, места взрыва (на земле, в воздухе, под водой) и других обстоятельств. Однако каждый из них несет большую опасность, особенно при массовом использовании ядерного оружия.

Любой ядерный взрыв, будь то атомная, водородная или нейтронная бомба, сопровождается мощным нейтронным и  $\gamma$ -излучением. При взрыве бомбы мощностью 1 Мт излучение таково, что даже на расстоянии до 6 км от места взрыва вызовет гибель облученных людей в течение 1—2 суток. Таким образом, те, кто не убит в центральном районе взрыва ударной волной и высокой температурой, погибнут от радиационного поражения. Только достаточно глубоко расположенные убежища смогут защитить от непосредственного действия проникающей радиации.

На расстоянии до 10—12 км от эпицентра уменьшающиеся дозы непосредственного облучения будут вызывать лучевую болезнь различной тяжести, длящуюся, как известно, 1—2 месяца. Это нанесет значительный урон населению, особенно если учесть дезорганизацию, которая значительно уменьшит возможности госпитализации и лечения.

При использовании любого ядерного оружия происходит образование большого количества радиоактивных веществ. Особенно велико их образование при взрыве атомных и атомно-водородных бомб. Следует отметить, что термоядерные бомбы, которые рекламировал одно время Пентагон как якобы «чистые» бомбы, не дающие радиоактивных выбросов, в действительности имеют атомную бомбу в качестве запала, всегда дают радиоактивные

осадки, количество которых резко возрастает при наземном взрыве из-за образования радионуклидов под влиянием нейтронов.

Большое количество радионуклидов будет образовываться под влиянием нейтронов и при взрыве нейтронной бомбы. Часть образующихся при взрыве радиоактивных веществ смешивается с частицами, выброшенными в атмосферу силой взрыва, и, взлетев на высоту нескольких километров, начинает быстро оседать, давая в ближайшие сутки после взрыва так называемые местные радиоактивные осадки. В зависимости от силы и направления ветра эти осадки могут выпадать на расстояниях до 500—700 км от места взрыва. Как говорилось, при взрыве американцами атомно-водородной бомбы мощностью 15 Мт на о-ве Бикини в Тихом океане (1954 г.) японские моряки, находившиеся на расстоянии около 130 км от места взрыва, были серьезно поражены такими «местными осадками».

По опубликованным данным, величина облученности за 96 ч после взрыва (в направлении ветра) даже на расстоянии 250 км достигала 1000 рад, т. е. была смертельна для лиц, находившихся в этих местах. Осадки выпадали в Тихом океане, и от них пострадали, кроме японских моряков, лишь жители Маршалльских островов. Представьте себе обстановку ядерной войны в Европе, в США, в любой густонаселенной стране, где один город находится недалеко от другого, и сразу станет ясна огромная опасность для населения от так называемых «местных радиоактивных осадков».

В докладе генерального секретаря ООН, о котором мы уже упоминали, приведены подсчеты облученности населения местными радиоактивными осадками в случае взрыва ядерной бомбы мощностью 20 Мт в городе Гамбурге. При северном ветре в Бремене (расположенном в 75 км от Гамбурга на юго-запад) или в Ганновере (около 140 км на юг) радиационная доза от местных осадков за ближайшие 48 ч после взрыва превысит 1000 рад, т. е. будет абсолютно смертельна для человека.

При взрыве ядерной бомбы мощностью 15 Мт в Лондоне (при юго-восточном ветре) на берегах Франции эти осадки создадут смертельные уровни радиации в районе Руана, Бове и даже в Париже (на расстоянии примерно 500 км), где дозы будут достигать 300 рад, вызывая лучевую болезнь с 15%-ным смертельным исходом.

Все эти расчеты сделаны для одной бомбы. В случае ядерной войны, когда в короткий промежуток времени могут быть сброшены десятки и сотни бомб, эти зоны распространения местных радиоактивных осадков начнут перекрещиваться. Количество осадков от разных взрывов будет суммироваться, что неизбежно приведет (даже на расстояниях в 400—600 км от места взрыва) к выпадению таких уровней радиоактивных осадков, которые смогут представить смертельную опасность для населения. Таким образом, местные радиоактивные осадки существенно увеличивают зону поражения, что и заставляет рассматривать ядерное оружие как оружие массового уничтожения, несущее гибель на сотни километров от места взрыва за счет радиоактивного поражения населения страны, подвергшейся нападению.

Следует подчеркнуть, что все сказанное выше о стране, подвергшейся нападению, будет касаться и страны нападающей, так как при современном распространении мобильных ракетных средств нападения немедленно последует ответный удар и страна-агрессор окажется в столь же плачевном состоянии, как и ее противник.

Но это только одна сторона опасности. Большое количество радиоактивных веществ, образующихся во время взрыва, вместе с огненным шаром выбрасывается высоко вверх на расстояние 20—30 км — в стратосферу. Там они охлаждаются, конденсируются, и начинается их медленное осаждение. Выпадение этих радиоактивных осадков начнется спустя неделю-другую после взрыва и будет длиться примерно в течение двух лет. Увлекаемые воздушными течениями, тонны радиоактивных веществ быстро распространяются с востока на запад, и радиоактивные осадки начнут выпадать на всем земном шаре. Так как широтное перемешивание воздушных масс происходит медленнее, то в основном радиоактивные вещества от взрывов в северном полушарии направятся на север и выпадут в средних северных широтах. Взрывы, осуществленные в южном полушарии, в большей мере загрязнят радиоактивными осадками страны, расположенные южнее экватора.

Во время взрыва образуется более 100 различных радиоактивных изотопов с различным периодом полураспада. Большинство из них имеет короткое время жизни, исчисляемое днями, неделями. Эти изотопы распадаются

еще в стратосфере и, таким образом, не участвуют в радиоактивном загрязнении Земли. Наряду с короткоживущими изотопами во время взрыва образуются такие долгоживущие радиоизотопы, как стронций-90, цезий-137, углерод-14 и др. Именно эти изотопы и несут радиоактивную опасность всему человечеству в случае ядерной войны.

Мы уже рассмотрели те катастрофические последствия, которые ожидают страны, непосредственно участвующие в ядерной войне. Количество радионуклидов, которые попадут в стратосферу и начнут выпадать в течение ближайших лет во всех странах мира, особенно в странах, расположенных в том полушарии, в котором вспыхнет ядерная война, будет столь велико, что сейчас даже трудно предвидеть возможные последствия. Сделаем самые общие ориентировочные подсчеты.

За время испытаний (1955—1971 гг.) были взорваны ядерные бомбы, эквивалентные приблизительно 130 Мт тротила. Как мы видели выше, минимальные запасы ядерного оружия оцениваются в 60 млрд. т тротила. Допустим, что только половина всех запасов будет использована в ядерной войне. Это значит, что за короткий промежуток времени в атмосферу будет выброшено примерно в 300 раз больше радиоактивных веществ, чем за весь период испытаний. Средняя облученность от проведенных испытаний была 0,4 рад. Для того же полушария, где были проведены взрывы, она будет в три раза выше, т. е. 1,2 рад. В триста раз больший выброс даст величины порядка 360 рад. Эта доза благодаря массивному единовременному выбросу реализуется в более короткие сроки, вероятно за 10—15 лет.

По самым осторожным подсчетам удваивающая генетическая доза равна 100 рад. Облученность в странах, не втянутых в ядерный конфликт, может оказаться значительно более высокой. По единодушному мнению генетиков, облученность всего населения в дозах, превышающих удваивающую генетическую дозу, должна привести к генетическому вырождению популяции. На этом фоне стремительно возрастут заболевания лейкемией, раком. Облученность в пределах нескольких сот рад вызовет преждевременное старение и сокращение сроков жизни.

Трудно предвидеть, какой размер примут инфекционные эпидемии. Повышенный уровень радиации приведет

к ослаблению иммунной сопротивляемости человеческого организма и в то же время будет благоприятным для появления новых форм патогенных микробов и вирусов, что чрезвычайно увеличит инфекционную смертность.

Значительная часть радионуклидов выпадет в воды морей и океанов. Здесь, в верхних слоях, они будут быстро аккумулированы планктоном и водорослями, обладающими способностью в сотни и тысячи раз концентрировать в своем теле радионуклиды. Через планктон и водоросли радиоактивные вещества перейдут в организмы рыб, кальмаров, устриц, осьминогов, креветок и других морских организмов, составляющих главную часть пищи многих азиатских народностей. Таким образом, ядерная война, вспыхнув, например, в Европе или США, создаст радиоактивную угрозу жизни во многих странах Азии, удаленных от арены ядерного конфликта на тысячи километров.

Правительства большинства стран мира осознали эту опасность. Они поняли, что ядерная война — это не только разрушение и смерть в странах, ее начавших, но что это серьезная опасность для существования народов, как бы далеко они ни находились от места катастрофы. Вот почему они ставят свои подписи под международными договорами о запрещении взрывов, о нераспространении ядерного оружия, об исключении ядерной войны при решении конфликтов. Советский Союз, как и все содружество социалистических стран, взял твердый курс на укрепление мира, на исключение войны как метода решения международных конфликтов. Эти идеи находят все большую поддержку во всем мире.

В августе 1975 г. в Хельсинки был подписан Заключительный акт общеевропейского совещания, создавший благоприятные условия для сохранения и упрочения мира в Европе. В 1977 г. на Всеевропейском совещании в Белграде были подтверждены общие принципы мирного сосуществования.

Весной 1978 г. впервые в истории ООН была созвана специальная сессия Генеральной Ассамблеи ООН по разоружению. Одна из главных задач этой международной организации — избавить грядущие поколения от бедствий войны. В центре внимания — документ, представленный Советским Союзом: «О практических путях к прекращению гонки вооружений».

В 1978 г. Л. И. Брежнев в своей речи в Праге еще раз подчеркнул решимость Советского Союза бороться за то, чтобы был достигнут решающий перелом в борьбе за прекращение гонки вооружений, за разоружение, за дополнение политической разрядки разрядкой военной. Большинство стран мира поддерживает эти прогрессивные идеи.

Твердая политика Советского Союза и стран социалистического содружества в борьбе за мир, политика, поддерживаемая многими странами мира, гарантирует, что настанет день, когда разум возьмет верх над жадной грабежа и насилий, когда дамоклов меч ядерной войны перестанет угрожать человечеству. Но, чтобы такой день наступил, нужны непрекращающиеся усилия всех людей доброй воли нашей планеты.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, мы рассмотрели радиационную обстановку на нашей планете. Все живые организмы (и человек в том числе) постоянно находятся в радиационном поле малой интенсивности. Наше тело каждую секунду на протяжении всей жизни пронизывается высокоэнергетичными квантами  $\gamma$ -радиации, бомбардируется элементарными частицами больших энергий. Облученность нашего организма обусловлена космической радиацией, излучениями радионуклидов, рассеянных в окружающих нас породах, водах и атмосфере, радионуклидов, инкорпорированных в наши ткани и органы.

Облученность от естественных источников радиации увеличилась за последние десятилетия за счет использования авиатранспорта, испытаний ядерного оружия, ввода в строй многочисленных атомных электростанций, широкого использования рентгенодиагностики в медицине, использования радиоизотопов и электронных устройств в быту.

Дозы облучения, получаемые человеком от всех этих источников, невелики. Для сравнения вкладов различных источников в общую усредненную дозу для всего населения Земли они были сопоставлены с естественным фоном радиации, который был принят за 100 мрад/год. Результаты такого сопоставления приведены ниже.

	Доза, мрад/год
Естественный фон радиации	100
Медицинская диагностика	19,1
От ядерных испытаний, осуществленных в период 1951—1976 гг. (среднее)	8,2
От бытовых источников	0,82
От действующих атомных электростанций	0,16
От использования воздушного транспорта	0,10
От использования фосфорно-калийных удобрений	0,01
От тепловых электростанций	0,005

Наибольший вклад в облученность человечества вносит медицинская диагностика, дающая около 20% естественного фона. Все ядерные испытания, проведенные до 1976 г., дают годовую облученность, более чем в два раза меньшую по сравнению с медицинской диагностикой. Еще на порядок меньше облученность от бытовых источников (светящиеся составы, керамика, телевизоры и др.), и только около одной десятой процента от естественного фона получим от работающих атомных электростанций.

Даже к 2000 г., когда атомная энергетика более чем на два порядка увеличит свою мощность, эти цифры не будут превышать вклада, который мы имеем на сегодняшний день от медицинской диагностики. Конечно, отдельные ограниченные группы населения, непосредственно работающие с источниками радиации, могут получить значительно большие дозы, но это уже вопросы профессиональной опасности, регламентируемые органами санитарного надзора.

По мере того как ученые все больше узнают свойства «невидимых лучей», постигают последствия их действия на живые организмы и на окружающую нас природу, осознают возможности использования этих лучей в медицине, сельском хозяйстве и промышленности — все новые и новые увлекательные задачи и проблемы открываются их взору, становятся на повестку дня и ждут своего решения. Остановимся только на некоторых из них.

Исключительно большой практический интерес имеет проблема одновременного действия ионизирующей радиации и ряда других физических и химических факторов окружающей нас среды. Два аспекта этой проблемы особенно злободневны. Первый заключается в возможности уменьшить разрушающее действие радиации путем одновременного воздействия другого физического или химического фактора. Проблема защиты от вредного действия радиации — одна из самых актуальных проблем в наш атомный век.

Второй аспект возник сравнительно недавно, когда были сделаны наблюдения о значительном усилении — синергизме — радиобиологических эффектов при одновременном воздействии других факторов. Проблема синергизма оказалась весьма актуальной при оценке возможных последствий загрязнения окружающей нас среды и при использовании ионизирующей радиации в медицине и

промышленности. Рассмотрим несколько примеров, поясняющих подходы к решению поставленных задач и перспективность работы в этих направлениях.

В главе 5 уже говорилось, что при облучении организма в тканях, клетках возникает множество свободных радикалов, действие которых на клеточные структуры и вызывает поражающий эффект радиации. Возникла мысль ввести перед облучением безвредные для организма вещества, активно реагирующие со свободными радикалами. Они будут перехватывать эти радикалы и не дадут им возможности подействовать на жизненно важные структуры клетки — осуществится защита. Подобные вещества так и называли — «перехватчики радикалов». Имеется ряд веществ, защищающих по этому принципу. Радиобиологи давно установили, что присутствие кислорода усиливает действие облучения — так называемый кислородный эффект. Были предложены вещества, временно снижающие концентрацию кислорода в тканях организма, т. е. вызывающие гипоксию. Оказалось, что в состоянии гипоксии организм более устойчив к действию радиации.

Чем интенсивнее идут процессы обмена, чем быстрее делятся клетки в тканях, тем чувствительней они к вредному действию радиации. Биохимикам были известны вещества, снижающие процессы обмена, замедляющие деление клеток. Оказалось, что введение этих веществ перед облучением обеспечивает защитный эффект.

В клетках и тканях организма всегда присутствуют вещества, препятствующие окислению ненасыщенных жирных кислот, которые входят в структуру клеточных биомембран. Эти вещества так и называют — «антиоксиданты». При облучении организма резко усиливаются процессы окисления ненасыщенных жирных кислот. Природные антиоксиданты не справляются со своей задачей. Нарушается структура биомембран, их проницаемость, регуляторные свойства, что углубляет вредные последствия облучения. Введение дополнительного количества антиоксидантов перед облучением — еще один путь защиты.

Приведенные примеры наглядно показывают широкие возможности использования антагонизма в действии двух факторов для успешной защиты организмов от вредного действия радиации.

Не менее интересна в теоретическом и практическом

аспекте проблема синергизма. О значении этой проблемы и о том внимании, которое уделяет ей мировая наука, можно судить хотя бы по последнему международному конгрессу по радиационным исследованиям, состоявшемуся в мае 1979 г. в Японии, на котором проблеме синергизма было посвящено наибольшее количество симпозиумов, секционных заседаний; она обсуждалась в наибольшем количестве докладов.

В центре внимания конгресса стояли вопросы возможности использовать явление синергизма для повышения эффективности радиационной терапии опухолей. Рентгеновские и  $\gamma$ -излучения уже давно используются в медицине для борьбы со злокачественными опухолями. Тонкий луч направляется на опухоль, он задерживает рост злокачественных клеток, разрушает их, на чем и основан терапевтический эффект. Чем больше доза, тем ярче эффект. Но врач не может увеличить дозу сверх некоторого предела, так как в этом случае начинают поражаться другие ткани больного. Как усилить воздействия на опухоль, не увеличивая дозу облучения?

Сравнительно недавно была открыта возможность использования для этой цели синергизма при одновременном действии радиации и тепла. Ученые обнаружили по ряду показателей, что ткань опухоли более чувствительна к повышению температуры (всего лишь на несколько градусов), чем нормальная ткань. Но только прогрев опухоли не давал лечебного эффекта. Однако, если одновременно с прогревом проводили лучевую терапию, то эффект значительно усиливался, проявлялось действие синергизма, что позволяло при умеренных дозах облучения получать хороший терапевтический эффект. Гипертермия при радиотерапии опухолей — еще один шаг вперед на этом трудном пути.

А вот пример использования синергизма совсем в другой области. Когда в жаркий летний день вы с удовольствием утоляете жажду стаканом фруктового сока, не приходит ли в голову мысль, а как сохраняется этот свежий сок без порчи, пока он дойдет от завода-изготовителя до потребителя?

Свежеприготовленный сок всегда содержит дрожжевые клетки и, постояв несколько дней, начинает бродить, что делает его непригодным к употреблению. Консервировать сок нагреванием до 100—110°С (обычный способ приго-

товления консервов) нельзя, так как это изменяет и обесценивает его свойства. Была предложена лучевая стерилизация. Однако, чтобы убить все дрожжевые организмы, потребовались очень высокие дозы облучения — до миллионов рад — что было и дорого и ухудшало качество сока. Решить вопрос удалось, используя явление синергизма — усиление эффекта при одновременном действии тепла и радиации. Только прогрев до 50° С не изменял его свойств, но зато повышал радиочувствительность дрожжевых клеток. Облучение при этой температуре уже при дозах 200—300 крад приводило к стерилизации сока, после чего сок хранился в течение нескольких месяцев, не теряя свойств натурального свежего напитка.

Еще один пример, где синергизм помог бы разрешить большие хозяйственно важные проблемы. Имеется в виду задача обеззараживания отходов больших животноводческих хозяйств. Это сложная проблема, если учесть, что только одно крупное хозяйство (на 100 тыс. голов) дает ежедневно около 3000 т отходов. Были предложены химические и радиационные методы обеззараживания. Однако и те и другие оказались нерентабельными из-за необходимости использовать большие количества химикатов для получения высоких доз облучения. Используя явление синергизма и здесь удалось наметить пути решения вопроса. Значительное усиление эффекта при одновременном действии химиката и радиации позволило резко снизить мощность и дозу облучения при затрате небольших количеств химикатов. В настоящее время этот метод проходит производственную проверку в одном из хозяйств Сибири.

Явление синергизма привлекает все большее внимание гигиенистов в связи с проблемой загрязнения окружающей среды. Мы подробно рассмотрели влияние малых доз ионизирующей радиации в окружающем нас мире, их небольшие изменения в будущем, лежащие в пределах колебания естественного фона. Проблема синергизма ставит новые вопросы.

Все живое на Земле подвержено влиянию множества физических и химических факторов, которые действуют одновременно с радиацией. Каковы будут последствия одновременного действия ионизирующей радиации и радиоволн различных диапазонов, ультрафиолетовых и инфракрасных излучений? Как будет влиять радиация

в жарком климате на экваторе и при низких температурах Крайнего Севера? Будет ли проявляться синергизм в мутагенном действии радиации при одновременном воздействии химических мутагенов, с каждым днем все более загрязняющих окружающую нас среду? Как скажется действие малых доз радиации в условиях крупных промышленных городов, в которых воздух загрязнен выхлопными газами автомобилей, окислами азота и серы химических заводов?

Сейчас нет данных для исчерпывающего ответа на подобные вопросы, но все, что мы знаем о явлении синергизма заставляет со всей серьезностью отнестись к ним и развернуть исследования в этом направлении.

Проблемы малых доз радиации, которые рассмотрены в книге, открывают перед рядом научных дисциплин новые области исследования. При исследовании поражающего действия больших доз радиации в центре внимания молекулярной радиобиологии были процессы, возникающие в облученном клеточном ядре, в хромосомах и ДНК. По мере снижения дозы облучения резко падала вероятность поражения ядерных структур. При малых дозах радиации вероятность поражения столь мала, что уже не играет решающей роли, и на первый план выступают биомембраны клетки, изменяющие свои регуляторные свойства под влиянием очень слабых воздействий.

Перед молекулярными радиобиологами возникают новые задачи — глубже изучить влияние малых доз радиации на регуляторные свойства биомембран, на клеточные взаимодействия, осуществляемые через мембраны, на регуляторные процессы в целом организме.

Перед радиоэкологами встают увлекательные задачи дать научно обоснованный прогноз эволюции биоценозов, составленных из многих видов организмов с весьма различной радиочувствительностью в условиях изменения естественного, веками существовавшего в нем уровня радиации. Перед космической радиобиологией возникают задачи прогнозирования существования биосистем в кораблях при дальних космических полетах или в будущих поселениях на Луне или других планетах — в условиях повышенных фонов космической радиации, в условиях солнечных вспышек, с необычным вкладом тяжелых космических частиц большой энергии.

Крайне интересны радиоэкологические исследования

миграции радионуклидов из почвы в растения, из растений в организмы животных и человека. Была обнаружена значительная концентрация радионуклидов в некоторых организмах. Планктон, например, поглощает многие радионуклиды из вод морей и океанов, поэтому их содержание в этих микроорганизмах в сотни, а иногда и в тысячу раз выше, чем в окружающей воде. Планктон же служит пищей рыбам, которые идут в пищу человека. Так, по пищевым цепочкам распространяются радионуклиды в природных условиях.

Представляет интерес определение содержания тех или иных радионуклидов в отдельных видах растений, животных и морских организмов, идущих в пищу человека; исследование миграции радионуклидов в различных биоценозах — в естественных условиях и после вмешательства человека в эти условия.

В условиях постоянного действия малых доз радиации возникала и эволюционировала жизнь на нашей планете. Исследование роли ионизирующей радиации в глобальных процессах только начато в отдельных поисковых работах и заслуживает более глубокого исследования на базе новых данных радиобиологии.

Предстоит глубже изучить роль ионизирующей радиации в предбиотический период в синтезе первичных белков, нуклеиновых кислот и других веществ, на базе которых возникли простейшие организмы, роль ионизирующей радиации в возникновении мутаций, в изменчивости живых организмов в процессе эволюции. Нельзя забывать, что за миллиарды лет существования Земли радиационный фон на ней мог резко изменяться, достигая больших величин в случае вспышек новых звезд в пределах нашей галактики. Несомненно, такие колебания облученности земного шара влекли за собой массовое вымирание радиочувствительных организмов и безудержное размножение и расселение по планете радиустойчивых.

Эпидемиологические и сравнительно-биологические исследования населения, животных, растений и микроорганизмов в районах с повышенным фоном естественной радиоактивности несомненно должны быть расширены. Они обогащают наши знания о результатах длительного действия малых доз ионизирующей радиации на биосферу.

Сейчас такие исследования начаты в Бразилии, успешно проводятся в Индии, в штате Керала, где есте-

ственная радиоактивность в сотни раз превосходит средние величины. Результаты этих исследований значительно расширят наши знания в этой области.

Решение вопроса о приспособлении организмов к повышенным уровням облучения, о стимулирующих, благоприятных влияниях малых доз радиации на существование популяций представляет огромный интерес, так же как и установление минимальных уровней, угнетающих, снижающих жизненные показатели популяций.

Все это — увлекательные и важные задачи для научного поиска и постановки новых экспериментов, для раздумий и размышлений. Это задачи, которые призваны решать отряды молодых ученых, заинтересовавшихся областью «невидимых лучей вокруг нас» — областью, исследуемой радиобиологией. Решение этих задач очень важно для всего человечества в настоящем и будущем.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава 1. Естественный фон ионизирующих излучений	8
Глава 2. Загрязнение биосферы радиоактивными нуклидами . . . . .	28
Глава 3. Вносит ли атомная промышленность дополнительные источники радиации в биосферу?	42
Глава 4. Ионизирующая радиация в повседневной жизни . . . . .	59
Глава 5. Действие радиации больших энергий на живые организмы . . . . .	65
Глава 6. Что известно о биологическом действии радиации в малых дозах? . . . . .	80
Глава 7. Действует ли на биосферу естественный фон радиации? . . . . .	91
Глава 8. Невидимые лучи управляют жизненными процессами . . . . .	109
Глава 9. Увеличение сроков хранения пищевых продуктов путем $\gamma$ -облучения . . . . .	127
Глава 10. Люди, будьте бдительны! . . . . .	134
Заключение . . . . .	144

Александр Михайлович Кузин

### НЕВИДИМЫЕ ЛУЧИ ВОКРУГ НАС

Утверждено к печати

редколлегией серии научно-популярных изданий АН СССР

Редактор издательства В. Н. Вяземцева. Художник А. А. Камаев  
Художественный редактор И. В. Разина. Технический редактор Н. Н. Плохова  
Корректоры Н. Г. Васильева Г. Г. Петровская

ИБ № 15306

Сдано в набор 17.07.79. Подписано к печати 21.01.80. Т-02517. Формат  $84 \times 108^{1/2}$ .  
Бумага типографская № 3. Гарнитура обыкновенная. Печать высокая.  
Усл. печ. л. 7,98. Уч.-изд. л. 8,2. Тираж 50 000. Тип. зак. 529. Цена 20 коп.

Издательство «Наука». 117864 ГСП-7, Москва, В-485, Профсоюзная ул. 90  
Ордена Трудового Красного Знамени первая типография издательства «Наука»  
199034, Ленинград, В-34, 9 линия, д. 12



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, Мичуринский 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., 4/6.