



# **Я ДЕРНЫЕ ВЗРЫВЫ**

**NUCLEAR EXPLOSIONS**  
**and**  
**THEIR EFFECTS**

**DELHI**

**1956**

# ЯДЕРНЫЕ ВЗРЫВЫ

Перевод с английского  
Н. Ф. КРАВЦОВОЙ

Под редакцией  
Н. П. ЛУШНОВА

ИЗДАТЕЛЬСТВО  
ИНОСТРАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ  
*Москва, 1958*

## А Н Н О Т А Ц И Я

В книге в популярной форме излагаются теоретические основы атомных и водородных взрывов. На конкретных результатах взрывов в Японии и испытаний атомных и водородных устройств после войны рассматривается действие поражающих факторов ядерных взрывов: ударной волны, светового излучения и особенно детально радиоактивных излучений.

Перевод книги издается в расчете на широкий круг читателей, интересующихся проблемами ядерного оружия и защиты от него.

**Редакция литературы по военным вопросам**

*Начальник И. Г. ФРОЛОВ*

## ОТ ИЗДАТЕЛЬСТВА

Книга «Ядерные взрывы» опубликована в Индии в 1956 году отделом печати Министерства информации и радиовещания.

Авторы книги—д-р Котхари, д-р Бхабха и д-р Кханолкар поставили перед собой цель: описать в общих чертах физическое и биологическое действие ядерных взрывов. Для этого они обобщили многочисленные труды и статьи американских, английских, японских и индийских ученых, а также материалы Международной конференции по мирному использованию атомной энергии, происходившей в августе 1955 года.

В книге освещен вопрос о действии не только атомных, но и водородных бомб с тротиловым эквивалентом в несколько миллионов тонн. Особое внимание авторы уделяют так называемому биологическому действию, то есть непосредственному и длительному действию радиоактивных излучений на организм человека.

Книга носит компилятивный характер и содержит ряд спорных положений и выводов (например, в разделе о генетическом действии радиоактивных излучений или утверждение, что при мощном термоядерном взрыве основным поражающим фактором является радиоактивное заражение местности). Однако книга насыщена фактическими данными и, несомненно, послужит полезным дополнением к той литературе по проблемам атомного оружия и защиты от него, которая уже имеется на книжном рынке.



## ПРЕДИСЛОВИЕ

Около года назад я предложил организации комитета обороны по научным вопросам при правительстве Индии заняться объективным изучением имеющегося материала о поражающем действии атомного, термоядерного и других видов оружия массового поражения, чтобы издать книгу, обобщающую весь этот материал. Такая книга не могла быть полной, поскольку многие сведения по данному вопросу являются секретными. Тем не менее я считал, что она сможет дать некоторое представление о характере современной войны. О результатах ядерных взрывов часто сообщалось в газетах и журналах. В ряде стран по этому вопросу были выпущены официальные издания. Однако мне неизвестно о существовании какой-либо работы, в которой были бы обобщены имеющиеся данные о поражающем действии ядерного оружия. Поэтому я считаю, что книга, в которой будет дано такое обобщение, принесет пользу.

Составление книги было поручено представителю организации комитета обороны по научным вопросам д-ру Котхари. Вместе с ним работали д-р Хоми Бхабха, который руководит всеми работами в области атомной энергии в Индии, и д-р Кханолкар, возглавляющий научно-исследовательский институт рака в Бомбее. Работа над книгой несколько затянулась вследствие того, что в прошлом году в Женеве проходила конференция по мирному использованию атомной энергии, на которой был опубликован ряд новых данных по рассматриваемому вопросу.

Основная работа по составлению настоящей книги выполнена д-ром Котхари. Ему оказывал большую помощь, несмотря на свою занятость, д-р Хоми Бхабха, а также ряд наших молодых ученых, работающих в орга-

низации комитета обороны по научным вопросам и в управлении по вопросам атомной энергии.

Я пытался убедить ученых—авторов книги не слишком увлекаться научной терминологией, а писать более популярным языком. Мне удалось это только частично. Однако я думаю, что настоящая книга будет представлять интерес не только для специалистов, но и для более широкого круга читателей. Она даст дополнительное представление об окружающем нас мире, а также о том, какова будет судьба человечества, если вспыхнет атомная война. Я считаю, что никто, даже самый большой специалист в области ядерной энергии, не может сказать определенно, каковы будут окончательные последствия применения водородных бомб. Однако уже сейчас мы знаем достаточно много для того, чтобы представить себе картину войны, в которой будет применяться ядерное оружие. Всякая война связана с человеческими жертвами. Атомная же война принесет человечеству неизмеримо больший ущерб, так как ядерные взрывы не только погубят колоссальное число людей, они окажут вредное генетическое действие на оставшихся в живых, угрожая не только нынешнему, но и будущим поколениям. Такая угроза отодвигает на второй план все другие волнующие нас проблемы.

Даже сейчас, когда нет атомной войны, испытания ядерного оружия создают всему населению земного шара угрозу генетического действия радиации. Эти испытания продолжаются, несмотря на их опасность.

Я считаю, что эта книга, краткая и не совсем полная, поможет людям понять те ужасные последствия, которые им угрожают в случае войны с применением ядерного оружия, и ту опасность, которая связана с продолжением испытания ядерного оружия.

Дели,  
20 июня 1956 года

Джавахарлал Неру.



## ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРОВ

В этой книге сделана попытка дать общее описание физического и биологического действия ядерных взрывов. Дается также краткое изложение соответствующих научных принципов и фактов. Особое внимание уделяется радиологическому действию взрывов большой мощности с тротиловым эквивалентом порядка нескольких миллионов тонн<sup>1</sup>.

При составлении книги было использовано большое количество открытой литературы по действию ядерного оружия, а также обобщены данные, разбросанные в различных изданиях по вопросам физики, биологии и др. Из материалов, которые были использованы, следует, в частности, отметить отчеты комиссий по атомной энергии США, о результатах испытаний ядерного оружия, работы японских ученых и доклады Международной конференции по мирному использованию атомной энергии, состоявшейся в Женеве в августе 1955 года. К сожалению, в то время, когда писалась эта книга, еще не были опубликованы отчет об опасности ядерного и других излучений, выпущенный в середине июня научно-исследовательским медицинским советом Великобритании, и отчет о генетическом действии радиации, опубликованный Национальной академией наук США.

Книга, охватывающая такой широкий круг вопросов, не может быть строго последовательной и полностью свободной от ошибок. Однако следует отметить, что особое внимание было обращено на то, чтобы отразить в книге все наиболее важное.

---

<sup>1</sup> Описание действия взрывов большой мощности дается в гл. V и VI. Эти главы являются самостоятельными и не зависят от остального текста.

Мы надеемся, что книга представит интерес как для ученых, так и вообще для всех интересующихся данным вопросом.

Лучшей гарантией того, что все знания в области новой атомной науки будут применены на благо человека, является сознание той огромной опасности, которая нам грозит в случае применения этих знаний во вред человеку.

В приложениях к гл. II и V содержатся дополнительные научные и технические сведения по некоторым важным вопросам, которые рассматриваются в книге.

Особо отмечаем, что в работе по составлению книги помогали сотрудники лаборатории организации по научным вопросам при комитете обороны М. Л. Н. Састри, А. Нагаратнам, Б. К. Рай Саркар и М. П. Мургаи, а также работники управления по вопросам атомной энергии К. С. Сингви и А. Р. Гопал Айенгар.

## *Глава I*

### **ВВЕДЕНИЕ**

С давних времен человечество использует энергию падающей воды и энергию, выделяющуюся при сгорании дерева и угля. Первая является примером гравитационной энергии, обусловленной силой притяжения земли, вторая—примером химической энергии (которая по природе своей является электрической). В последние годы открыт совершенно новый источник получения энергии, примерно в миллион раз более мощный, чем любой химический процесс. Этим источником энергии являются ядерные силы, действующие между составными частями атомного ядра—протонами и нейтронами. Необходимо отметить, что использование ядерной, или, как ее называют, атомной, энергии, в отличие от использования гравитационной и химической энергий, требует глубокого знания строения вещества и всестороннего развития не только прикладных, но и теоретических наук.

Началом эпохи современной физики можно считать открытие (почти случайное) немецким физиком Рентгеном в 1895 году особых лучей, названных впоследствии «рентгеновскими». Это открытие положило начало невиданному прогрессу в развитии физики.

В поисках возможной связи между флюоресценцией и рентгеновскими лучами французский физик Беккерель по счастливой случайности выбрал для своих исследований нитрат урана. Это неожиданно привело его в 1896 году к открытию явления радиоактивности. В свою очередь открытие радиоактивности привело вскоре французских ученых Пьера и Марию Кюри к открытию радия.

В 1905 году Эйнштейн сформулировал теорию относительности и на основе ее установил эквивалентность между массой и энергией. В результате большой работы, которая была проделана Резерфордом в области изучения ядерных излучений (названных им альфа- бета- и гамма-лучами), испускаемых радиоактивными веществами, он в конечном счете пришел к представлению об атоме как о «солнечной системе в миниатюре». Согласно этой концепции, атом состоит из центральной части—ядра и электронов, вращающихся вокруг него. Бор с удивительной проницательностью сочетал модель атома по Резерфорду с квантовой гипотезой Планка и Эйнштейна и, таким образом, сформулировал свою квантовую теорию строения атома.

В 1919 году Резерфорд впервые осуществил расщепление ядра азота, бомбардируя его альфа-частицами. Вскоре после него Блэккет получил фотографии такого процесса расщепления, производившегося в камере Вильсона. В 1932 году Чедвик, работая в лаборатории Резерфорда, открыл нейтрон. В этом же году и в этой же лаборатории Коккрофт и Уолтон осуществили первое искусственное ядерное превращение, бомбардируя литий протонами, ускоренными почти до миллиона электроновольт. За этим последовал ряд новых открытий.

Явление деления урана было обнаружено в 1938 году немецкими физико-химиками Ганом и Штрассманом. За этим чрезвычайно важным открытием последовал период интенсивного изучения атомного ядра. К 1940 году по этому вопросу уже было опубликовано более 100 работ. Однако вскоре работы в этой области были засекречены и в открытой литературе не освещались до конца войны<sup>1</sup>.

Необходимо отметить, что почти все основные открытия, которые сделали возможным практическое использование атомной энергии, были осуществлены в Западной Европе. Однако первой страной, которая сумела практически использовать атомную энергию, были Соединенные Штаты Америки (а вскоре за ними и Советский Союз), обладающие мощными промышленными и научными ресурсами.

---

<sup>1</sup> Превосходный обзор первых работ, выполненный А. А. Тернером, напечатан в «*Reviews of Modern Physics*», 12, 1, 1940. Обзор работ за период после 1940 года помещен в «*Progress in Nuclear Physics*», 11, 1952.

## БОМБЫ, СБРОШЕННЫЕ НА ЯПОНСКИЕ ГОРОДА ХИРОСИМУ И НАГАСАКИ

В известном письме от 2 августа 1939 года президенту Рузвельту Альберт Эйнштейн, основываясь на некоторых работах Ферми и Сциларда, подчеркивал возможность использования деления урана для создания необычайно мощных бомб нового вида—в миллион раз более мощных, чем обычные бомбы. «Одна такая бомба,—писал Эйнштейн,—доставленная на лодке и взорванная в порту, могла бы полностью разрушить порт и опустошить прилегающий к нему район». Правительство США решило серьезно изучить возможность создания таких бомб; к этому его толкало еще и предположение, что в Германии также велась работа в этой области, и если бы она завершилась успешно, то это грозило бы катастрофой для союзников<sup>1</sup>.

2 декабря 1942 года в графитовом котле, построенном на месте спортивной площадки Стэг-Филд Чикагского университета, Ферми впервые успешно осуществил цепную реакцию деления (на медленных нейтронах). Это событие явилось поворотным пунктом в развитии ядерной физики. В Хэнфорде на берегу реки Колумбии был построен гигантский завод по производству плутония. После опубликования работ Юри по диффузии в Окридже был построен завод по извлечению урана 235 из природного урана. Там же был построен второй завод, на котором производство урана 235 было основано на принципе электромагнитной сепарации. Разработка конструкции атомной бомбы, которая могла быть применена практически, была поручена группе ученых во главе с Робертом Оппенгеймером, работавшей в новой Лос-Аламосской лаборатории (штат Нью-Мексико). Уже к середине 1945 года были изготовлены три бомбы. Одна из этих бомб, плутониевая, была испытана на полигоне в Аламогордо 16 июля 1945 года. Остальные две были сброшены на японские города Хиросиму (6 августа 1945 года) и Нагасаки (9 августа 1945 года).

Трумэн, который в то время был президентом США, пишет в своих мемуарах (1956 год): «В 1945 году произошло событие настолько значительное, что оно коренным обра-

---

<sup>1</sup> Интересно отметить, что если вначале сумма ассигнований правительства США на создание атомной бомбы составляла всего около 6 тыс. долл., то уже в 1945 году она доходила до 2 млрд. долл.

зом изменило наши отношения со всем миром и возвестило человечеству о наступлении новой эры, последствия которой, так же как цели и проблемы, которые она ставит, мы не можем еще осознать полностью даже сейчас. Этим событием является создание атомной бомбы».

Материалом для бомбы, сброшенной на Хиросиму, являлся уран 235, а для бомбы, сброшенной на Нагасаки,— плутоний 239. Обе бомбы были взорваны на высоте около 600 м с целью увеличения площади разрушений под действием ударной волны и светового излучения.

На Хиросиму бомба была сброшена 6 августа 1945 года в 8 час. 15 мин. утра с самолета Б-29. В «Отчете американского управления по изучению результатов стратегических бомбардировок (часть V)» о бомбардировке города говорится следующее:

«Большинство промышленных рабочих уже приступило к работе, но многие рабочие находились еще в пути; почти все школьники и часть служащих работали под открытым небом по разборке домов (с целью предотвратить распространение пожаров) и перевозке ценностей за пределы города. Бомбардировка была произведена через 45 мин. после сигнала отбоя тревоги, объявленной в связи с предыдущим налетом авиации. Поскольку тревога не была объявлена, а жители сами почти не обращали внимания на отдельные небольшие группы самолетов, взрыв атомной бомбы был совершенной неожиданностью и люди не успели укрыться в убежищах. Многие находились под открытым небом, большинство остальных—в строениях легкого типа или в магазинах».

В результате атомного взрыва в Хиросиме из общего количества 75 тыс. домов около 7 тыс. домов было полностью разрушено, 55 тыс. домов сгорело. Более 90% всех домов было полностью или частично разрушено. Взрыв бомбы в Нагасаки был мощнее, чем в Хиросиме (радиус разрушений на 15% больше). Однако вследствие гористого рельефа местности нанесенный ущерб оказался сравнительно меньшим. Общее число погибших при взрывах атомных бомб в Хиросиме и Нагасаки составляет более 100 тыс. человек.

В табл. 1 указаны размеры площади разрушения и число жертв среди населения для каждого из пострадавших городов. В последней колонке таблицы приводятся данные о размере разрушений и числе жертв, относя-

Таблица 1

	Хиросима, атомная бомба	Нагасаки, атомная бомба	Токио, 1667 т фу- гасных и за- жигатель- ных бомб
Убитых . . . . .	78 150	23 753	83 000
Пропавших без вести . . .	13 983	1 924	
Раненых . . . . .	37 424	23 345	102 000
Получивших другие трав- мы . . . . .	235 656	89 025	
Всего . . . . .	365 213	138 047	
Плотность населения на 1 км <sup>2</sup> . . . . .	13 500	25 100	50 200
Площадь разрушений, км <sup>2</sup>	12,17	4,66	40,92

Примечание. Приведенные цифры жертв для городов Хиросимы и Нагасаки взяты из недавно вышедшей книги «Atomic Bomb Injuries» («Жертвы атомных бомбардировок» — Ред.), изданной японским комитетом по подготовке к Всемирному конгрессу врачей по изучению современных условий жизни (главный редактор Н. Кусано, Токио, 1953). Данные о численности населения и площади разрушений, а также все цифры в последней колонке взяты из книги «The Effects of Atomic Weapons», 1950. («Действие атомного оружия» — Ред.), изданной Комиссией по атомной энергии США.

щиеся к обычным видам бомб (фугасным и зажигательным). Эти данные получены в результате изучения последствий массового налета американской авиации на Токио 9 марта 1945 года, когда 279 бомбардировщиков сбросили на город около 1700 т обычных бомб.

## ОБЩЕЕ ЧИСЛО ЖЕРТВ ПЕРВОЙ И ВТОРОЙ МИРОВЫХ ВОЙН

Общее число жертв (убитые, пропавшие без вести и раненые) среди войск и гражданского населения составляет около 40 млн. человек в каждой из двух мировых войн. В число жертв первой мировой войны включены умершие в результате эпидемий, которые были непосредственно связаны с войной или явились ее прямым следствием. Число погибших во время боев составляло только неболь-

шую часть от общего числа жертв. Однако во вторую мировую войну впервые в истории размеры боевых потерь превышают потери, являющиеся следствием эпидемий и заражения крови. Это объясняется большими успехами в области медицины, одним из величайших достижений которой является открытие пенициллина. Так, например, в армии США во время второй мировой войны боевые потери составляли 237 тыс. человек, в то время как небоевые потери составляли только 65 тыс. человек<sup>1</sup>. Соответствующие цифры для первой мировой войны составляют 51 и 56 тыс. человек, а для гражданской войны в Мексике— 1557 и 11 377 человек.

### ОБЩАЯ ЭНЕРГИЯ ВЗРЫВОВ, ПРОИЗВЕДЕННЫХ ЗА ВРЕМЯ ВТОРОЙ МИРОВОЙ ВОЙНЫ

Энергия взрыва каждой из атомных бомб, сброшенных на города Хиросиму и Нагасаки, приблизительно эквивалентна энергии взрыва 20 тыс. *m* химического взрывчатого вещества тротила. (Поэтому принято называть такую бомбу атомной бомбой с тротильным эквивалентом 20 тыс. *m*) Количество энергии, выделяющейся при взрыве такой атомной бомбы, в тысячу раз превышает количество энергии, выделяющееся при взрыве обычной бомбы самого крупного калибра. Общий вес бомбы (включая корпус бомбы, парашют и пр.) составлял 5 *m*, а вес делящегося вещества (урана 235 или плутония 239)—примерно 50 кг. Необходимо отметить, что, хотя энергия, освобождаемая при взрыве атомной бомбы, эквивалентна энергии взрыва 20 тыс. *m* тротила, площадь района разрушения при взрыве атомной бомбы составляет всего 1/10 той площади, которая подверглась бы разрушению, если бы это же количество тротила (20 тыс. *m*) было сброшено на цель в виде обычных бомб весом примерно 1 *m*. Это объясняется тем, что большая часть энергии взрыва атомной бомбы идет на «чрезмерное разрушение» цели в районе эпицентра взрыва. Разрушение строений происходит в основном в результате действия ударной волны, причем площадь района разрушений пропорциональна  $E^{2/3}$  (а не  $E$ ), где  $E$ —энергия взрыва.

---

<sup>1</sup> Beebe G. W., De Bakey M. E., Battle Casualties. 1952.



Хотя энергия взрывов атомных бомб, сброшенных на Хиросиму и Нагасаки, была очень велика, тем не менее она составляла только небольшую часть общей энергии взрывов, произведенных за шесть лет второй мировой войны. Общее количество взрывчатых веществ, примененных во время войны, составляет около 5 млн. т. Вес бомб, сброшенных во время войны только на одну Германию, составляет 1,3 млн. т, а число убитых в результате бомбардировок в этой стране составляет 0,5 млн. человек. Таким образом, вес бомб, приходящихся на одного убитого, равен 2,6 т. Можно с уверенностью сказать, что общая энергия взрывов, произведенных за период второй мировой войны, намного превышает общую энергию взрывов, произведенных за время всех предыдущих войн, включая первую мировую войну. И все же даже эта энергия составит только небольшую часть энергии, освобождаемой при взрыве одной термоядерной бомбы<sup>1</sup>. Таков прогресс (если можно так выразиться) в области военного применения ядерной энергии, достигнутый за период «мирного десятилетия». Для примера укажем, что при каждом термоядерном взрыве, производившемся Соединенными Штатами в марте 1954 года и в мае 1956 года, а также Советским Союзом в ноябре 1955 года, выделялась энергия, значительно превышающая общую энергию взрывов, произведенных за всю историю существования человечества. Следует указать на то, что для термоядерного оружия, которое в настоящее время разрабатывается и выпускается, прямое действие энергии взрыва является незначительным по сравнению с радиологическим действием взрыва (гл. V)<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Механизм процессов деления и синтеза описан в гл. II.

<sup>2</sup> Показателем производства взрывчатых веществ может служить производство химически связанного азота, который является основной составной частью удобрений и взрывчатых веществ. Открытие в 1913 году Габером и Бошем способа получения азота из воздуха не только способствовало развитию мощной химической промышленности, но также значительно облегчило положение Германии во время первой мировой войны, когда она была отрезана блокадой от запасов чилийских нитратов, необходимых для производства взрывчатых веществ и удобрений. Общее производство синтетического азота за 1915—1919 годы составляет 3 млн. т, тогда как за период 1939—1945 годов оно составляет около 19 млн. т.

В качестве примера можно также указать, что до середины XIX в. Индия (главным образом штаты Бихар, Утар-Прадеш и Пенджаб) была «почти единственным источником селитры». «До того как

## ИСПЫТАНИЕ АТОМНОГО И ТЕРМОЯДЕРНОГО ОРУЖИЯ

Подсчитано, что начиная с конца второй мировой войны было произведено всего восемьдесят взрывов ядерного оружия, из них не менее девяти термоядерных. Первый взрыв атомного оружия (основанного на делении) в Советском Союзе был произведен в августе 1949 года. 23 сентября 1949 года об этом взрыве сообщил президент Трумэн, который заявил о том, что правительство США имеет неопровержимое доказательство того, что русскими был произведен атомный взрыв. Это было, несомненно, большое достижение русских. Оно означало, что конец монополии США в области атомного оружия наступил гораздо раньше (по меньшей мере на два года), чем это предполагали даже хорошо информированные круги. Правительство США немедленно решило приступить к созданию термоядерной бомбы (так называемой водородной или сверхмощной бомбы), и 31 января 1950 года Трумэн подписал решение, обязывающее Комиссию по атомной энергии мобилизовать все силы для решения поставленной задачи. Принятие решения положило конец длительным и ожесточенным дискуссиям, проходившим в Комиссии по атомной энергии (председателем которой был в то время Давид Лилиенталь) и в ее консультативном комитете (председателем которого являлся Роберт Оппенгеймер), в которых существовали совершенно различные мнения о возможностях и сроках создания водородной бомбы. Эта полемика в большей мере отражена в очень важном документе — протокольной записи заседания по «Делу Оппенгеймера» (1954 год).

1 ноября 1952 года на Маршалловых островах в Тихом океане США впервые провели испытание термоядерного устройства («Майк»)¹.

селитру начали вывозить из Индии, она шла из Англии, где ее добывали в окрестностях поселков и даже в самих поселках на землях, принадлежавших королю. Добыча селитры часто была связана с насильственным выселением жителей из домов. Открытие способа искусственного получения селитры из залежей нитрата в Южной Америке и поташа в Германии сильно подорвало индийскую торговлю, тем более, что это открытие почти совпало с введением в 1860 году индийским правительством пошлин на экспорт в размере 2 рупий на 1 маунд ( $\approx 34$  кг). Годовой экспорт селитры из Индии в 1860 году составлял 5 тыс. т. («The Report of the Indian Industrial Commission», 1916—1918).

¹ История данного испытания описана Теллером, см. «Science», 121, 267, 1955.

Первый взрыв термоядерного оружия в Советском Союзе был произведен в августе 1953 года. В результате специальных исследований, проведенных Комиссией по атомной энергии США, было установлено, что при взрыве в верхние слои атмосферы было вынесено большое количество  $\text{Li}^6$ . Это служило доказательством того, что для реакции синтеза<sup>1</sup> вместо дорогостоящего трития русские использовали частично или полностью дейтрид лития ( $\text{Li}^6\text{H}^2$ ).

1 марта 1954 года Соединенными Штатами на атолле Бикини был произведен мощный термоядерный взрыв с тротильным эквивалентом около 15 млн. т. Этот взрыв известен как «испытание на Бикини в марте 1954 года». 26 марта на Маршалловых островах был произведен второй мощный взрыв термоядерного оружия. По-видимому, в обоих случаях (или по меньшей мере в одном из них) в термоядерном оружии использовался  $\text{Li}^6\text{H}^2$ .

В Советском Союзе несколько термоядерных взрывов было произведено во время испытаний в сентябре—октябре 1954 года. В ноябре 1955 года был произведен термоядерный взрыв почти такой же мощности, как и взрыв, произведенный Соединенными Штатами в марте 1954 года. Взрыв в Советском Союзе был более успешным в том отношении, что он был первым воздушным взрывом (термоядерное «устройство» было сброшено с самолета). *Все предыдущие термоядерные взрывы были наземными* (гл. V).

21 мая 1956 года США также осуществили первый воздушный взрыв термоядерного оружия<sup>2</sup>. Термоядерное «устройство» было сброшено с реактивного бомбардировщика B-52. Предположительно взрыв произошел на высоте около 5 км. Тротильный эквивалент взрыва определяется в 15 млн. т<sup>3</sup>.

Укажем здесь (хотя об этом более подробно речь будет идти в главе II), что большая часть энергии, выделившейся при термоядерном взрыве в марте 1954 года (как и в случае

---

<sup>1</sup> См., например, Blackett P. M. S., *British Policy and H-Bomb*, *The New Statesman and Nation*, August 21, 1954; см. также «*Manchester Guardian*», May 21, 1955.

<sup>2</sup> Японская Центральная метеорологическая обсерватория 27 мая 1956 года сообщила о «термоядерном взрыве где-то в районе Бикини почти такой же мощности, как и взрыв 21 мая» («*The Times*», May 29, 1956).

<sup>3</sup> «*The Times*» (London), May 21, 1956; см. также «*Bulletin of the Atomic Scientists*», 12, 230, 1956.

всех других термоядерных взрывов, произведенных до сих пор), была получена за счет деления урана 238. Реакция же синтеза (или термоядерная) использовалась для того, чтобы вызвать деление урана 238. Как мы увидим позже, радиологическая опасность для данного количества выделившейся энергии является значительно большей при процессе деления, чем при процессе синтеза.

Кроме США и СССР, единственной страной, которая также проводила испытания ядерного оружия, является Англия. Первое испытание атомного оружия Англия провела на островах Монте-Белло (Австралия) в октябре

Таблица 2

Дата испытания	Англия	США	СССР
Декабрь 1942	Атомная бомба	Первый котел, созданный Ферми	Атомная бомба
Август 1945		Атомная бомба (20 тыс. т)	
Август 1949			
Октябрь 1952			Водородная бомба (1 млн. т)
Ноябрь 1952		Водородная бомба (5 млн. т)	
Август 1953			
Март 1954		Водородная бомба (15 млн. т)	
Ноябрь 1955			
Май 1956	•	Водородная бомба, воздушный взрыв (15 млн. т)	Водородная бомба, воздушный взрыв (10 млн. т)

(«Атомная бомба» означает атомный взрыв, в основе которого лежит реакция деления; «водородная бомба» означает термоядерный взрыв, в основе которого лежит реакция синтеза.)

1952 года, второе—спустя один год на полигоне Вумера в Южно-Австралийской пустыне. Предполагается, что во время второго испытания было подорвано устройство для приведения в действие термоядерной бомбы, или детонатор. Третья серия испытаний англичанами атомного оружия началась в мае 1956 года на островах Монте-Белло. «В результате этой, а также четвертой серии испытаний, которые будут происходить на полигоне Маралинга в конце 1956 года, должны быть получены экспериментальные данные в целях выбора наилучшего детонатора для приведения в действие первой созданной в Англии водородной бомбы, взрыв которой будет производиться в районе острова Рождества на Тихом океане в 1957 году»<sup>1</sup>.

В табл. 2 приведены важные этапы в гонке ядерного вооружения.

### СООБЩЕНИЕ КОМИССИИ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ США О ВЗРЫВЕ, ПРОВОДИВШЕМСЯ В МАРТЕ 1954 ГОДА

15 февраля 1955 года Комиссия по атомной энергии США опубликовала отчет «The Effects of High-Yield Nuclear Explosions» («Действие ядерных взрывов большой мощности».—*Ред.*). Это было первое авторитетное сообщение о радиологической опасности, связанной с термоядерным взрывом в марте 1954 года. 3 июня 1955 года Либби (ученый-химик, являющийся членом Комиссии по атомной энергии США) дал подробное объяснение действия радиоактивных частиц, оседающих при термоядерных взрывах. В этой связи следует заметить, что, если бы не случай с японскими рыбаками, которые подверглись действию радиоактивной пыли, выпавшей после термоядерного взрыва в марте 1954 года, вполне возможно, что мир до сих пор частично или даже полностью оставался бы в неведении относительно той огромной опасности, которая угрожает человечеству.

«1 марта 1954 года в 3 часа 40 мин. утра 23 японских рыбака, находившихся на борту рыболовного судна «Фукурюмару» № 5 («Счастливого Дракона») в средней части Тихого океана, примерно в 140 км к северо-востоку от атолла Бикини, внезапно увидели на горизонте в западно-юго-западном направлении красновато-белую

---

<sup>1</sup> «The Times» May, 1956.

вспышку, а спустя 7—8 мин. услышали сильный звук взрыва. Впоследствии стало известно, что это был взрыв водородной бомбы, испытания которой проводились на атолле Бикини. Примерно через три часа после взрыва на судно начала падать тонкая пыль. Выпадение пыли продолжалось несколько часов и прекратилось только около полудня. Судно, рыбаки и вся рыба, пойманная ими, покрылись слоем мелкой белой пыли. После двухнедельного плавания, 14 марта «Фукурюмару», зараженное радиоактивной пылью, возвратилось в японский порт Яйдзу, префектура Сидзуока». (Выдержка из специального выпуска «Бюллетеня института химических исследований» Киотосского университета, ноябрь 1954 года, на тему «Радиоактивная пыль от ядерных взрывов»)<sup>1</sup>.

Томас Меррей, один из членов Комиссии по атомной энергии США, в своей речи<sup>2</sup> 17 ноября 1955 года на обеде в честь золотого юбилея школы юристов в Фордхэме заявил: «Я говорю о трагическом случае с «Фукурюмару», японским рыболовным судном, которое попало в район выпадения радиоактивной пыли после одного из наших термоядерных взрывов во время испытаний на полигоне в Тихом океане в марте 1954 года».

«Перед испытаниями 1954 года проводилась политика почти полного молчания. Принято было решение опубликовать только два сообщения: первое—о том, что намечаются испытания, и второе—об их окончании. Однако стечение обстоятельств все изменило. Радиоактивная пыль осела на судно «Фукурюмару», находившееся в 150 км от места взрыва по направлению ветра. Результаты всем хорошо известны. Новость о потенциальной опасности, связанной с выпадением радиоактивной пыли в результате термоядерных взрывов, стала известна всем. 23 японских рыбака принесли миру первую важную весть о той катастрофе, которая, может быть, ждет нас всех впереди. Официальная политика секретности не дала результатов. Когда секрет вышел наружу косвенными путями, мировое общественное мнение было потрясено».

---

<sup>1</sup> Случай с А. Кубояма, радистом на судне «Фукурюмару», который умер после болезни, длившейся около 7 месяцев, обсуждался Нисиваки в «*Atomic Scientists Journal*», 4, 279, 1955; см. также статью Севитта в «*Medical World*», 84, 385, 1956. Вероятной причиной смерти были излучения, испускаемые радиоактивной пылью.

<sup>2</sup> Murray T. E., Vital Speeches, 22, 107, 1955; см. также «*New York Times*», November 18, 1955.

Едва ли можно сомневаться в том, что основной причиной технических достижений Советского Союза в создании ядерного оружия является то большое внимание, которое уделяется в Советском Союзе вопросу технического и научного образования.

Газета «Таймс» (Лондон) от 31 декабря 1955 года в своей редакционной статье писала: «20 лет назад русские просто из-за своего невежества все еще портили машины, которые они импортировали из-за границы, а уже в этом году они смогли взорвать водородную бомбу. Причина этой перемены заключается в осуществлении русскими революции в области образования, которая может быть так же важна для всего мира, как и политическая революция 1917 года».

Подробное изучение кадров специалистов в СССР было проведено недавно Деуиттом (Национальный научный фонд США, 1955 год). Опубликованные им данные показывают, что в настоящее время число инженеров-специалистов, выпускаемых университетами в Советском Союзе, превышает общий выпуск инженеров всех остальных стран мира. В 1954 году в Советском Союзе было выпущено инженеров 53 тыс. (30% от общего выпуска специалистов в стране), в США—23 и в Англии—3 тыс. человек. Подсчеты показывают также, что общее количество имеющихся инженеров и ученых в США составляет немногим более 800 тыс., а в СССР—около 2 млн. человек, т. е. почти в 2,5 раза больше.

По скромным подсчетам Комиссии по атомной энергии США, потребность страны в ученых и инженерах для работы в области мирного использования атомной энергии к 1965 году составит примерно 50 тыс. человек. Эта цифра намного превосходит то число ученых и инженеров, которое можно будет подготовить к этому времени в США по существующим планам подготовки специалистов<sup>1</sup>. Как отмечает Либби, основным фактором, ограничивающим развитие мирного использования атомной энергии в США, является «острая нехватка в кадрах специалистов».

<sup>1</sup> «Nucleonics», 14, 21, 1956.

## Глава II

### ВЗРЫВЫ, ОСНОВАННЫЕ НА ДЕЛЕНИИ И СИНТЕЗЕ

В данной главе дается описание общих научных принципов, лежащих в основе взрывов, которые происходят в результате реакции деления или реакции синтеза. В конце главы описывается взрыв, основанный на реакции деление—синтез—деление, примером которого может служить взрыв на Бикини 1 марта 1954 года.

Известно, что все вещества состоят из молекул и атомов; атомы в свою очередь состоят из ядра и вращающихся вокруг него электронов. При этом нейтрон электрически нейтрален, а протон имеет положительный заряд, равный по величине заряду электрона, но противоположный ему по знаку. Масса протона в 1836 раз больше массы электрона, а нейтрон немного тяжелее протона—всего на  $1/750$ . Нейтрон, находящийся вне ядра, является неустойчивой частицей и распадается на протон и электрон. Его период полураспада равен около 15 мин.

Ядра с большими массовыми числами, например ядра урана или тория, используются для получения энергии при их расщеплении, в результате которого образуются ядра со средними массовыми числами. Ядра же с малыми массовыми числами используются для получения энергии при их слиянии (синтезе), в результате чего образуются ядра с большими массовыми числами. Примером такого процесса является образование гелия из водорода.

Массовое число ( $A$ ) ядра равно сумме чисел нейтронов и протонов, содержащихся в ядре. Атомный номер ( $Z$ ) ядра равен числу протонов в ядре. Он является важной характеристикой элемента и для каждого элемента имеет свое строго определенное значение. Например, водород имеет атомный номер 1, стронций 38, уран 92. Один и тот же элемент может иметь ядра с различными значениями массового числа ( $A$ ). Эти разновидности элемента



называются изотопами. Изотоп данного элемента (нуклид) определяется величинами  $Z$  и  $A$ . Так,  $Z=92$  и  $A=235$  определяют изотоп урана с массовым числом 235, который обычно пишется: уран 235. Ядро атома урана 238 содержит 92 протона и 146 нейтронов, которые вместе составляют 238 нуклонов (нуклон—любая из двух ядерных частиц—протон или нейтрон). Протоны и нейтроны наиболее тесно связаны в ядрах со средними массовыми числами. В тяжелых и легких ядрах эти связи сравнительно слабее. Именно этим объясняется то, что тяжелые ядра используются для получения энергии при их делении, а легкие—для получения энергии при их синтезе.

Природный уран представляет собой смесь урана 234 (0,006%), урана 235 (0,712%) и урана 238 (99,282%).

Уран 235 получают из природного урана путем отделения его от больших количеств урана 238 с помощью процесса термической диффузии. Плутоний 239 производится в ядерных реакторах. Уран 233 получают из тория в реакторах особого типа. Производство этих веществ является длительным, сложным и дорогостоящим процессом, в котором стоимость 1 фунта делящегося вещества достигает 10 тыс. долл., в то время как получение 1 фунта природного урана (очищенного металла) обходится менее 40 долл. (Стоимость 1 фунта тяжелой воды—около 25 долл.)

### САМОПОДДЕРЖИВАЮЩАЯСЯ И ИСКУССТВЕННО ПОДДЕРЖИВАЕМАЯ РЕАКЦИЯ ДЕЛЕНИЯ

В некоторых веществах, которые мы будем называть «делящимися веществами» (наиболее важными из них являются уран 235, уран 233 и плутоний 239), процесс деления, раз начавшийся в благоприятных условиях, распространяется дальше, превращаясь в самоподдерживающуюся цепную реакцию. В особых условиях такую цепную реакцию можно поддерживать в смесях делящихся и неделящихся материалов, даже если количество делящегося материала является сравнительно небольшим.

В таких веществах, как уран 238 и торий 232, процесс деления, начавшись, не может перейти в самоподдерживающуюся реакцию деления. Для того чтобы в этих веществах она продолжалась, необходимо внутрь их непрерывно добавлять нейтроны, обладающие большой энергией (более подробно об этом сказано в приложении I).

Эти два вида деления мы должны различать. Первый вид мы будем называть *самоподдерживающимся делением*, или для краткости просто делением. Второй вид назовем *искусственно поддерживаемым делением*, или *E-делением*.

В природном уране самоподдерживающаяся цепная реакция невозможна, если его не смешать с «замедлителем», как это имеет место в ядерном реакторе или котле. При этом в реакторе выделение энергии происходит значительно медленнее, чем это требуется для применения его в атомной бомбе. Поэтому, для того чтобы природный уран можно было применять в атомной бомбе, необходимо в этом случае обеспечить условия для *E-деления*. (Если в результате аварии в реакторе цепная реакция станет неуправляемой, то может произойти взрыв. Однако, поскольку этот взрыв в реакторе будет сравнительно продолжительным, он будет очень слабым по сравнению со взрывом атомной бомбы, происходящим практически мгновенно.)

### РЕАКЦИЯ СИНТЕЗА

Реакция синтеза может быть осуществлена различными способами, например путем бомбардировки легких элементов заряженными частицами, получаемыми в циклотронах или в других ускорителях частиц<sup>1</sup>. Однако необходимо отметить, что в этих случаях в реакции синтеза участвует только очень небольшая часть бомбардирующих частиц, и поэтому получаемая в результате этой реакции энергия значительно меньше той, которая затрачивается на ускорение бомбардирующих частиц. Нас интересует сейчас реакция, когда выход энергии значительно превышает (практически превышение должно быть очень большим) количество ее, затрачиваемое на осуществление этой реакции. Такая реакция может быть осу-

---

<sup>1</sup> Реакция синтеза, но не термоядерного происхождения, была осуществлена советскими учеными путем пропускания тока силой в несколько сотен ампер через тяжелый водород. В лекции прочитанной а Харуэлле 25 апреля 1956 года, академик Курчатов впервые открыто и всесторонне осветил этот вопрос. Возможно, есть и такие стороны, которых он в своей лекции не коснулся. Тем не менее его лекция может явиться таким же началом обсуждения в международном масштабе вопросов использования термоядерной энергии, каким явилось первое предложение о созыве Женевской конференции по мирному использованию атомной энергии (*«The Times»*, *«Science Review»* № 20, Summer 1956).

ществлена только при чрезвычайно высоких температурах, порядка нескольких миллионов градусов. Только при таких высоких температурах кинетическая энергия теплового движения отдельных ядер (их будет очень немного) может стать настолько большой, что они смогут преодолеть силы взаимного электрического отталкивания и сблизиться до такой степени, что станет возможным слияние (синтез) этих ядер.

Этот процесс называется термоядерным, или термоядерной реакцией. Скорость реакции чрезвычайно чувствительна к температуре. Во всех случаях практического применения термоядерной реакции важнейшими ее компонентами являются водород и его изотопы дейтерий и тритий или же только дейтерий и тритий<sup>1</sup>.

## ВИДЫ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ И ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЕ

Во избежание путаницы при описании ядерных взрывов необходимо дать им ясное определение.

*Ядерным взрывом* (или ядерным оружием) называется такой взрыв (или ядерное оружие), вся или основная часть энергии которого получается в результате ядерной реакции деления, или синтеза, или их сочетания.

Рассмотрим взрыв, в основе которого лежит реакция деления. Если реакция деления является самоподдерживающейся, то такой взрыв будем называть *взрывом, основанным на самоподдерживающейся реакции деления*, или, для краткости, взрывом, основанным на делении. Учитывая современную терминологию, назовем его атомным взрывом, или *A-взрывом* (*A-бомба*). Атомная бомба с тротиловым эквивалентом 20 тыс. *t* называется *номинальной атомной бомбой*. В случае если реакция деления является искусственно поддерживаемой (например, в уране 238), такой взрыв будем называть *взрывом, основанным на искусственно поддерживаемой реакции деления*. Позже мы увидим, что энергия, выделяющаяся при взрыве, основанном на искусственно поддерживаемой реакции деления, соответствует (обычно) энергии взрыва нескольких миллионов тонн тротила, причем в этом случае образуется большое количество радиоактивных продуктов деления.

---

<sup>1</sup> Это объясняется тем, что ядра водорода имеют наименьший электрический заряд, и поэтому величина кулоновских сил отталкивания в этом случае является наименьшей.

В отчетах Комиссии по атомной энергии США такие взрывы называются взрывами *большой мощности* в отличие от взрывов *малой мощности* (с тротильным эквивалентом, измеряемым в тысячах тонн), основанных на самоподдерживающейся реакции деления.

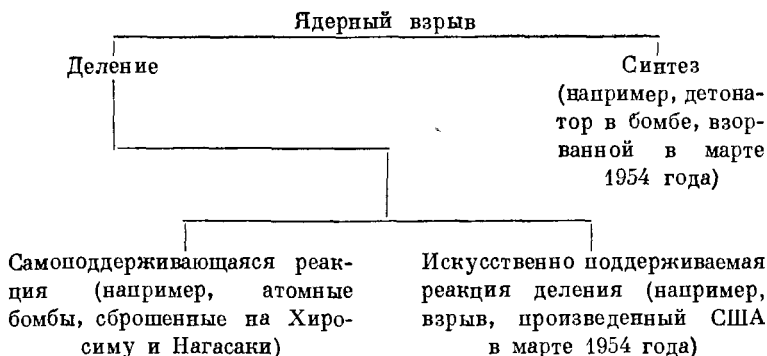
В современной литературе существует довольно большая путаница в употреблении терминов «термоядерный взрыв», «взрыв, основанный на делении» и «взрыв, основанный на синтезе (или водородная бомба)». Ввиду отсутствия официально установленной терминологии одно время считали, что почти вся энергия, выделяющаяся при взрывах с тротильным эквивалентом порядка нескольких миллионов тонн, получается в результате термоядерных реакций, и поэтому такие взрывы называли термоядерными, или взрывами, основанными на синтезе. Теперь, когда стало ясно, что это не так (о чем более подробно будет сказано ниже), во всяком случае, в отношении взрывов с тротильным эквивалентом порядка нескольких миллионов тонн, производившихся во время испытаний 1954 года, было бы явно неправильным все еще употреблять термины «взрывы, основанные на синтезе», или «термоядерные взрывы». В этих взрывах термоядерная реакция использовалась только в качестве детонатора. Совершенно очевидно, что название взрыва должно соответствовать названию процесса, который является основным источником энергии, а не названию процесса, лежащего в основе пускового или какого-либо другого вспомогательного устройства. Поэтому по возможности мы будем избегать старой терминологии и будем, например, называть взрыв, произведенный в марте 1954 года, взрывом большой мощности, основанным на делении, или просто взрывом большой мощности<sup>1</sup>. Бомба с тротильным эквивалентом 20 млн. *t* называется *номинальной бомбой большой мощности*.

Взрывом, основанным на синтезе, мы будем называть такой взрыв, при котором почти вся энергия выделяется в результате реакции синтеза (термоядерной реакции). Для того чтобы подчеркнуть этот факт, мы в дальнейшем иногда будем говорить о таком взрыве, как о взрыве, основанном *полностью на синтезе*.

---

<sup>1</sup> Для удобства изложения материала в гл. I применяется старая терминология.

Ниже приводятся различные виды взрывов:



## ВЗРЫВ НА БИКИНИ, ПРОИЗВЕДЕННЫЙ В МАРТЕ 1954 ГОДА

После этого разъяснения терминологии перейдем к рассмотрению взрыва, произведенного во время испытаний ядерного оружия в марте 1954 года. Тритиловый эквивалент этого взрыва обычно считают равным 15 млн. *т*<sup>1</sup>. Это единственный опытный взрыв, о котором официально опубликованы некоторые сведения.

В отчете от 15 февраля 1955 года Комиссия по атомной энергии США впервые описала в общих чертах характер выпадения радиоактивной пыли в районе взрыва. Радиоактивная пыль выпала после взрыва «термоядерного устройства» (как сказано было в отчете Комиссии по атомной энергии), который был произведен на коралловом острове Бикини 1 марта 1954 года. Было совершенно очевидно (хотя в отчете ничего об этом не сказано), что площадь заражения радиоактивной пылью намного превышала ту площадь, которая могла бы получиться при взрыве, полностью основанном на синтезе и имеющем тритиловый эквивалент, равный нескольким миллионам тонн.

Ротблат<sup>2</sup> первым высказал совершенно определенное предположение о том, что единственным объяснением выпадения большого количества радиоактивной пыли (о котором сообщила комиссия по атомной энергии)

<sup>1</sup> «Nuclear Weapons» (Manual of Civil Defence, vol. 1, Pamphlet, N 1) H.M.S.O., 1956.

<sup>2</sup> Rotblat J., *Atomic Scientists Journal*, 4, 224, 1955.

являлся тот факт, что в действительности «термоядерное устройство» было не чем иным, как устройством, основанным на реакции деления.

Следующее предположение Ротблата, непосредственно вытекающее из первого, заключалось в том, что в качестве делящегося материала в этом случае используется уран-238 который легко может быть получен в большом количестве.

Такие же предположения высказал Лэпп<sup>1</sup>. Хотя со стороны самой комиссии по атомной энергии официального сообщения по этому поводу еще не поступало, тем не менее заявление члена комиссии по атомной энергии Либби<sup>2</sup>, сделанное им 3 июня 1955 года, не оставляет никаких сомнений в том, что основная часть энергии взрыва была получена в результате реакции деления.

Об этом же заявил Дж. Коккрофт<sup>3</sup> в своем выступлении перед объединенным парламентским и научным комитетом Великобритании в апреле 1955 года. Он сказал, что в результате произведенного взрыва выпало в сотни и тысячи раз больше радиоактивных продуктов деления, чем выпадает обычно при взрыве атомной бомбы. Далее он продолжал: «Однако заражение имеет такой же характер, как и при взрыве атомной бомбы. Образовались такие же радиоактивные продукты деления, и распад происходит таким же порядком».

Как уже указывалось выше, радиоактивное действие взрыва, основанного полностью на синтезе, является незначительным (примерно в 100 раз меньшим) по сравнению с радиологическим действием взрыва той же мощности, основанного на делении. Включая в бомбу, основанную полностью на синтезе, такие вещества, которые становятся сильно радиоактивными при поглощении испускаемых при взрыве нейтронов (например, кобальт), можно усилить радиологическое действие взрыва. И все же оно будет значительно слабее, чем радиологическое действие бомбы того же калибра, основанной на делении.

«Кобальтовая бомба не даст никаких преимуществ тому безумцу, который ее создаст». Включение кобальта

<sup>1</sup> L a p p R. E., *Bulletin of the Atomic Scientists*, 11, 45, 206, 1955.

<sup>2</sup> L i b b y W. E., *Bulletin of the Atomic Scientists*, 11, 256, 1955.

<sup>3</sup> C o c k r o f t J., *Nature*, 175, 873, 1955.

в бомбу, основанную на делении, не окажет сколько-нибудь существенного влияния на ее радиологическое действие.

Важным доказательством правильности указанных предположений является работа японских ученых, которые произвели анализ радиоактивной пыли, выпавшей на рыболовное судно «Фукурюмару». Они<sup>1</sup> (еще до того как Ротблат сделал свое предположение) определили, что в радиоактивной пыли содержится значительное количество изотопа урана—U 237. Этот изотоп подвергается бета-распаду и имеет период полураспада, равный всего одной неделе, вследствие чего он не содержится в природном уране. U 237 образуется в результате поглощения ураном 238 одного быстрого нейтрона (с энергией около 10 Мэв), а затем испускания двух нейтронов, то есть в результате потери одного нейтрона ураном 238.

Но поскольку при реакции деления нейтроны с такой большой энергией отсутствуют и, наоборот, при реакции синтеза ( $\text{H}^3-\text{H}^2$ ) они имеются в большом количестве, то их присутствие (о чем можно судить на основании наличия урана 237 в радиоактивной пыли) указывает на то, что при взрыве на Бикини<sup>2</sup> в бомбе был использован термоядерный детонатор.

---

<sup>1</sup> См. N o s h i w a k i Y., *Atomic Scientists Journal*, 4, 279, 1955. Японские ученые обнаружили присутствие U 237 также в радиоактивной пыли, выпавшей после термоядерного взрыва, произведенного в СССР в ноябре 1955 года («Times», April 16, 1956).

<sup>2</sup> Наблюдалось также выпадение большого количества радиоактивных веществ вместе с дождем в южных и центральных районах Японии и вдоль ее Тихоокеанского побережья в период второй половины мая 1954 года. Позже количество радиоактивных веществ, выпадающих с дождем, снизилось, но затем, начиная с середины сентября, опять резко повысилось, особенно в южной части Японии. Радиоактивность дождевых осадков, выпадавших в течение мая, составляла примерно 0,1—1,0 мккюри/л, то есть в несколько тысяч раз больше максимально допустимой радиоактивности для питьевой воды. Причиной радиоактивности дождевых осадков в мае был взрыв, произведенный США в марте 1954 года. Причина же повышения радиоактивности дождевых осадков в сентябре 1954 года не ясна. Возможно, что повышение является следствием ядерных взрывов, которые производились в Советском Союзе в северо-восточной части Сибири или на острове Врангеля. 29 апреля и в последующие дни до середины июля 1955 года наблюдалось также выпадение радиоактивных веществ вместе с дождем над Калькуттой. Анализ проб воздуха, взятых самолетами, показал, что в атмосфере находились радиоактивные вещества, распад которых происходил по обычному закону (N i s h i w a k i J., *Atomic Scientists Journal*, 4, 279, 1955; C h a t t e r j e e S., *ibid.* 273).

Необходимо здесь отметить также то обстоятельство, что термоядерный взрыв, произведенный 1 ноября 1952 года на Маршалловых островах (испытание «Майк»), привел к открытию<sup>1</sup> двух новых элементов—эйнштейния ( $Z=99$ ) и фермия ( $Z=100$ ), названных так в честь Эйнштейна и Ферми. Эти нуклиды были обнаружены в остатках облученного урана 238 после взрыва. Они образовались в результате поглощения нейтронов ураном 238. Для того чтобы могли образоваться нуклиды эйнштейния 255 или фермия 255, ядро урана 238 должно поглотить 17 нейтронов. Это говорит о том, что при взрыве «Майк» испускался мощный поток нейтронов.

Когда мы рассматриваем взрыв, произведенный в марте 1954 года, то возникает вопрос: если этот взрыв основан на реакции деления, то зачем понадобилось производить его теперь, спустя десять лет после взрывов такого же рода в Хиросиме и Нагасаки? Мощность этого взрыва была в 1000 раз больше, чем мощность взрыва в Хиросиме, но этого можно было бы достичь за счет увеличения в бомбе количества урана 235 в 1000 раз. Что же в этом взрыве нового? Ответ очень прост. Новое заключается в создании более экономичного оружия, что является основным и важнейшим фактором в военных планах применения ядерного оружия. Мы здесь не будем вдаваться в подробности вопроса экономичности систем оружия. Системой оружия называют комплекс, состоящий из самого оружия, средств его доставки к цели и различного оборудования, необходимого для применения этого оружия. Достаточно сказать, что эффективность системы оружия определяется отношением ущерба, причиненного цели, к усилиям и ресурсам, затраченным на производство данной системы оружия (при этом следует заметить, что, за исключением очень простых случаев, чрезвычайно трудно выразить это отношение в количественных величинах).

Для наглядности представим себе цель, для разрушения которой требуется энергия взрыва, эквивалентная 20 млн. *т* тринитротолуола (тротила). Если бы источником этой энергии был тринитротолуол, то стоимость его составила бы примерно 10 млрд. долл., или около одной трети бюджета, идущего на вооруженные силы США. Если же источником этой энергии является делящийся

<sup>1</sup> Ghiorso A. et al., *Physical Review*, 99, 1048, 1955; Fields P. R. et al., *Physical Review*, 102, 180, 1956.



материал (при этом мы считаем, что только 20% этого материала подвергается делению во время взрыва), то требуемое количество делящегося материала будет составлять около 5000 кг и стоимость его будет равна примерно 100 млн. долл<sup>1</sup>. Однако если бы удалось использовать в качестве делящегося материала природный уран, то стоимость его составляла бы всего около четверти миллиона долларов.

Но при сравнении эффективности обычных фугасных бомб с эффективностью ядерного оружия мы ни в коем случае не должны сбрасывать со счета средства доставки оружия к цели. Если мы все же не будем их учитывать, то этим самым мы только подчеркнем необыкновенную «дешевизну» ядерного оружия по сравнению с обычным оружием.

Рассматривая вопрос о требуемом количестве бомб одного и другого вида для достижения одинакового эффекта при действии по одной и той же цели, мы приходим к выводу, что в случае ядерного оружия средства доставки являются более экономичными, чем в случае обычного оружия. Несмотря на примитивность этого доказательства, становится ясным, почему страны, стремящиеся накопить запасы оружия, используя для этих целей научные и промышленные ресурсы, предпочитают именно ядерное оружие, а не оружие обычного типа. При затрате одинаковых денежных средств и усилий ядерное оружие по сравнению с обычным является в тысячи раз (если не больше) более эффективным с точки зрения причиненного ущерба.

Поэтому возможность использования урана 238 в качестве основного источника энергии, выделяющейся при взрывах большой мощности (порядка нескольких миллионов тонн), означает большой шаг вперед. Если можно использовать уран 238, значит, можно использовать также и природный уран. Однако использование урана 238 является более экономичным, поскольку он остается как продукт отхода при получении дорогостоящего урана 235 на термодиффузионных заводах и в ядерных реакторах. В качестве источника энергии может быть также использован торий, и вполне возможно, что он уже был использован.

---

<sup>1</sup> Ежегодное производство урана 235 и плутония 239 предположительно равно 20 тыс. кг.

Для деления урана 238 требуется, однако, наличие нейтронов, обладающих гораздо большей энергией, чем энергия нейтронов, участвующих обычно в реакции деления, поэтому в уране 238 деление, даже если оно началось, не может перейти в самоподдерживающуюся цепную реакцию. Оно может быть поддержано только в результате постоянного добавления нейтронов с большой энергией (порядка 5 млн. электрон-вольт)<sup>1</sup>. Источником таких нейтронов, обладающих большой энергией, является термоядерная реакция. Для того чтобы началась термоядерная реакция, требуется чрезвычайно высокая температура. Поэтому для инициирования этой реакции необходимо специальное пусковое устройство. Рассмотрим вкратце, как можно осуществить инициирование термоядерной реакции.

Термоядерная реакция очень чувствительна к температуре, но не зависит от плотности вещества. Возьмем, например, реакцию слияния трития и дейтерия, которая по сравнению со всеми другими термоядерными реакциями приобретает большую скорость уже при температуре 1 млн. градусов. Однако если повысить температуру от 1 млн. до 2 млн. градусов, то скорость реакции возрастет почти в миллион раз. При температуре 2 млн. градусов скорость выделения энергии достигает величины порядка  $10^{10}$  кал/сек на 1 г смеси<sup>2</sup>.

Когда термоядерная реакция уже началась, она может быть поддержана и даже ускорена с помощью тепла, выделяющегося при самой реакции. Пока существуют такие условия (например, при достаточно большой реагирующей массе), при которых скорость потери тепла реагирующей системой меньше скорости выделения тепла при реакции синтеза, термоядерная реакция будет продолжаться. Когда такие условия перестают существовать, температура падает и реакция быстро прекращается.

Наиболее подходящим средством для обеспечения высокой температуры, при которой становится возможной термоядерная реакция, является взрыв, основанный

---

<sup>1</sup> 1 млн. электрон-вольт ( $Mэв$ ) равен энергии, которую приобретает электрон, пройдя в постоянном электрическом поле разность потенциалов в 1 млн. в. 1  $Mэв = 1,6 \cdot 10^{-6}$  эрг.

<sup>2</sup> Ridenour L. N., *Scientific American*, 182, 11, 1950.

на самоподдерживающейся реакции деления. Существует, по-видимому, возможность (причем эта возможность уже может быть использована) применения для инициирования термоядерной реакции обычных химических взрывчатых веществ. При этом может быть использован либо принцип кумуляции, либо свойства ударных волн. Скорости порядка  $10^7$  см/сек отмечались для очень небольшой части фронта кумулятивной струи<sup>1</sup> заряда с бериллиевой облицовкой, подорванного в вакууме<sup>2</sup>. Эта огромная кинетическая энергия соответствует начальной скорости распространения ударной волны при температуре взрыва около 1 млн. градусов. Однако средняя скорость кумулятивной струи примерно в десять раз меньше.

Теперь перейдем к рассмотрению взрыва, основанного на делении U238. Такой взрыв является по существу процессом, в течение которого происходят три последовательные реакции: деление—синтез—деление. Рассмотрим в качестве примера взрыв бомбы с тротильным эквивалентом 20 млн. т. На первой стадии процесса происходит расщепление делящегося материала (например, плутония), в результате чего выделяется энергия, эквивалентная энергии примерно 0,5 млн. т тротила. Это количество энергии выделяется при полном расщеплении 25 кг делящегося материала, при этом общее количество делящегося материала будет в 5—10 раз больше в зависимости от эффективности его использования. Большинство нейтронов, получаемых при этой реакции, будет иметь энергию, недостаточную для обеспечения деления урана 238. Поэтому получение нейтронов, обладающих большой энергией и поэтому способных обеспечить реакцию деления урана 238, является основной целью реакции. Реакция деления, происходящая во время первой стадии, обеспечивает высокую температуру, необходимую для протекания реакции синтеза. Смесь, в которой происходит реакция синтеза, и делящийся материал могли бы составить единое целое, причем взрыв можно было бы произвести, используя обычные взрывчатые вещества и направив этот взрыв внутрь. (Принцип имплозии, или взрыва, направленного внутрь, объясняется в приложении II.)

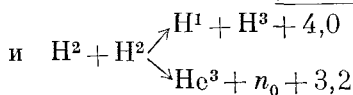
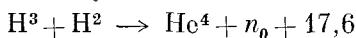
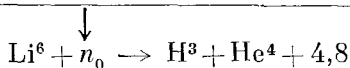
<sup>1</sup> Sampooran Singh, *Defence Science Journal*, 5, 169, 1955.

<sup>2</sup> Kosky W. S. et al., *Journal of Applied Physics*, 23, 1300, 1952; H a j e k H. V., *Explosivstoffe*, 3, 65, 1955.

Для получения энергии, эквивалентной 20 млн. *т* тротила, необходимо расщепить почти 1000 кг урана 238. Чтобы получить необходимое количество нейтронов, обладающих большой энергией, потребуется около 20 кг смеси дейтерида лития 6 ( $\text{Li}^6\text{D}$ ). Смесь, в которой происходит реакция синтеза, может, по-видимому, содержать очень небольшое количество трития для того, чтобы могла начаться термоядерная реакция. В результате реакции синтеза, происходящей в этой смеси, освобождается энергия, эквивалентная 2 млн. *т* тротила. Нейтроны, получаемые на первой стадии, вступают в реакцию с литием 6, образуя тритий, который в свою очередь вступает в реакцию с дейтерием, в результате чего получают нейтроны, обладающие очень большой энергией.

Приводим вероятные реакции *синтеза* (энергия выражена в миллионах электрон-вольт, или *Мэв*).

От деления Pu 239 или U 235



на деление U238

Таким образом, основным источником энергии взрыва бомбы, основанной на реакции деление—синтез—деление, является уран 238, который обеспечивает получение более 80% всей энергии. Успехи, достигнутые в области развития ядерного оружия за последние десять лет, можно охарактеризовать следующими словами: «от урана 235 к урану 238».

Мы уже отмечали, что при взрывах одинаковой мощности радиологическое действие взрыва, основанного полностью на реакции синтеза, значительно меньше, чем радиологическое действие взрыва, основанного на делении.

Поэтому в определенной тактической обстановке (например, при разрушении объектов и районов, которые впоследствии могут быть использованы или оккупированы своими войсками) применение оружия, основанного на синтезе, будет более выгодным, чем применение оружия, основанного на делении. Создание бомбы, основанной полностью на синтезе, является более трудной задачей, чем создание бомбы, основанной на реакции деление—синтез—деление. Это можно объяснить тем, что в бомбе, основанной на реакции деление—синтез—деление, смесь, обеспечивающая реакцию синтеза, окружена оболочкой из урана 238, которая является дополнительным источником тепла для протекания реакции синтеза. Выделение этого тепла происходит в результате деления урана 238, подвергающегося интенсивной бомбардировке нейтронами, которые выделяются при реакции синтеза. При наличии урановой оболочки потеря тепла, выделяемого сердечником, в котором идет реакция синтеза, значительно меньше, чем в случае отсутствия такой оболочки.

В настоящее время, по-видимому, делаются попытки создать бомбу, основанную полностью на синтезе. Так, например, по некоторым неофициальным сообщениям прессы, можно заключить, что 21 мая 1956 года США провели испытание бомбы мощностью порядка нескольких миллионов тонн, основанной полностью на реакции синтеза. Предполагается, что бомба такого же типа, но значительно меньшей мощности была испытана 5 мая 1956 года.

Однако следует здесь отметить, что в настоящее время считают едва ли возможным создание бомбы, основанной полностью на синтезе, тротиловый эквивалент которой был бы значительно меньше одного миллиона тонн.

## *П р и л о ж е н и е I<sup>\*</sup>*

### **ВЗРЫВ, ОСНОВАННЫЙ НА ДЕЛЕНИИ, И «КРИТИЧЕСКИЕ РАЗМЕРЫ»; ИМПЛОЗИЯ**

В настоящем приложении содержится краткое и очень упрощенное объяснение механизма цепной реакции деле-

ния, понятия «критические размеры» и принципа имплозии в той степени, в какой они относятся к ядерным взрывам<sup>1</sup>.

Ядро урана 235, захватив нейтрон, расщепляется на два примерно одинаковых дочерних ядра (в очень редких случаях отмечается также деление ядра на три осколка). При этом испускается 2—3 нейтрона или в среднем 2,5 нейтрона на одно деление, продолжительность которого составляет всего  $10^{-15}$  сек. Эти нейтроны называются *мгновенными*. Кроме того, нейтроны испускаются также продуктами деления через некоторое время после деления первоначального ядра—от долей секунды до нескольких секунд. Такие нейтроны называются *запаздывающими*. Количество их составляет не более 1% от общего количества мгновенных нейтронов. Большинство мгновенных нейтронов обладает энергией от 1 до 2 млн. электрон-вольт (*Мэв*). Энергетический спектр от 0,1 до 18 *Мэв* определяется следующей формулой

$$n(E) = \sqrt{\frac{2}{\pi e}} \cdot e^{-E} \sinh \sqrt{2E} \quad (E \text{ в } \text{Мэв}),$$

где  $n(E)$ —нормировано к единице. Максимум кривой отмечается примерно в точке 0,8 *Мэв*, а для  $E > 2$  *Мэв* кривая падает, согласно экспоненциальному закону. (Приведенная выше формула спектра относится к делению, вызванному медленными нейтронами в U 235 или Pu 239, однако почти такого же вида уравнение будет соответствовать и делению, вызванному быстрыми нейтронами.) В случае U 233, U 235 и Pu 239 не существует нижнего предела для величины кинетической энергии, которой должен обладать нейтрон для того, чтобы он мог вызвать деление ядра после захвата этого нейтрона ядром. Именно поэтому эти три элемента называются делящимися материалами и только они имеют практическое значение. Для неделящегося ядра энергия падающего нейтрона должна превышать определенное пороговое значение для того, чтобы этот нейтрон мог вызвать деление ядра после его захвата. Для U 238 и Th 232 пороговое значение энергии равно примерно 1,1 *Мэв*. (Следует отметить, что любое тяжелое ядро может подвергнуться делению, если энергия возбуждения будет достаточно большой. Так, например,

---

<sup>1</sup> Более подробное объяснение процесса деления имеется в «Reactor Handbook: Physics», USAEC, 1955.

деление золота происходит в том случае, когда нейтроны обладают энергией до 100 Мэв.)

Рассмотрим деление чистого U 235. После того как ядро U 235 захватит нейтрон, оно делится, испуская при этом нейтроны. Эти нейтроны захватываются другими ядрами, которые в свою очередь делятся и также испускают нейтроны. Таким образом, развивается процесс, называемый цепной реакцией. Такой процесс продолжается до тех пор, пока не истощится запас урана или же пока цепная реакция деления не будет прекращена другим способом (например, с помощью материалов, поглощающих нейтроны). Описанную нами самоподдерживающуюся цепную реакцию называют процессом деления на быстрых нейтронах, так как средняя энергия нейтронов, участвующих в этой реакции, является большой—порядка одного миллиона электрон-вольт.

Совершенно иначе будет обстоять дело, если мы возьмем чистый U 238 или же природный уран. В этом случае, даже если нейтрон будет иметь энергию большую, чем пороговая, наиболее вероятным результатом столкновения его с ядром U 238 будет не захват, а неупругое рассеяние. Нейтрон при этом потеряет часть своей энергии, и уже при следующем столкновении величина его энергии будет ниже порогового значения. В силу этого для U 238 деление ядра, вызванное захватом нейтрона, является очень редким. При этом количество нейтронов все время будет уменьшаться. Если к вопросу подойти количественно, с точки зрения установленных эффективных сечений деления, захвата нейтронов с испусканием гамма-излучения (радиационного захвата), упругого и неупругого рассеяния и других возможных процессов, то мы придем к заключению, что в чистом U 238, в чистом Th 232 и в природном уране самоподдерживающаяся цепная реакция невозможна. Этот факт имеет большое значение при рассмотрении взрывов, основанных на реакции деления—синтез—деление, которые были уже описаны в главе II. В этой связи определенный интерес представляют приведенные ниже табл. 3 и 4.

Цепная реакция может быть, однако, осуществлена и в природном уране, если мы сможем уменьшить до минимума вредное действие ядер U 238 (то есть поглощение нейтронов, за которым не следует деление ядер). В ядерном реакторе это достигается следующим образом. Ней-

Эффективное сечение деления и полное сечение  
для различных энергий нейтронов<sup>1</sup>  
(Единица измерения—*барн*— $10^{-24}$  см<sup>2</sup>)  
 $\sigma_f$ —эффективное сечение деления  
 $\sigma_t$ —полное сечение (включая рассеяние)

Энергия нейтронов	$\sigma_f$	$\sigma_t$				
	Тепловая (скорость= 2200 м/сек) 0,025 эв	1 Мэв	2 Мэв	0,025 эв	1 Мэв	2 Мэв
Уран 235	600	1	1	700	7	7
Уран 238	0	0,02	0,5	11	7	7

Таблица 4

Значения<sup>2</sup>  $\nu$  и  $\eta$   
( $\nu$ —среднее количество нейтронов, испускаемых  
за одно деление  
 $\eta$ —среднее количество нейтронов, испускаемых в результате  
поглощения одного нейтрона)

Среднее количество ( $\nu$ ) нейтронов, испускаемых при делении в ре- зультате поглощения одного теплового нейтрона	Среднее количество ( $\eta$ ) нейтро- нов, испускаемых в результате поглощения одного теплового (быстрого) нейтрона	
	тепловой	быстрый
Уран 235	2,46	2,08
Уран 238	2,59	2,29
Плутоний 239	2,95	2,08
		2,33
		2,7

Если (см. таблицу 4)  $\eta < 1$ , самоподдерживающаяся цепная реакция невозможна. Для природного урана  $\eta = 1,32$  в случае тепловых нейтронов (энергия тепловых нейтронов меньше 1 электрон-вольта) и  $\eta < 1$  в случае быстрых нейтронов. В чистом уране 235 около 84% захватов тепловых нейтронов вызывает деление, в плутонии 239—65% захватов.

<sup>1</sup> «Neutron Cross Sections», USAEC, 1955.

<sup>2</sup> «Reactor Handbook: Physics», USAEC, 1955. Zinn W. H., Review of Fast Power Reactors, Proceedings of the International Conference on the Peaceful uses of Atomic Energy held at Geneva, vol. 3, 1955 (United Nations, 1956).



троны, получающиеся при делении U 235, который содержится в природном уране, сразу же попадают из урана (в реакторе урановые стержни обычно образуют решетку<sup>1</sup>, окруженную веществом-замедлителем) в замедлитель, из которого они спустя некоторое время снова возвращаются в уран. В качестве замедлителя могут быть использованы графит, тяжелая вода, бериллий и обычная вода. Основное назначение замедлителя—замедлять нейтроны, то есть уменьшать их первоначальную энергию, равную примерно 1 миллиону электрон-вольт, до значительно меньшей энергии тепловых нейтронов и таким образом доводить до минимума количество радиационных захватов. Вероятность захвата теплового нейтрона ураном 235 в сотни раз больше, чем вероятность такого захвата ураном 238. Другими словами, хотя в природном уране количество урана 238 во много раз превышает количество урана 235, *тепловые нейтроны* «не признают» его присутствия.

Однако этот способ нельзя применить в случае ядерного оружия, основанного на делении, поскольку, для того чтобы в результате деления произошел взрыв, энергия должна выделяться в течение времени, измеряемого *микросекундами*. В этом случае не хватает времени для замедления нейтронов, и поэтому для производства взрыва, основанного на делении, необходимо использовать чистый делящийся материал или по меньшей мере материал с высоким содержанием делящегося вещества. По этой же причине взрыв, основанный на делении, происходит с участием только *мгновенных нейтронов*. *Запаздывающие нейтроны* не играют при этом никакой роли, хотя их роль в осуществлении управления работой реактора очень велика. Именно благодаря им можно практически осуществлять управление работой реактора.

Из того, что было уже сказано, ясно, что достаточно большое количество чистого делящегося материала должно быть обязательно неустойчивым; любой блуждающий нейтрон или нейтроны, образовавшиеся при «самопроиз-

---

<sup>1</sup> В гомогенной смеси природного урана и графита независимо от величины массы такой смеси цепная реакция деления невозможна. Но достаточно большая масса гомогенной смеси урана и тяжелой воды (которая является лучшим замедлителем, чем графит) может прийти в критическое состояние.

вольном делении»<sup>1</sup>, вызовут цепную реакцию деления, в результате которой произойдет спонтанный взрыв. Поскольку при каждом захвате нейтрона испускается более двух нейтронов, цепная реакция нарастает с огромной скоростью. Если сечение захвата нейтронов равно  $1 \text{ барн}$  ( $10^{-24} \text{ см}^2$ ), то расщепление  $1000 \text{ кг}$  делящегося вещества произойдет за несколько микросекунд. Далее возникает вопрос о том, что же будет происходить с очень малым количеством делящегося вещества. Рассмотрим настолько малое количество делящегося вещества, что нейтрон, находящийся внутри него, может свободно выйти из этого вещества, не столкнувшись при этом ни с одним из ядер. В этом случае большая часть нейтронов деления уйдет из вещества вместо того, чтобы участвовать в цепной реакции, в результате чего цепная реакция заглухнет. Таким образом, мы пришли к важному понятию *критических размеров* или *критической массы*<sup>2</sup>. Для того чтобы цепная реакция продолжалась, необходимо, чтобы в среднем на каждый нейтрон, который был поглощен или ушел из вещества, добавлялся в результате деления по меньшей мере один новый нейтрон. Система, в которой соблюдается это условие, называется «критической».

Для сверхкритической массы на каждый утерянный нейтрон приходится более одного нового нейтрона. При этом цепная реакция нарастает с огромной скоростью.

<sup>1</sup> Самопроизвольное деление урана открыли советские ученые Флеров и Петряк в 1940 году. Уран 235 распадается со скоростью 1 распад в час на  $1 \text{ г}$  вещества. Экспериментальным путем установлено, что период полураспада для самопроизвольного деления находится в экспоненциальной зависимости от величины  $Z^2/A$ . Он равен  $10^{19}$  лет при  $Z^2/A=35$  и  $10^{-20}$  сек. при  $Z^2/A=45$ . Недавно открытый элемент менделевий ( $Z=101$ ;  $A=256$ ;  $Z^2/A=39,8$ ) имеет период полураспада, равный примерно 1 часу.

<sup>2</sup> Радиус критической массы, имеющей форму шара, определяется по формуле

$$R \approx \frac{\pi A}{d N_0 (3\pi/4)^{2/3}} \frac{0,71 A}{\sigma_t d N_0},$$

где  $d$ —плотность,  $A$ —массовое число урана,  $N_0$ —число Авогадро. Если в формулу подставить числовое значение, взятое из таблиц 3 и 4, мы получим, что  $R=7,3 \text{ см}$ . Этому радиусу соответствует критическая масса  $30 \text{ кг}$ .

В докритической массе количество утерянных нейтронов преобладает над количеством образующихся нейтронов, следовательно, в этом случае цепная реакция не может развиваться.

Совершенно ясно, что линейные размеры *критической массы* должны быть соизмеримыми со средней длиной свободного пробега нейтрона деления. Линейным размером, который мы учитываем в данном случае, является, конечно, эффективный линейный размер, например диаметр в случае шара или толщина стенки в случае тонкой сферической оболочки. Очевидно, меняя форму (линейные размеры) данного количества делящегося материала, имеющего докритическую массу, в некоторых случаях можно сделать его массу критической. Это произойдет, например, в том случае, когда мы тонкую сферическую оболочку сожмем в шар. Осуществить это можно следующим образом: вокруг тонкой сферической оболочки размещается обычное взрывчатое вещество, которое затем подрывается. В результате этого получаем сверхкритическую массу, в которой начинается цепная реакция, совершающаяся взрывом делящегося материала. Такой способ получения критической массы основан на *принципе имплозии* (взрыва, направленного внутрь.—*Ред.*). Считают, что этот принцип был впервые применен в бомбе, сброшенной на Нагасаки. (Предполагают, что в бомбе, сброшенной на Хиросиму, для получения критической массы был использован несколько другой принцип, заключающийся в том, что отдельные куски делящегося материала, масса каждого из которых сама по себе является докритической, соединялись вместе, образуя сверхкритическую массу. Эти куски были помещены в противоположных концах толстостенной трубы и затем при помощи взрыва обычного взрывчатого вещества были соединены вместе.)

Мы уже говорили о том, что для критической массы эффективный линейный размер должен быть сравним со средней длиной свободного пробега нейтрона, которая обратно пропорциональна количеству ядер, содержащихся в единице объема вещества. Поэтому можно приближенно считать, что величина критической массы обратно пропорциональна квадрату плотности делящегося вещества. Если делящееся вещество, масса которого равна критической, подвергнуть расширению, что в действительности и происходит при повышении температуры и давления,

вызванном самим процессом деления, то произойдет уменьшение плотности, в результате чего масса его станет докритической, и, следовательно, начавшаяся в нем цепная реакция прекратится. Цепная реакция замедляется также продуктами деления, из которых многие обладают способностью сильно поглощать нейтроны. Вследствие этих двух причин *первоначальное* количество делящегося материала, необходимое для осуществления ядерного взрыва, должно значительно превышать критическую массу. Даже в идеальном случае, когда неразделившаяся масса станет меньше критической, цепная реакция прекращается. Таким образом, в каждой атомной бомбе неизбежно пропадает (не подвергается делению) количество делящегося материала, по меньшей мере равное критической массе. Из этого следует, что атомные бомбы малого калибра являются менее экономичными в отношении использования делящегося материала, чем бомбы большого калибра.

Однако можно воспользоваться зависимостью критической массы от плотности для повышения эффективности использования делящегося материала. Во время реакции деления—во всяком случае, в первой ее стадии—делящийся материал подвергается интенсивному сжатию давлением порядка одного миллиона атмосфер, в результате чего его плотность увеличивается вдвое, а критическая масса соответственно уменьшается в четыре раза. Считают, что такое высокое давление создается с помощью усовершенствованных взрывов, *основанных на принципе имплозии*. Атомное оружие, основанное на этом принципе, называется «докритическим». В «докритическом» атомном оружии удалось значительно повысить процент полезного использования делящегося материала. По-видимому, именно таким путем осуществлено повышение эффективности использования делящегося материала, в результате чего количество материала, претерпевающего деление, возросло до 20% и более.

Следует еще раз отметить, что успешное осуществление ядерного взрыва основано на чрезвычайно большой скорости нарастания цепной реакции на быстрых нейтронах. Если бы скорость реакции не была так велика, то чрезвычайно большие ускорения (порядка  $10^{12}$  см/сек<sup>2</sup>), которые сообщаются оболочке бомбы, привели бы к значительному ее расширению, в результате чего уменьшилась бы плотность делящегося материала внутри оболочки. Это в свою

очередь привело бы к прекращению ценной реакции по причинам, которые уже были объяснены выше. При огромных давлениях, создающихся при ядерных взрывах, скорость разрушения оболочки, которая удерживает делящееся вещество в компактном виде, зависит только от ее массы (то есть от ее инерционных свойств); прочность материала оболочки играет ничтожную роль.

Теоретическое и экспериментальное изучение свойств критических масс чистых делящихся материалов приобрело в настоящее время еще большее значение, так как оно обеспечивает получение ценных данных, необходимых не только для создания образцов атомного оружия, но также и для создания ядерных реакторов на быстрых нейтронах, то есть реакторов, в которых цепная реакция поддерживается быстрыми нейтронами. В таких реакторах нет замедлителя; они имеют сравнительно малый размер и создаются для размножения делящихся материалов из основного ядерного горючего, то есть для получения большего количества делящегося материала по сравнению с тем, которое потребляется в реакторе. Таким образом, можно, например, получить уран 233 из тория 232. Примером реактора на быстрых нейтронах является реактор «EBR» (США), который был пущен в ход в декабре 1951 года. Вторым примером реактора такого типа может служить строящийся в настоящее время в Англии реактор «Доунрей» (Downreay), проектная стоимость которого составляет несколько миллионов фунтов стерлингов. Радиоактивность продуктов деления в активной зоне такого реактора равна примерно сотне миллионов кюри.

Краткое описание трех простых экспериментальных критических систем дано в журнале «*Nucleonics*» (октябрь 1955 года). Они известны под названием «Годива» (Godiva) (U 235), «Топси» (Topsy) (U 235) и «Джезебель» (Jezebel) (Pu 239). Эти реакторы используются также в качестве мощных источников нейтронов (мощность потока  $10^{16}$  нейтронов в 50 мксек), необходимых при изучении запаздывающих нейтронов, получаемых при делении облученных материалов. Такой экспериментальный реактор является докритическим и поэтому безопасным. Когда при помощи дистанционного управления его части соединяются вместе, он приходит в критическое состояние с учетом запаздывающих нейтронов, то есть становится критиче-

ским в отношении к общему количеству нейтронов—мгновенных и запаздывающих.

В этом случае нарастание ценной реакции происходит сравнительно медленно, так как оно зависит от запаздывающих нейтронов.

Когда реактор «Годива» приходит в критическое состояние с учетом запаздывающих нейтронов, внутрь активной зоны вводится с большой скоростью блок урана 235; останавливают его в том месте, где эффективность его наибольшая.

Когда в системе создается мгновенная критичность, скорость деления резко возрастает, уран нагревается и расширяется, снижая тем самым реактивность системы настолько, что начавшийся «взрыв», основанный на делении, прекращается.

Таким образом, потенциальный взрыв (неуправляемое возрастание мощности) прекращается в результате теплового расширения.

Рассматриваемый типичный случай «взрыва» в реакторе «Годива» характерен тем, что первоначальное возрастание скорости деления происходит по экспоненциальному закону с периодом около 15 *мксек* и продолжается до максимального уровня мощности, равного примерно  $10^9$  *вт*, а затем происходит падение скорости деления по тому же закону.

Необходимо отметить, что мы имеем здесь наглядный пример критического реактора, который становится докритическим в результате теплового расширения и последующего уменьшения плотности делящегося вещества.

## Приложение II

### ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ ЛЕГКИХ ЯДЕР

Помещаемая здесь таблица содержит перечень важнейших реакций синтеза. Энергия ( $Q$ ), освобождающаяся при реакциях, измеряется в миллионах электрон-вольт (*Мэв*).

Реакция	Q
$H^1 + H^1 \rightarrow H^2 + \beta^+ + \nu_0$	0,42
$H^1 + H^2 \rightarrow He^3 + \gamma$	5,5
$H^1 + n_0 \rightarrow H^2 + \gamma$	2,26
$H^2 + H^2 \rightarrow He^3 + n_0$	3,25
$H^2 + H^2 \rightarrow H^1 + H^3$	4,0
$H^3 + H^1 \rightarrow He^4 + \gamma$	19,7
$H^3 + H^1 \rightarrow He^4 + \gamma$	17,6
$H^3 + H^3 \rightarrow He^4 + n_0 + n_0$	11,3
$Li^6 + n_0 \rightarrow H^3 + He^4$	4,8
$Li^6 + H^1 \rightarrow He^3 + He^4$	4,0
$Li^6 + H^2 \rightarrow He^4 + He^4$	22,4
$Li^7 + H^1 \rightarrow He^4 + He^4$	17,3
$Li^7 + H^1 \rightarrow Be^8 + \gamma$	17,2
$Li^7 + H^2 \rightarrow He^4 + He^5$	14,2
$Li^7 + H^2 \rightarrow Be^8 + n_0$	15,0

$\nu_0$ —нейтрино;  $\beta^+$ —позитрон;  $\beta^-$ —электрон;  $n_0$ —нейтрон;  $H^1$ —водород;  $H^2$ —дейтерий;  $H^3$ —тритий;  $He^3$ —ядро гелия с массовым числом 3;  $He^4$ —ядро гелия с массовым числом 4;  $Li^6$ —ядро лития с массовым числом 6;  $Li^7$ —ядро лития с массовым числом 7;  $Be^8$ —ядро бериллия с массовым числом 8;  $\gamma$  означает, что при реакции испускания гамма-квантов тритий является радиоактивным; в результате распада образуется  $He^3$  с периодом полураспада 12,4 года.

### Приложение III

#### ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ В ЗВЕЗДАХ

Уже в течение многих лет существует предположение о том, что источником энергии звезд являются ядерные процессы, происходящие в них. В 1938 году Бете и Гамов предложили теорию определения количественных характеристик процессов, происходящих внутри звезд. Согласно их теории, свет звезд является следствием термоядерных реакций, происходящих внутри звезд, где температура достигает нескольких десятков миллионов градусов<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Основной причиной наличия внутри звезд высоких температур, благодаря чему создаются условия для протекания термоядер-

Наиболее важными реакциями в астрофизике являются следующие две реакции<sup>1</sup>: 1) реакция протон—протон, в результате которой водород превращается в дейтерий, и 2) так называемый «углеродно-азотный цикл», в котором ядра углерода служат катализатором для превращения обычного водорода в гелий.

Точные вычисления показывают, что источником солнечной энергии является в основном реакция протон—протон. Для ряда звезд с более высокой температурой самой вероятной реакцией является цикл C—N (углерод—азот).

Реакция протон—протон	Цикл углерод—азот
$\text{H}^1 + \text{H}^1 \rightarrow \text{H}^2 + \beta^+ + \nu_0$ $\text{H}^1 + \text{H}^2 \rightarrow \text{He}^3 + \gamma$ $\text{He}^3 + \text{He}^3 \rightarrow \text{He}^4 + 2\text{H}^1$	$\text{C}^{12} + \text{H}^1 \rightarrow \text{N}^{13} + \gamma$ $\downarrow$ $\text{C}^{13} + \beta^+ + \nu_0$ $\text{C}^{13} + \text{H}^1 \rightarrow \text{N}^{14} + \gamma$ $\text{N}^{14} + \text{H}^1 \rightarrow \text{O}^{15} + \gamma$ $\downarrow$ $\text{N}^{15} + \beta^+ + \nu_0$ $\text{N}^{15} + \text{H}^1 \rightarrow \text{C}^{12} + \text{He}^4$

Вполне возможно, что ядерные реакции происходят также и во внешней атмосфере отдельных звезд, однако механизм этих реакций пока еще не ясен<sup>2</sup>. Эти реакции, безусловно, не могут быть термоядерными в связи со сравнительно низкими температурами, существующими на поверхности звезд.

ных реакций, являются огромные размеры звезд. (Солнце, например, в миллион раз больше Земли.) Вследствие таких огромных размеров звезд, тепло, постоянно выделяемое при термоядерных процессах, не успевает уходить из внутренней части звезды к ее поверхности, поэтому температура на поверхности звезды равна нескольким тысячам градусов, в то время как внутри она доходит до нескольких десятков миллионов градусов. Исходя из этого, можно показать, что нет никакой даже малейшей возможности «поджечь термоядерным огнем океаны Земли». (Pryce M. H. L., *Discovery*, 16, 495, 1955).

<sup>1</sup> Chandrasekhar S., *Astrophysics*, edited by J. A. Hynek, p. 598 (McGraw-Hill, 1951).

<sup>2</sup> Fowler W. A. et al., *Astrophysical Journal Supplement Series*, № 17, 1955.



Количество энергии, выделяемой в результате реакции протон—протон в массе водорода, плотность которого равна  $100 \text{ г/см}^3$ , составляет  $0,2 \text{ эрг/сек}$  на грамм водорода при температуре 5 млн. градусов и  $50 \text{ эрг/сек}$  на грамм при температуре 15 млн. градусов. Водород и его изотопы являются обязательными составными частями любой термоядерной реакции независимо от того, происходит ли она внутри звезд или на Земле во время термоядерного взрыва. Теория термоядерных реакций, имеющая важнейшее значение в астрофизике, была уже детально изучена астрофизиками за несколько лет до того, как она нашла применение в ядерном оружии<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Так как в основе термоядерных реакций, происходящих внутри звезд и производимых на Земле, лежит один и тот же физический процесс, то не удивительно, что очень часто для работы в учреждениях, занимающихся вопросами создания ядерного оружия, привлекают специалистов по астрофизике.

### Глава III

## ЭНЕРГИЯ, ОСВОБОЖДАЮЩАЯСЯ ПРИ ДЕЛЕНИИ, И РАДИОАКТИВНОСТЬ ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ

В предыдущих главах мы уже говорили о том, что при ядерных взрывах освобождается огромное количество энергии. Ядерная реакция (деление или синтез) происходит в сравнительно небольшом количестве соответствующего материала. Так, например, энергия, освободившаяся при взрыве бомбы мощностью 20 тыс. т, сброшенной на Хиросиму, была получена в результате деления 900 г урана  $^{235}\text{U}$ . В действительности количество урана  $^{235}\text{U}$ , содержащегося в бомбе, было гораздо большим, но делению подверглись только 900 г урана  $^{235}\text{U}$ . Остальное же количество было рассеяно в атмосфере. В данной главе мы сначала затронем вопрос об энергии, освобождающейся при делении, а затем перейдем к рассмотрению радиоактивности продуктов деления. Таким образом мы получим необходимые сведения, которые позволят нам лучше разобраться в последующих главах.

### РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ, ОСВОБОЖДАЮЩЕЙСЯ ПРИ ДЕЛЕНИИ

Общее количество энергии, выделяющейся в результате деления одного ядра, например урана  $^{235}\text{U}$ , составляет примерно 200 Мэв. Кинетическая энергия нейтронов, испускаемых во время акта деления, составляет почти 2,5% от общего количества энергии. Эти нейтроны получили название *мгновенных нейтронов* в отличие от запаздывающих нейтронов, испускаемых продуктами деления спустя промежуток времени от одной доли секунды до нескольких секунд после деления. *Запаздывающие нейтроны* составляют не более 1% от общего количества мгновенных нейтронов. Энергия мгновенного гамма-излучения

почти равна энергии мгновенных нейтронов. Энергия гамма-излучения, испускаемого продуктами деления, составляет 3%. Почти столько же составляет энергия бета-излучения, испускаемого продуктами деления. В табл. 5 показано распределение энергии, освобождающейся при делении урана 235, вызванном захватом медленных нейтронов<sup>1</sup>:

Таблица 5

Распределение энергии деления урана 235 на медленных нейтронах (энергия измеряется в *Мэв*)

Мгновенная		Запаздывающая	Общая
Сосредоточенная в пространстве	Кинетическая энергия продуктов деления = $168 \pm 5$	Бета-излучение продуктов деления = 7	175
Рассеянная в пространстве	Кинетическая энергия нейтронов = $5 \pm 0,5$ Энергия гамма-излучения при делении = $4,6 \pm 1$	Гамма-излучение продуктов деления = 6	16
Итого	178	13	191

Энергия нейтрино 11 *Мэв* (не выделяемая в виде тепловой)—11

Всего . . . . . 202 *Мэв*

Энергия, выделяющаяся в момент взрыва, составляет только 90% от общего количества энергии, освобождающейся в результате деления. Остальные 10% приходятся на энергию бета- и гамма-излучения, испускаемого продуктами деления, и неуловимую энергию нейтрино. При этом энергия гамма-излучения составляет 3% от общей энергии деления.

<sup>1</sup> «Reactor Handbook: Physics», USAEC, 1955, p. 110.

Таким образом, мы можем легко подсчитать количество энергии, освобождающееся при полном делении 1000 кг (одной метрической тонны или 2200 фунтов) делящегося материала:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Деление 1000 кг ве-} \\ \text{щества } (=2,6 \cdot 10^{27}) \\ \text{делений ядер) } \end{array} \right\} \text{ даст энергию } \left\{ \begin{array}{l} 8,4 \cdot 10^{23} \text{ эрг} \\ 2,0 \cdot 10^{16} \text{ кал} \\ 2,3 \cdot 10^{10} \text{ квт-ч} \\ 20 \text{ млн. т тротила} \end{array} \right.$$

(Это количество энергии примерно равно среднему количеству солнечной энергии, падающей на территорию Индии в течение 2 мин.)

Теперь перейдем к рассмотрению радиоактивности продуктов деления.

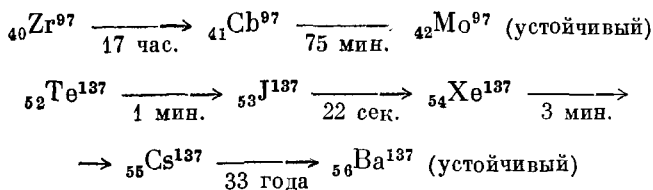
## ПРОДУКТЫ ДЕЛЕНИЯ

При делении ядер урана 235 образуются осколки различной величины. Наблюдается более 40 различных форм деления, в результате которых образуется до 80 различных видов осколков (или так называемых нуклидов). Наиболее часто образуются осколки с массовыми числами от 95 до 139. Они составляют около 6% общего количества осколков, образующихся при делении. Так как каждое ядро делится на два дочерних ядра, то общее количество осколков на каждые 100 актов деления доходит до 200. Вероятность симметричного деления (т. е. деления на две равные части) очень мала и равна всего  $10^{-4}$ . Вероятность деления на три равные части еще меньше, она равна примерно  $10^{-6}$ . Для плутония 239 относительное количество осколков с различными массовыми числами является почти постоянным, независимо от того, вызвано деление тепловыми или быстрыми нейтронами; кривая зависимости выхода продуктов деления от их массового числа показывает, что часть осколков имеет устойчивое строение ядерных оболочек, состоящих из строго определенного количества протонов и нейтронов (так называемые магические числа). Эта кривая для урана 238, который делится только при захвате быстрых нейтронов, по сравнению с кривой для деления урана 235 на тепловых нейтронах сдвинута в сторону больших массовых чисел. Выход осколков с массовым числом 90 для урана 235 равен 6%, а для урана 238—4% («Fundamental Chemistry for Nuclear

Engineering», USAEC, May 1955). Первичные осколки являются неустойчивыми изотопами, содержащими в среднем около 6 избыточных нейтронов на каждую пару первичных осколков; в результате этого каждая пара осколков подвергается такому же количеству бета-распадов, часто сопровождающихся гамма-излучением, прежде чем эти осколки превратятся в стабильные изотопы<sup>1</sup>.

Продукты деления образуют сложную смесь около 100 различных видов радиоактивных изотопов, периоды полураспада которых лежат в пределах от долей секунды до нескольких лет. Практически многие из них не могут быть обнаружены вследствие слишком малого или слишком большого периодов полураспада этих изотопов<sup>2</sup>. Измеренные периоды полураспада лежат в пределах от 1 секунды (ксенон 144) до  $1,7 \cdot 10^7$  лет (иод 129). Некоторые изотопы, распадаясь, испускают «запаздывающие» нейтроны, о которых говорилось выше.

<sup>1</sup> Среднее количество бета-распадов на пару первичных нуклидов равно примерно 5,4. Рассмотрим типичный случай деления урана 235 на  ${}_{40}\text{Zr}^{97}$  и  ${}_{52}\text{Te}^{137}$ , которые затем претерпевают бета-распад по следующей схеме:



В некоторых случаях происходит шесть последовательных бета-распадов, например  $\text{Kr}^{97}$  после шести бета-распадов превращается в устойчивый  ${}_{42}\text{Mo}^{97}$ .

Во многих случаях трудно определить, является ли данный продукт деления первичным или вторичным. В этой связи интересно отметить наличие среди продуктов деления *экранированных ядер*. Такие ядра (например, ядра  $\text{Br}^{82}$ ) не могут возникать в результате бета-распада, поскольку смежные с ними изотопы являются стабильными (например,  ${}_{34}\text{Se}^{82}$  и  ${}_{36}\text{Kr}^{82}$  для  ${}_{35}\text{Br}^{82}$ ). Эти ядра образуются как первичные продукты деления или же, возможно, в результате испускания запаздывающих нейтронов.

<sup>2</sup> Периодом полураспада ( $T$ ) радиоактивного вещества называется время, в течение которого распадается половина вещества. Другими словами, если  $N_0$ —число нуклидов в любой момент времени, то по истечении периода  $T$  число оставшихся нуклидов будет равно  $\frac{N_0}{2}$ ; оставшая часть  $\left(\frac{N_0}{2}\right)$  за этот период распадется.

Скорость распада смеси продуктов деления является суммой скоростей распада по экспоненциальному закону каждого вида ядра в отдельности, причем постоянные распада изменяются в весьма широких пределах. Очевидно, что суммарная скорость распада не может изменяться по экспоненциальному закону. Она изменяется по очень простому закону, а именно *обратно пропорционально времени  $t$ , отсчитываемому с момента взрыва*. Более точным будет, если мы вместо 1 возьмем  $t=1,2$ . Скорость испускания гамма-квантов и бета-частиц определяется следующими выражениями (ошибка при этом может превышать истинное значение не более чем в 2 раза):

Скорость испускания гамма-квантов  $= 1,6/t^{1,2}$  гамма-квантов в секунду на одно деление.

Скорость испускания бета-частиц  $= 3,2/t^{1,2}$  бета-частиц в секунду на одно деление, где  $t$  — время в секундах с момента взрыва. Этими формулами можно пользоваться для значений  $t \geq 10$  сек., и, хотя показатель степени у  $t$  сам в какой-то степени зависит от  $t$ , мы можем, не допуская при этом большой ошибки, считать его постоянным и равным 1,2 для всех значений  $t$  свыше 10 сек.<sup>1</sup>

Средняя энергия бета-частиц равна примерно 0,4 Мэв, а гамма-квантов — 0,7 Мэв. Скорость излучения энергии для гамма-квантов определяется по формуле  $1,1/t^{1,2}$  Мэв в секунду за одно деление. По этой же формуле с достаточ-

<sup>1</sup> Hunter H. F., Ballou N. E., *Nucleonics*, 9, C-2, 1951. В указанной статье приводится методика определения скорости распада продуктов деления урана 235, заключающаяся вкратце в следующем:

Если  $A(t)$ , где  $t$  — в минутах, означает количество распадов в минуту для продуктов деления, образовавшихся в результате  $10^4$  делений в данный момент времени ( $t=0$ ), то

$$A(t) = 2800 t^{-0,89} \quad 1 \text{ мин.} \leq t < 30 \text{ мин.}$$

$$A(t) = 5700 t^{-1,11} \quad 30 \text{ мин.} \leq t < 1 \text{ день}$$

$$A(t) = 15\,600 t^{-1,25} \quad 1 \text{ день} \leq t < 4 \text{ дня}$$

$$A(t) = 2400 t^{-1,03} \quad 4 \text{ дня} \leq t < 100 \text{ дней}$$

$$A(t) = 2,16 \cdot 10^6 t^{-1,60} \quad 100 \text{ дней} \leq t < 3 \text{ года}$$

Расчетное значение  $A(t=0)$ , определяющее суммарную активность продуктов деления при  $t=0$ , равно 44 000 распадов в минуту.

ной степенью точности можно определить также скорость излучения энергии для бета-частиц.

Приведенные выше формулы могут быть написаны несколько иначе. Рассмотрим взрыв, основанный на полном делении 1000 кг (1 т, или 2200 фунтов) делящегося вещества, например урана 235, плутония 239, урана 233 или урана 238. Общая масса продуктов деления по сравнению с первоначальной массой делящегося вещества будет примерно на 0,1% меньше. Разница в массах соответствует количеству энергии, выделившейся при взрыве. Теория Эйнштейна дает следующую зависимость между массой и энергией:

$$\text{энергия} = \text{масса} \times (\text{скорость света})^2$$

Активность в кюри<sup>1</sup> для 1000 кг продуктов деления определяется по следующим формулам:

$$\text{гамма-активность} = \frac{1,1 \cdot 10^{17}}{t^{1,2}} \text{ кюри (t, секунды)}$$

$$\text{или} = \frac{6,0 \cdot 10^{12}}{t^{1,2}} \text{ кюри (t, часы);}$$

$$\text{бета-активность} = \frac{2,2 \cdot 10^{17}}{t^{1,2}} \text{ кюри (t, секунды)}$$

$$\text{или} = \frac{12,0 \cdot 10^{12}}{t^{1,2}} \text{ кюри (t, часы)}$$

$$(1 \text{ кюри} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ распадов в секунду}).$$

За интервал времени удобно взять число 7, так как  $7^{1,2} \approx 10$ . Поэтому если активность через определенный промежуток времени после взрыва (этим промежуток мы можем считать минуту, час, день и т. д.) взять за 1, то через 7 таких промежутков времени активность по сравнению с той, которая принята нами за 1, уменьшится в 10 раз, через  $7 \times 7$  промежутков времени активность уменьшится в 100 раз и т. д. Таким образом, если активность через час после взрыва мы примем за 1, то дальней-

---

<sup>1</sup> Кюри—единица измерения радиоактивности, получившая свое название по имени супругов Кюри, открывших радий. 1 кюри соответствует  $3,7 \cdot 10^{10}$  распадов в секунду. Количество радиоактивного вещества, активность которого соответствует 1 кюри, прямо пропорционально периоду полураспада данного вещества. Так, например, для радия это количество равно 1 г, для урана 238 соответствующее количество равно 3 т, а для углерода 14 оно равно 0,2 г.

ший спад активности будет происходить следующим образом:

Время	Активность
1 час	1
7 час.	1/10
7·7 час. $\approx$ 2 суток	1/100
2 недели	1/1000
3 месяца	1/10 000

Продукты деления содержат некоторые изотопы, которые вследствие относительно большого периода полураспада или вследствие своего биологического действия представляют особую опасность (гл. V). Характеристика этих изотопов дается в табл. 6. Отметим еще раз, что изменение активности смеси изотопов происходит по закону  $1/t^n$ , а для каждого изотопа в отдельности изменение активности происходит по экспоненциальному закону  $e^{-\lambda t}$ , где  $\frac{1}{\lambda}$  (среднее время жизни) =  $\frac{\text{период полураспада}}{0,693}$ .

### ЭФФЕКТИВНЫЙ ПЕРИОД ПОЛУВЫВЕДЕНИЯ РАДИОАКТИВНОГО ВЕЩЕСТВА ИЗ ОРГАНИЗМА

Излучения, испускаемые радиоактивными веществами, оказывают вредное воздействие на живые организмы. Если радиоактивное вещество находится вне организма, то для определения степени его вредного воздействия на организм необходимо знать период его полураспада ( $T_r$ ). Если же это вещество попало внутрь организма (в результате его вдыхания или заглатывания вместе с пищей), то для определения степени его вредного воздействия в этом случае важно знать не только период его полураспада, но и период полувыведения радиоактивного изотопа из организма ( $T_b$ ), характеризующий скорость удаления из него радиоактивного вещества.

Процесс удаления из организма радиоактивных веществ является довольно сложным, и к нему нельзя применить простой экспоненциальный закон, как это имеет место



**Период полураспада и эффективный период полувыведения  
важнейших продуктов деления\***

Изотоп	Энергия (Мэв) излу- чения		Период полураспада	Эффективный период полувыведения	Количество получающих- ся ядер изотопа на 100 делющихся ядер (общее количество ядер после деления 200) или выход продуктов деления	На 1000 кг делящегося вещества	
	гамма	бета				количество полу- чающегося изото- па, кг	начальная актив- ность, mCi
Стронций 89	Нет	1,463	53 дня	52 дня	4,6	18	500
Стронций 90	Нет	0,61	28 лет	7,4 года	5,0	19	2,8
Йод 131	0,364	0,608	8 дней	7,5 дня	3,1	18	2200
	0,284	0,335					
	0,637						
Цезий 137	0,6616	0,523	33 года	17 дней	6,2	37	2,9
Церий 144	0,134	0,300	275 дней	180 дней	5,3	33	110
	0,100 и др.	0,170					

\* Выходы продуктов деления, приведенные в таблице, относятся к случаю деления урана 235 на медленных нейтронах. Примерно те же выходы будут иметь место и в других случаях (возможная ошибка при этом будет превосходить действительное значение не более чем в 2—3 раза).

Величина выхода для стронция 90 не приведена в «Reactor Handbook: Physics», USAEC, 1955. Но из имеющейся кривой распределения выходов по массам в случае деления урана 235 на медленных нейтронах мы определяем, что выход для  $Sr^{90} + Y^{90} = 5,4\%$ . Предполагая, что первичный выход  $Y^{90}$  является ничтожно малым, мы принимаем выход  $Sr^{90} = 5\%$ . В случае деления U-238 кривая зависимости выходов от массы дает значение выхода для  $Sr^{90} + Y^{90} = 3,8\%$ . Величина выхода для церия 137 в «Reactor Handbook: Physics» также не приводится, а рассчитывается из кривой распределения выходов по массам.

в случае радиоактивного распада. «Однако в большинстве случаев после первоначального распределения радиоактивного вещества в организме и последующего перехода

Энергия, освобождающаяся при делении, и радиоактивность продуктов деления  
(делению подвергается 1000 кг делящегося вещества)

1 кюри=3,7 · 10 <sup>10</sup> распадов в секунду			
1)	Деление 1000 кг	=2,6 · 10 <sup>27</sup> деления актам	Освобождается 6 · 10 <sup>27</sup> нейтронов (масса ≈ 10 кг)
2)	Энергия, ■ освобо- ждающаяся при делении 1000 кг	20 млн. т тротила	Эта энергия соответствует 2% всей электроэнергии, вырабатываемой за год во всем мире. Она пример- но равна среднему количеству солнечной энергии, падающей на территорию Индии в течение 2 мин.
3)	Активность (гамма-излучение) продук- тов деления 1000 кг делящегося ве- щества через время <i>t</i> после взрыва	$= \frac{6,0 \cdot 10^{12}}{t^{1,2}} \text{ кюри}$ (для <i>t</i> от 10 сек. до 1 года после взрыва)	$\left\{ \begin{array}{l} 8,2 \cdot 10^{14} \text{ кюри спустя} \\ 6,0 \cdot 10^{12} \text{ » } \text{ » } \text{ » } 1 \text{ час} \\ 1,3 \cdot 10^{11} \text{ » } \text{ » } \text{ » } 1 \text{ день} \\ 2,3 \cdot 10^9 \text{ » } \text{ » } \text{ » } 1 \text{ мес.} \\ 1,1 \cdot 10^8 \text{ » } \text{ » } \text{ » } 1 \text{ год} \\ 8 \cdot 10^6 \text{ » } \text{ » } \text{ » } 10 \text{ лет} \end{array} \right.$
4)	Активность (бета-излучение) стронция 90, содержащегося в 1000 кг продуктов деления	=2,8 · 10 <sup>6</sup> кюри	$\text{Sr}^{90} \xrightarrow{28 \text{ лет}} \text{Y}^{90} \xrightarrow{61 \text{ час}} \text{Zr}^{90}$ $\beta^- (0,6 \text{ Мэв}) \quad \beta^- (2,18 \text{ Мэв})$ (гамма-излу- чения нет) (гамма-излу- чения нет) Период полураспада Sr <sup>90</sup> =28 лет Период полураспада=0,693 · средняя продолжительность жизни

Активность продуктов деления в зависимости от времени, прошедшего после взрыва (мощность дозы  $r$ )

1*	Мощность дозы 1 p в день (=0,04 p/час)  Доза излучения, получаемая на расстоянии от точечного источника радия (1 e), находящегося в равновесном состоянии с продуктами распада, при наличии защиты из платины толщиной 0,5 мм, определяется по формуле: Доза = $\frac{8,4 \cdot 10^3}{d^2}$ p/час	Соответствует 4000 кюри на 1 км <sup>2</sup> =	$\left\{ \begin{array}{l} 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ кюри на } 1 \text{ м}^2 \\ 3,9 \cdot 10^{-7} \text{ кюри на } 1 \text{ см}^2 \\ 2 \cdot 10^{12} \text{ кюри, равномерно распределенных на площади } 5000 \text{ млн. км}^2 \\ \text{(площадь всей поверхности Земли)} \end{array} \right.$																																																						
2*	Мощность дозы p(t) спустя время t после взрыва (для t от 10 сек. до 1 года) определяется по формуле $\frac{C}{t^{1,2}}$ , где C=const  Суммарная доза, получаемая за время от t до T, равна $5t^{1,2} p(t) \left( \frac{1}{t^{0,2}} - \frac{1}{T^{0,2}} \right)$ или $t^{0,2} R(t) \left( \frac{1}{t^{0,2}} - \frac{1}{T^{0,2}} \right)$ , где R(t)=5tp(t) равно суммарной дозе, получаемой от t до бесконечности  =0,11 p(t)t <sup>1,2</sup> , где t в час., а p(t)—мощность дозы в p/час		<table><tr><th colspan="2">Спад активности продуктов деления в зависимости от времени</th><th>Активность</th><th>Время</th><th>Часть «бесконечной дозы» (принятая за 1), получаемая за время от 1 часа до t</th><th>Получаемая часть бесконечной дозы</th></tr><tr><th>Время</th><th>Активность</th><th>Время</th><th>Время</th><th>Время</th><th>Время</th></tr><tr><td>1 час</td><td>1</td><td>1 час</td><td>1 час</td><td>1 час</td><td>0</td></tr><tr><td>7 час.</td><td>0,1</td><td>6 час.</td><td>6 час.</td><td>6 час.</td><td>0,30</td></tr><tr><td>1 день</td><td>0,02</td><td>1 день</td><td>1 день</td><td>1 день</td><td>0,47</td></tr><tr><td>2 дня</td><td>0,01</td><td>1 неделя</td><td>1 неделя</td><td>1 неделя</td><td>0,64</td></tr><tr><td>2 недели</td><td>0,001</td><td>1 месяц</td><td>1 месяц</td><td>1 месяц</td><td>0,73</td></tr><tr><td>3 мес.</td><td>0,0001</td><td>1 год</td><td>1 год</td><td>1 год</td><td>0,84</td></tr><tr><td></td><td></td><td>∞</td><td>∞</td><td>∞</td><td>1,00</td></tr></table>	Спад активности продуктов деления в зависимости от времени		Активность	Время	Часть «бесконечной дозы» (принятая за 1), получаемая за время от 1 часа до t	Получаемая часть бесконечной дозы	Время	Активность	Время	Время	Время	Время	1 час	1	1 час	1 час	1 час	0	7 час.	0,1	6 час.	6 час.	6 час.	0,30	1 день	0,02	1 день	1 день	1 день	0,47	2 дня	0,01	1 неделя	1 неделя	1 неделя	0,64	2 недели	0,001	1 месяц	1 месяц	1 месяц	0,73	3 мес.	0,0001	1 год	1 год	1 год	0,84			∞	∞	∞	1,00
Спад активности продуктов деления в зависимости от времени		Активность	Время	Часть «бесконечной дозы» (принятая за 1), получаемая за время от 1 часа до t	Получаемая часть бесконечной дозы																																																				
Время	Активность	Время	Время	Время	Время																																																				
1 час	1	1 час	1 час	1 час	0																																																				
7 час.	0,1	6 час.	6 час.	6 час.	0,30																																																				
1 день	0,02	1 день	1 день	1 день	0,47																																																				
2 дня	0,01	1 неделя	1 неделя	1 неделя	0,64																																																				
2 недели	0,001	1 месяц	1 месяц	1 месяц	0,73																																																				
3 мес.	0,0001	1 год	1 год	1 год	0,84																																																				
		∞	∞	∞	1,00																																																				
3*	Из табл. 7 и пункта 1 определим, что содержание Sg <sup>90</sup> в кюри на 1 км <sup>2</sup> равно																																																								

\* Объяснение содержится в гл. V.

его из одного органа в другой кривая, характеризующая удаление этого вещества из организма, обычно приближается к простой экспоненте». Таким образом, понятие «период полувыведения» является не совсем четким. Тем не менее очень важно знать его величину. (Этот вопрос подробно освещен в статье «Предложения международной комиссии по радиологической защите», помещенной в журнале *«British Journal of Radiology»*, Supplement, 6, 1955.) Но для определения допустимой дозы излучения, получаемой организмом в случае попадания радиоактивного вещества внутрь его, используют так называемый эффективный период полувыведения ( $T$ ), определяемый по формуле

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_r} + \frac{1}{T_b} .$$

Значения эффективного периода полувыведения приведены в таблице 6.

Важнейшие данные, характеризующие энергию, которая освобождается при делении, и радиоактивность продуктов деления приведены в табл. 7 и 8.

## Глава IV

### ПОРАЖАЮЩЕЕ ДЕЙСТВИЕ АТОМНОГО ОРУЖИЯ

#### БОМБЫ, СБРОШЕННЫЕ НА ХИРОСИМУ И НАГАСАКИ

Первая атомная бомба (делящийся материал—уран 235) была сброшена 6 августа 1945 года на японский город Хиросиму. В результате взрыва было убито 78 тыс. и ранено 37 тыс. человек. Вторая атомная бомба (делящийся материал—плутоний 239) была сброшена на город Нагасаки 9 августа 1945 года. Количество убитых и раненых в этом случае составляло соответственно 24 тыс. и 23 тыс. человек.

Обе бомбы имели почти одинаковую мощность, тротиловый эквивалент каждой из них составлял 20 тыс. *т*. Однако в Нагасаки вследствие гористого рельефа местности действие взрыва оказалось более слабым и поэтому потери меньшими. Взрывы обеих атомных бомб производились на высоте около 600 *м*, поскольку именно такая высота обеспечивала максимальную площадь разрушений, вызываемых действием ударной волны взрыва.

Данные о результатах этих взрывов показывают, что в зоне радиусом 800 *м* от эпицентра<sup>1</sup> погибло более 90% находившихся в ней людей, в зоне радиусом от 800 до 2400 *м*—50% и в зоне радиусом более 2400 *м*—около 1%. При этом в радиусе 800 *м* от эпицентра взрыва отмечалось полное разрушение зданий (включая железобетонные здания антисейсмической конструкции), в радиусе 2400 *м*—разрушение большинства зданий, в радиусе до 3200 *м*—сильные повреждения и в радиусе до 4800 *м*—легкие повреждения зданий. Интенсивное световое излучение при атомном взрыве, воздействуя на людей, находившихся на расстоянии 1200 *м* от эпицентра взрыва, вызывало почти

---

<sup>1</sup> Эпицентром взрыва называется точка на земле, над которой произведен взрыв.

мгновенную их смерть в результате сильных ожогов. Следует отметить, что большинство пострадавших во время атомных взрывов в Японии получили комбинированные поражения (ожоги и ранения). В то же время подсчитано, что около 60% погибших (и по меньшей мере 75% всех пострадавших) получили поражения вследствие воздействия светового излучения (прямого—в момент яркой вспышки при взрыве и косвенного—в результате пожаров), около 20%—вследствие травм, полученных в результате косвенного воздействия ударной волны (от летящих обломков разрушающихся зданий и пр.), и 20%—вследствие других поражений, включая проникающую радиацию.

По окончании войны с Японией Управлением по изучению результатов стратегических бомбардировок США было проведено детальное изучение последствий двух атомных бомбардировок японских городов. Результаты этого изучения приведены в двух трудах: «The Effect of the Atomic Bomb on Hiroshima, Japan», vol. I, II, III, 1947; «The Effect of the Atomic Bomb on Nagasaki», Japan, vol. I, II, III, 1947. Оба пострадавших города посетила также английская миссия, которая опубликовала отчет: «Effects of the Atomic Bombs on Hiroshima and Nagasaki», H. M. S. O., 1946.

В 1950 году Лос-Аламосская научная лаборатория, находящаяся в ведении Калифорнийского университета и проводящая работы по заказам комиссии по атомной энергии, выпустила руководство по действию атомного оружия «The Effects of Atomic Weapons» на 450 страницах. Это руководство было составлено Лос-Аламосской лабораторией совместно с Министерством обороны и Комиссией по атомной энергии США. В основе его лежат данные, полученные в результате атомных взрывов в Хиросиме и Нагасаки и в результате испытаний атомного оружия, в частности испытаний на Бикини в 1946 году (воздушного взрыва «Эйбл», произведенного 1 июля, и неглубокого подводного взрыва «Бейкер», произведенного 25 июля). Это руководство, которое до настоящего времени является наиболее авторитетным открытым изданием по действию атомного оружия (мощность которого измеряется в тысячах тонн), дает наиболее точное, отвечающее уровню развития современной науки обобщение результатов действия атомных взрывов. Оно предназначается как для широкого

населения, так и для работников гражданской обороны, которые могут пользоваться данными, содержащимися в руководстве, в своей практической работе по созданию планов противоатомной защиты.

Материал, изложенный в настоящей главе, основан главным образом на данных, содержащихся в руководстве. Однако следует указать на то, что после испытаний в марте 1954 года более мощного ядерного оружия, тротилловый эквивалент которого измеряется миллионами тонн, это руководство несколько устарело. Объясняется это тем, что появился новый мощный поражающий фактор—действие радиоактивных веществ, образующихся в огромных количествах при взрыве большой мощности. Радиоактивные вещества образуются также и при атомных взрывах, но в этом случае их поражающее действие имеет второстепенное значение по сравнению с поражающим действием ударной волны и светового излучения, в то время как при взрывах большой мощности действие радиоактивных веществ является основным поражающим фактором. В этом состоит основное различие между обычным атомным взрывом и взрывом большой мощности. Для более ясного понимания этого различия рассмотрим сначала кратко действие атомного оружия.

## АТОМНОЕ ОРУЖИЕ

Атомным оружием называются бомбы и снаряды, действие которых основано на использовании энергии, выделяющейся при самоподдерживающейся реакции деления (см. стр. 25). Тротилловый эквивалент (калибр) современного атомного оружия лежит в пределах от 0,5 тыс. *т* до 500 тыс. *т*. По-видимому, в оружии малого калибра делящимся материалом является уран 233, который имеет значительно меньшую критическую массу, чем уран 235 или плутоний 239. Использование делящегося материала в бомбах калибра менее 5 тыс. *т* является нерациональным. Атомные заряды с тротилловым эквивалентом менее 5 тыс. *т* используются в крупнокалиберных артиллерийских снарядах. Пушки, стреляющие такими снарядами, называются атомными. Более мощные атомные заряды используются в управляемых и неуправляемых ракетах или в авиационных бомбах.

Вес артиллерийского снаряда с атомным зарядом равен

примерно 500 кг. Дальность стрельбы атомной пушки достигает 32 км. Точность стрельбы обеспечивает попадание 50% снарядов в круг радиусом около 100 м.

Управляемая ракета, полный вес которой равен 5 т (при этом ее боевая часть весит 1 т), обеспечивает дальность стрельбы до 160 км и точность попадания в круг радиусом до 200 м.

## ВОЗДУШНЫЙ ВЗРЫВ НОМИНАЛЬНОЙ АТОМНОЙ БОМБЫ

При изучении действия атомного оружия обычно рассматривают действие номинальной атомной бомбы (тротиловый эквивалент ее равен 20 тыс. т), которое подробно рассмотрено в руководстве «The Effects of Atomic Weapons», 1950.

Беря за основу номинальный атомный взрыв и пользуясь специально разработанными законами подобия (например, закон кубического корня для ударной волны), можно быстро определить вероятные результаты атомных взрывов другой мощности.

Количество энергии, выделяющееся при взрыве номинальной атомной бомбы, соответствует тому количеству энергии, которое высвобождается при полном делении 1 кг делящегося материала (урана 235, плутония 239 или урана 233). Как уже указывалось в приложении I, действительное количество делящегося материала в номинальной бомбе будет в 5—10 раз больше, так как практически при взрыве подвергается расщеплению только часть делящегося материала.

Поражающее действие ядерного оружия складывается из четырех основных поражающих факторов, которые приводятся в следующей схеме:

### Действие ядерного взрыва

	Ударная волна	Световое излучение (световая вспышка)	Проникающая радиация (нейтроны и гамма-лучи)	Радиоактивное заражение местности (гамма- и бета-лучи). Выпадение радиоактивных веществ
Длительность действия	Менее 1 мин.			Дни—месяцы—годы



Энергия, выделяющаяся при ядерном взрыве, распределяется между этими поражающими факторами следующим образом: около  $\frac{2}{3}$  общего количества энергии приходится на ударную волну, около  $\frac{1}{3}$ —на световое излучение и около 9%—на проникающую радиацию. Из этих 9% общего количества энергии, приходящихся на проникающую радиацию, около 6% уносится быстрыми нейтронами и гамма-лучами, испускаемыми в течение нескольких микросекунд в момент взрыва; остальные 3% приходятся на гамма-излучение продуктов деления в первую минуту после взрыва.

Рассмотрим воздушный взрыв, то есть взрыв, произведенный на высоте около 600 м над поверхностью земли (взрыв, произведенный на высоте менее 150 м, называется наземным).

В первый момент ядерного взрыва происходит ослепительная вспышка, яркость которой во много раз превышает яркость солнца. За счет огромной энергии, выделяющейся при взрыве, содержимое бомбы и ее оболочка мгновенно переходят в газообразное состояние. Первоначально объем газообразных продуктов взрыва почти равен объему, который занимала бомба. При этом температура их достигает значения выше миллиона градусов, а давление—более миллиона атмосфер. Продукты взрыва с огромной скоростью расширяются во все стороны и спустя 0,1 миллисекунды с момента взрыва представляют собой изотермическую сферу, диаметр которой равен примерно 30 м, а температура  $300\,000^{\circ}\text{C}$ , что в 50 раз превышает температуру на поверхности солнца. На этой стадии развития взрыва фронт ударной волны совпадает с поверхностью сферы, но вскоре он отрывается и движется впереди ее. Вследствие интенсивного излучения энергии поверхность огненного шара быстро охлаждается, и примерно через 0,01 сек. температура ее падает до минимума, равного  $2000^{\circ}\text{C}$ . Однако температура внутри огненного шара все еще остается высокой. Вследствие того что воздух, окружающий огненный шар, сильно нагревается и ионизируется проходящей ударной волной, его прозрачность падает, и он создает «экранирующий эффект», замедляющий скорость охлаждения поверхности огненного шара. Но так как приток тепла из внутренней части огненного шара к его поверхности продолжается, то температура поверхности начинает снова расти. Примерно через

0,3 сек. она достигает второго максимума, равного  $7000^{\circ}\text{C}$ , а затем постепенно падает. Через 10 сек. свечение огненного шара прекращается.

Огненный шар быстро поднимается вверх, при этом максимальная скорость подъема составляет  $100 \text{ м/сек.}$  Диаметр его постепенно продолжает увеличиваться, достигая своего максимального значения около  $300 \text{ м}$  через 1 сек.

После отрыва фронта ударной волны от поверхности огненного шара волна разрежения, следующая за зоной сжатия ударной волны, вызывает быстрое расширение воздуха и конденсацию содержащихся в нем паров. В этот момент «наблюдается образование кольца тумана, распространяющегося со скоростью звука в направлении от центра взрыва. Кольцо озарено изнутри красным светом огненного шара, в результате чего похоже на светящийся китайский фонарик. Через несколько секунд давление становится нормальным и конденсационное облако быстро исчезает. В этот момент виден огненный шар, несущийся вверх со скоростью около  $150 \text{ км/час}$ . Быстро поднимаясь, огненный шар превращается в клубящееся грибовидное облако белого пара, смешанное с пылью, поднятой с земли восходящим потоком воздуха. Образовавшееся облако, диаметр которого доходит до  $3 \text{ км}$  примерно через 4 мин., подходит к границе стратосферы и, продолжая подниматься, уже через 7 мин. достигает высоты  $10\text{--}20 \text{ км}$ , сохраняя свою форму длительное время. Например, при взрыве на Бикини грибовидное облако держалось в воздухе в течение многих часов, медленно двигаясь по ветру. В это время самолеты, оснащенные счетчиками Гейгера, производили измерения радиоактивного заражения воздуха<sup>1</sup>.

### СВЕТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Как уже было сказано выше, около  $\frac{1}{3}$  общего количества энергии, выделяющейся при взрыве, идет на световое излучение. При этом необходимо отметить, что около 99% светового излучения испускается огненным шаром во второй период его развития, начиная с момента нарастания температуры после первого минимума. Количество

---

<sup>1</sup> «Admiralty Notes on Atomic Energy for Medical Officers», H.M.S.O., 1955, p. 68.

светового излучения в первый период развития огненного шара является ничтожным по сравнению с общим количеством излучаемой при взрыве световой энергии, поскольку этот период длится только 0,01 сек.

Спустя 3 сек. после взрыва световое излучение практически прекращается.

Если укрыться в течение 1 сек. с момента взрыва, то полученное количество световой энергии составит  $\frac{1}{3}$  от общего ее количества.

Энергия светового излучения атомного взрыва, падающая на поверхность земли или объекта, измеряется световыми импульсами. Величина светового импульса на данном расстоянии в большой степени зависит от метеорологических условий. Так, например, при хорошей видимости в умеренно ясный день световой импульс, равный  $6 \text{ кал/см}^2$ , будет получен на расстоянии 2 км; в условиях плохой видимости (в густой туман) световой импульс этой же величины будет получен на расстоянии 800 м. Световой импульс такой величины вызывает мгновенную гибель 50% людей, подвергшихся прямому воздействию светового излучения. Для воспламенения белой бумаги требуется световой импульс величиной  $10 \text{ кал/см}^2$ , черной бумаги— $3 \text{ кал/см}^2$ . Дерево воспламеняется при световом импульсе  $10 \text{ кал/см}^2$  (требуемая величина импульса в этом случае зависит от породы дерева, состояния его поверхности и др.). Поверхность земли в эпицентре взрыва нагревается до  $3000^\circ\text{C}$ .

Если общую энергию светового излучения при атомном взрыве обозначить  $E$ , то количество тепла ( $Q$ ), полученное на расстоянии  $D$ , можно определить по формуле

$$Q = \frac{E}{4\pi D^2} e^{-kD},$$

где  $k$ —средний коэффициент ослабления, взятый для спектра световых волн с длиной волны ( $\lambda$ ) от  $2000 \text{ \AA}$  до бесконечности. Строго говоря,  $k$  не является константой, так как он зависит от  $D$ . Однако в рассматриваемом нами случае можно считать его постоянным и равным  $2 \text{ км}^{-1}$  в условиях плохой видимости при густом тумане и  $0,1 \text{ км}^{-1}$  в условиях хорошей видимости в ясный солнечный день. Среднее же значение  $k$ , определяемое видимостью в умеренный ясный день, равно  $0,4 \text{ км}^{-1}$ . (Видимость  $L \approx \frac{4}{k} \text{ км.}$ )

Общее количество энергии, выделяющееся при взрыве номинальной атомной бомбы, равно  $2 \cdot 10^{13}$  кал. Считая, что  $1/3$  этого количества энергии приходится на световое излучение, мы можем определить  $Q$  для номинальной атомной бомбы:

$$Q = \frac{670}{4\pi D^2} e^{-kD} \text{ кал/см}^2,$$

где  $D$ —в километрах.

### УДАРНАЯ ВОЛНА

Начальное воздействие ударной волны на наземный объект (например, здание) можно сравнить с мощным ударом гигантского молота. Когда фронт ударной волны полностью охватывает здание, оно оказывается в зоне сжатия, и в этот момент действие на него волны выражается в сильном сжатии или даже раздавливании. Степень разрушения здания зависит от его прочности, частично от формы, количества проемов в стенах и т. д. Время воздействия зоны сжатия ударной волны при взрыве атомной бомбы составляет более 1 сек., то есть в 100 раз больше, чем при взрыве обычной фугасной бомбы (например, авиационной бомбы крупного калибра). Длина зоны сжатия ударной волны составляет около 300 м; длина зоны разрежения в несколько раз больше.

Однако в отличие от взрыва обычной фугасной бомбы разрушения, происходящие в зоне разрежения, являются ничтожными по сравнению с разрушениями, вызываемыми фазой сжатия. При взрыве обычной фугасной бомбы разрушения, вызываемые ударной волной, определяются величиной импульса ударной волны, то есть средним давлением в зоне сжатия, умноженным на время воздействия ударной волны. При взрыве же атомной бомбы длительность воздействия ударной волны во много раз больше, поэтому разрушения, вызываемые ею, в основном определяются максимальным избыточным давлением, а не импульсом.

Начальная скорость распространения ударной волны достигает значения более 1600 м/сек, но быстро падает до скорости звука (320 м/сек). Максимальное избыточное давление (выше атмосферного) ударной волны на расстоянии 800 м от эпицентра взрыва составляет 1,4 кг/см<sup>2</sup>.

Такое давление производит полное разрушение всех сооружений, за исключением, может быть, только самых прочных. По мере дальнейшего распространения ударной волны давление в ее фронте продолжает падать и на расстоянии около 3 км оно становится равным  $0,14 \text{ кг/см}^2$ . Такое давление может производить только небольшие повреждения.

Интересно отметить то обстоятельство, что непосредственное воздействие ударной волны на человека едва ли может вызвать серьезные поражения его. Поражения, вызываемые ударной волной, происходят в основном вследствие косвенного, а не прямого действия ударной волны (обломками разрушающихся зданий, осколками стекла и т. д.).

«Организм человека чрезвычайно устойчив к воздействию воздушной ударной волны. Барабанные перепонки, являющиеся наиболее уязвимым местом в этом случае, лопаются при избыточном давлении от  $0,35$  до  $1,05 \text{ кг/см}^2$  в зависимости от положения головы по отношению к фронту ударной волны. Максимальное избыточное давление порядка  $14\text{—}17 \text{ кг/см}^2$  вызывает серьезное поражение всего организма<sup>1</sup>. В легких и других внутренних органах, соприкасающихся с воздухом, происходит кровоизлияние. Такие же поражения наблюдаются у различных животных, плавающих на поверхности воды и под водой при подводном взрыве, когда максимальное избыточное давление достигает  $150 \text{ кг/см}^2$ . Мелкие животные более уязвимы к воздействию ударной волны, чем крупные. Мыши, например, погибают от кровоизлияния в легкие при максимальном избыточном давлении  $1,7 \text{ кг/см}^2$ . Время воздействия ударной волны не имеет большого значения в том случае, когда оно мало. Важной проблемой гидродинамики в настоящее время является изучение вопроса о прохождении коротких импульсов через такие материалы, как легочная ткань, пробка, губчатая резина<sup>2</sup>.

При воздушном атомном взрыве основным поражающим фактором, вызывающим разрушения, является ударная волна. Распространение ударной волны в этом случае

---

<sup>1</sup> Максимальное избыточное давление на расстоянии 150 м от эпицентра атомного взрыва, произведенного на высоте 600 м, равно  $3,5 \text{ кг/см}^2$ .

<sup>2</sup> Реннеу W. G., Пикс Н. Н. М., Report on Progress in Physics, XIII, 81, 1950.

является исключительно сложным процессом, поскольку здесь происходит взаимодействие между прямой и отраженной ударными волнами, ведущее к образованию головной ударной волны (или так называемой волны Маха)<sup>1</sup>. Когда происходит прямое отражение ударной волны, избыточное давление в результате отражения увеличивается немногим более чем в 2 раза для слабой ударной волны (избыточное давление меньше  $0,7 \text{ кг/см}^2$ ) и примерно в 8 раз для мощной ударной волны.

Для *приближенного определения* дальности разрушительного действия ударной волны при взрыве бомбы данного калибра можно пользоваться так называемым законом подобия, с помощью которого можно определить эту дальность в уже известных единицах—радиусах поражающего действия номинальной атомной бомбы (измеренных практически при взрывах в Хиросиме и Нагасаки, а также во время проводившихся испытаний ядерного оружия).

Закон подобия состоит в следующем. Давление, плотность и температура на расстоянии  $r$  от центра взрыва спустя время  $t$  с момента взрыва зависит от  $r$  и  $t$ , а также от энергии  $\omega$ , идущей на образование ударной волны взрыва. Зависимость эта имеет вид:  $r/\omega^{1/3}$  и  $t/\omega^{1/3}$ . Можно считать, что энергия  $\omega$ , идущая на образование ударной волны, составляет  $2/3$  общей энергии  $W$ , освобождающейся при взрыве. Количество энергии, идущей на образование ударной волны, несколько возрастает для меньших значений  $W$ .

Мы уже отмечали, что при ядерном взрыве критерием поражающего действия ударной волны является максимальное избыточное давление. Из закона подобия следует, что радиус поражающего действия ударной волны прямо пропорционален корню кубическому из энергии, освобождающейся при взрыве, или, иначе говоря, площадь района разрушения, вызванного действием ударной волны, прямо пропорциональна  $W^{2/3}$ . (В случае обычных бомб поражающее действие ударной волны определяется импульсом ударной волны; отсюда радиус разрушения на основа-

---

<sup>1</sup> «Выбор высоты взрыва атомной бомбы производится, исходя из требования получения максимальной высоты головной волны при нужном избыточном давлении на поверхности земли» (AW, 1950, р. 80).

нии закона подобия прямо пропорционален  $W^{2/3}$ , а площадь района разрушения прямо пропорциональна  $W^{1/3}$ .)<sup>1</sup>

В таблице, помещаемой ниже, приводятся радиусы тяжелых поражений людей и сильных повреждений техники при атомных взрывах с тротильным эквивалентом 5, 10 и 20 тыс. т. При этом сильными повреждениями считаются такие, при получении которых техника оказывается выведенной из строя и не может быть восстановлена без крупного ремонта в стационарных мастерских.

#### Радиусы поражения людей и техники при атомных взрывах

Объект поражения	Радиус тяжелого поражения, м		
	5 тыс. т	10 тыс. т	20 тыс. т
Люди на открытой местности . . . . .	750	1000	1300
Люди в застроенных районах . . . . .	550	750	900
Танки . . . . .	100	150	200
Автомашины . . . . .	550	750	900

Для сравнения укажем, что в случае применения обычной фугасной бомбы среднего калибра (500 кг) по танкам площадь поражения составляет всего 250 м<sup>2</sup>, то есть для надежного поражения танка необходимо, чтобы такая бомба взорвалась на расстоянии не более 10 м от него. В случае же применения ее по самолетам площадь поражения примерно равна 10 000 м<sup>2</sup>.

Можно считать, что непосредственное действие взрыва атомной бомбы длится в течение первых 10 сек. К этому времени свечение огненного шара почти прекращается. Ударная волна проходит за это время расстояние более 3 км, и давление в ней падает почти до нормального.

<sup>1</sup> Гидродинамика взрыва и ударных волн является одним из наиболее важных и трудных разделов математической физики. Изучение этого вопроса началось с больших работ, проведенных Рейманом в прошлом столетии. Среди наиболее выдающихся работ в этой области необходимо отметить труд Тэйлора, Неймана и Пенни (обзор некоторых работ, сделанный Пенни и Пайком, помещен в «Report on Progress in Physics», XIII, 81, 1950).

Действие светового излучения длится около 3 сек., а действие проникающей радиации атомного взрыва почти прекращается через 10 сек. (При взрывах бомб с тротильным эквивалентом в миллионы тонн продолжительность действия поражающих факторов увеличивается в 10 раз.)

## РАДИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ

Рассмотрим теперь радиологическое действие взрыва атомной бомбы. Принято обычно рассматривать две стороны радиологического действия:

1) начальную проникающую радиацию, то есть радиацию в первую минуту после взрыва, и

2) остаточную радиацию, то есть радиацию спустя 1 мин. с момента взрыва, или иначе радиоактивное загрязнение местности.

Время 1 мин. взято произвольно, однако оно является удобным для практических расчетов, поскольку действие ударной волны и светового излучения при взрыве номинальной атомной бомбы длится всего 10 сек., а 1 мин. является временем, в течение которого можно найти укрытие с целью уменьшить поражающее действие ядерной радиации.

Сначала рассмотрим действие *начальной* проникающей радиации, которая складывается из:

1. *Мгновенной* радиации—гамма-излучения и нейтронов, испускаемых при делении ядер в момент взрыва, а также относительно небольшого количества гамма-излучения, испускаемого при радиационных захватах нейтронов и при упругих столкновениях нейтронов с ядрами,—которая происходит в течение нескольких микросекунд в момент взрыва.

2. *Запаздывающей* радиации—гамма-излучения и нейтронов, испускаемых продуктами деления в первую минуту взрыва, так называемых запаздывающих гамма-излучения и нейтронов (табл. 5). Запаздывающие нейтроны составляют менее 1% от общего количества мгновенных нейтронов, поэтому их можно не учитывать.

Начальная проникающая радиация включает также бета-излучение, общая энергия которого почти равна общей энергии гамма-излучения, и альфа-излучение, общая энергия которого очень мала. Поскольку длина пробега альфа- и бета-частиц в воздухе сравнительно



невелика, они практически не представляют никакой опасности. Поэтому мы будем рассматривать только нейтроны и гамма-лучи<sup>1</sup>.

Общая энергия мгновенного гамма-излучения составляет около 3% всей энергии, освобождающейся при взрыве. На долю кинетической энергии нейтронов приходится почти такое же количество общей энергии (см. табл. V). Испускание мгновенных гамма-лучей происходит во время процесса деления ядер, который длится всего несколько *мксек*, то есть в то время, когда бомба еще является единым целым. Поэтому они почти полностью поглощаются материалом бомбы. Таким образом, мгновенное гамма-излучение играет ничтожную роль в эффективном поражающем действии начальной проникающей радиации. Этого, однако, нельзя сказать о запаздывающем гамма-излучении, исходящем от продуктов деления на сравнительно более поздней стадии взрыва, когда все материалы, включая продукты деления, находятся в газообразном состоянии в расширяющемся огненном шаре. В это время значительная часть гамма-излучения (практически все) уходит в окружающий воздух.

Средняя энергия запаздывающих гамма-лучей равна примерно 0,7 *Мэв*. Величина энергии гамма-излучения, приходящегося на единицу площади на расстоянии *D* от точки взрыва, определяется по следующей формуле:

$$\frac{qW}{4\pi D^2} e^{-kD},$$

где *W*—общая энергия, выделяющаяся при взрыве; *q*—часть общей энергии, приходящаяся на гамма-излучение начальной проникающей радиации, испускаемой сначала огненным шаром, а затем радиоактивным облаком взрыва ( $q < \frac{3}{100}$ ); *k*—средний коэффициент ослабления.

---

<sup>1</sup> Проникающая способность альфа-частиц очень мала. Они задерживаются даже тонким листом бумаги. Пробег бета-частиц в воздухе составляет всего несколько метров. Они почти полностью поглощаются при прохождении слоя дерева, воды или ткани толщиной в 1 *мм*. Поэтому альфа- и бета-частицы представляют для человека опасность только в тех случаях, когда радиоактивные вещества попадают непосредственно на кожу или внутрь организма.

В отличие от альфа- и бета-частиц гамма-лучи обладают большой проникающей способностью.

Если среднюю энергию гамма-квантов мы обозначим  $E(\text{Мэв})$ , то плотность потока гамма-квантов на  $\text{см}^2$ , соответствующая доза излучения в 1 р, будет равна  $\frac{2 \cdot 10^9}{E}$  (для  $E$  в пределах от 0,08 до 2,5 Мэв), а доза излучения в рентгенах<sup>1</sup>, полученная незащищенным человеком на расстоянии  $D$  километров, может быть определена по формуле

$$\frac{qWe^{-kD}}{4\pi D^2 \cdot 10^{10} \cdot 2 \cdot 10^9 \cdot 1,6 \cdot 10^{-6}} \approx 3,1 \cdot 10^{-14} \frac{qWe^{-kD}}{4\pi D^2} \text{ (рентгенов).}$$

Определим теперь, чему равно  $q$ . Общая энергия западывающего гамма-излучения, приходящаяся на одно деление, составляет 6 Мэв (см. табл. V). По формуле для определения скорости распада радиоактивных продуктов деления, начиная с десятой секунды после взрыва, приведенной на стр. 54, мы находим, что энергия, приходящаяся на гамма-излучение без учета энергии гамма-излучения в первую минуту после начала взрыва, равна 2,4 Мэв. Энергия же гамма-излучения, испускаемого за промежуток времени от 10 сек. до 1 мин. после взрыва, равна 1,1 Мэв. Таким образом, общая энергия начального гамма-излучения, испускаемого за первую минуту с момента начала взрыва, равна 3,6 Мэв, что составляет 1,9% общей энергии, выделяющейся при одном делении. Из этого видно, что  $\frac{2}{3}$  общего количества энергии начального гамма-излучения выделяется в первые 10 сек., а  $\frac{1}{2}$  — в период от 10 сек. до 1 мин. после начала взрыва.

Сравним эти расчетные данные с данными, полученными во время испытаний. На основе наблюдений, сделанных во время испытаний атомного оружия, найдено, что при воздушном взрыве номинальной атомной бомбы доза излучения, получаемая на расстояниях от 600 до 3000 м от эпицентра взрыва, может быть определена по следующей формуле<sup>2</sup>:

$$3,5 \cdot 10^4 \frac{e^{-3D}}{D^2} = 4 \cdot 10^{11} \frac{e^{-(10^3 D_1)}}{D_1^2} \text{ (рентгенов),}$$

<sup>1</sup> Определение рентгена дается на стр. 90; см. также приложение VI.

<sup>2</sup> Поскольку спектр гамма-излучения неоднороден (немонокроматический), коэффициент ослабления  $k$  зависит от  $D$ , то есть при

где расстояние в километрах, а  $D_1$  в футах («The Effects of Atomic Weapons», 1950, p. 235).

Отсюда следует, что  $q$  равно  $1,7/100$ , тогда как расчетная величина для  $q$  равна  $1,9/100$ . Обе величины, таким образом, почти совпадают, и расхождение между ними вызвано, очевидно, случайными причинами. Экспоненциальный множитель показывает быстрое падение дозы излучения с увеличением расстояния. На расстоянии  $650 \text{ м}$  она равна  $10\,000 \text{ р}$ , на  $1300 \text{ м}$  —  $400 \text{ р}$  и свыше  $2700 \text{ м}$  — менее  $1 \text{ р}$ . При получении дозы  $400 \text{ р}$  погибает  $50\%$  людей, подвергшихся облучению. Таким образом, уже на расстоянии  $2,5 \text{ км}$  от эпицентра взрыва начальное гамма-излучение не представляет большой опасности.

Во время испытаний на Бикини в 1946 году производившиеся наблюдения показали, что, например, на расстоянии  $1300 \text{ м}$  от эпицентра взрыва полученная общая доза гамма-излучения составляла  $400 \text{ р}$ , причем половина этой дозы была получена в первую секунду взрыва. «Когда человек находится на таком расстоянии от эпицентра взрыва, где он может получить смертельную дозу радиации ( $400 \text{ р}$ ), он должен, увидя вспышку взрыва, немедленно укрыться в траншее или спрятаться за ближайшее здание для того, чтобы уменьшить поражающее воздействие на него проникающей радиации».

Интенсивность гамма-лучей с энергией  $0,7 \text{ Мэв}$ , испускаемых продуктами деления, уменьшается в 2 раза при прохождении ими в воздухе расстояния, равного  $180 \text{ м}$ , слоя дерева толщиной  $23 \text{ см}$  или же биологической ткани такой же толщины.

В табл. 9 приводится степень ослабления интенсивности гамма-лучей при прохождении ими некоторых материалов различной толщины.

Рассмотрим теперь действие нейтронов. Как уже указывалось, общая кинетическая энергия нейтронов составляет около  $3\%$  всей энергии, выделяющейся при атомном взрыве. Двигающиеся в направлении от центра взрыва нейтроны замедляются в результате столкновений с моле-

---

изменении  $D$  в больших пределах мы не можем даже приближенно считать  $k$  постоянным.

Более мягкие компоненты (лучи с большими длинами волн) поглощаются сильнее; на расстоянии примерно  $900 \text{ м}$  средняя энергия гамма-лучей равна  $3 \text{ Мэв}$ , хотя среди них имеются гамма-лучи с энергией  $4,5 \text{ Мэв}$ .

## Степень ослабления гамма-лучей с энергией 4,5 Мэв и 0,7 Мэв

Степень ослабления	Толщина, см							
	4,5 Мэв				0,7 Мэв			
	вода	бетон	железо	свинец	вода	бетон	железо	свинец
0,2	75	28	9,6	4	30,5	13	4,6	1,8
0,1	100	38	13	5,8	40,5	13	6	2,5
0,02	175	63	21	10	63	28	10	4,3
0,01	200	75	24	11,5	72,5	32,5	11,4	5,0
0,001	275	100	35	12	102	48	16,2	7,8

(Данные взяты из книги «The Effects of Atomic Weapons», 1950, p. 233.)

кулами воздуха. Однако замедление нейтронов может происходить только до энергии не менее 0,2 эв, поскольку ядра азота легко захватывают нейтроны с энергией порядка нескольких десятых эв (так называемый резонансный захват), образуя радиоактивный углерод 14.

Количество нейтронов (среди них различают: быстрые нейтроны—с энергией выше 3 Мэв, нейтроны средних энергий—от 3 Мэв до 0,2 эв и медленные нейтроны—с энергией около 0,2 эв), приходящееся на кв. см на расстоянии  $D$  (км) от центра взрыва, определяется по следующей формуле:

$$n \cong \frac{N \cdot 10^{-10}}{4\pi D^2} e^{-D/\lambda},$$

где значения  $N$  и  $\lambda$  приведены в таблице приведенной ниже, (AW, 1950, p. 243).

	Быстрые нейтроны (свыше 3 Мэв)	Нейтроны средних энергий (от 0,2 эв до 3 Мэв)	Медленные нейтроны (около 0,2 эв)
Количество выделяющихся нейтронов при взры- ве ( $N$ ) . . . . .	$3 \cdot 10^{22}$	$3 \cdot 10^{23}$	$3 \cdot 10^{23}$
Средняя длина свободно- го пробега нейтронов, км ( $\lambda$ ) . . . . .	0,19	0,18	0,18

Облучение потоком нейтронов плотностью  $5 \cdot 10^{11}$  нейтронов на кв. см, что соответствует 500 бэр (см. гл. V), обычно приводит к смерти. При взрыве номинальной атомной бомбы расстояние, на котором поражающее действие нейтронов приводит к смерти, равно примерно 550 м, а если учесть также быстрые нейтроны и нейтроны средних энергий, то это расстояние увеличится до 800 м.

Общее количество нейтронов, освобождающихся при взрыве номинальной атомной бомбы, можно считать равным  $6 \cdot 10^{24}$ , то есть примерно в 2 раза больше числа делений ядер. Это количество нейтронов в 10 раз больше того, которое приведено в таблице. Если  $N$  мы будем считать равным  $6 \cdot 10^{24}$  (хотя в действительности этого не может быть вследствие большого числа захватов нейтронов ядрами азота), то даже в этом случае расстояние, на котором полученная доза является смертельной, будет значительно меньше 1500 м.

Так как большинство выделившихся нейтронов захватывается ядрами азота, общая активность образующегося при взрыве номинальной атомной бомбы углерода 14 будет равна около 600 кюри<sup>1</sup>.

Нам осталось рассмотреть действие остаточной радиации (гамма- и бета-излучения), испускаемой продуктами деления спустя 1 мин. после взрыва. Действие ядерных излучений, испускаемых в первую минуту взрыва, уже рассмотрено нами выше (начальная радиация). Под действием силы взрыва и высоких температур продукты деления переходят в газообразное состояние. В случае воздушного взрыва в огненный шар всасывается с поверхности земли сравнительно небольшое количество размельченного грунта, на частицах которого конденсируются пары, образующие облако взрыва. Так как частицы, на которых конденсируются пары радиоактивных продуктов деления взрыва, имеют очень малые размеры, оседание этих частиц на поверхность земли происходит медленно. Во время оседания частиц радиоактивной пыли активность их уменьшается по закону  $1/t^{1,2}$ , о котором подробно говорилось в предыдущей главе. Радиоактивная пыль может быть отнесена ветром на большое расстояние от места

---

<sup>1</sup> Более подробно об углероде 14 сказано в гл. V, где рассматриваются взрывы большой мощности.

взрыва, причем движение радиоактивной пыли обычно происходит вдоль широты, соответствующей месту взрыва. К тому времени, когда радиоактивная пыль осядет на землю (в некоторых случаях она выпадает вместе с дождем), радиоактивность ее значительно уменьшится. Так как эта пыль, оседая, рассеивается на большой площади, ее поражающее действие не будет представлять почти никакой опасности. Выпадение радиоактивных продуктов деления на огромных пространствах земной поверхности следует отличать от местного выпадения радиоактивных продуктов деления в районе взрыва. В случае воздушного взрыва заражение местности в районе взрыва является незначительным<sup>1</sup>.

Таким образом, из всего сказанного мы можем заключить, что при воздушном взрыве атомной бомбы действие радиоактивного заражения местности практически можно не принимать во внимание. Совсем иначе обстоит дело с заражением местности в случае наземного взрыва или подводного взрыва на небольшой глубине. В следующих разделах мы кратко рассмотрим действие этих видов атомного взрыва и укажем, чем оно отличается от действия воздушного взрыва.

## ВИДЫ ВЗРЫВОВ

В зависимости от характера цели и поражения, которое требуется нанести этой цели, можно произвести тот или иной вид взрыва. В одних случаях необходимо сделать воронку и создать сильное радиоактивное заражение местности, в других—произвести максимально возможные разрушения действием ударной волны. Рассмотрим четыре основных вида взрыва:

- 1) воздушный взрыв;
- 2) наземный взрыв;
- 3) подземный взрыв;
- 4) подводный взрыв.

Если высота взрыва номинальной атомной бомбы над поверхностью земли равна примерно 600 м и более, то такой взрыв называется воздушным, если же высота равна

---

<sup>1</sup> На стр. 107 объясняется различие между локальным, глобальным и кольцевым выпадением радиоактивной пыли.

примерно 90 м, то взрыв называется наземным или же воздушным взрывом на малой высоте (при этом если тротиловый эквивалент бомбы будет в  $k$  раз больше тротилового эквивалента номинальной бомбы, то высота будет составлять  $90 k^{1/3}$  м). Для промежуточных высот, лежащих между указанными, действие взрыва будет средним между воздушным и наземным взрывами. Поскольку описание воздушного взрыва уже давалось, перейдем теперь к рассмотрению наземного взрыва.

Важным обстоятельством, которое необходимо отметить в случае наземного взрыва, является то, что огненный шар соприкасается с землей. В результате воздействия огромного давления ударной волны на поверхность земли в эпицентре взрыва образуется воронка, при этом большое количество выброшенного грунта испаряется и вместе с огненным шаром поднимается вверх. Размеры воронки зависят от характера грунта. Так, например, в песчаном грунте при взрыве номинальной атомной бомбы образуется воронка, диаметр которой равен примерно 400 м, а глубина составляет около  $1/6$  диаметра. Так как часть энергии ударной волны в этом случае затрачивается на образование воронки, общая площадь разрушений, вызванных ударной волной, уменьшается вдвое по сравнению с соответствующей площадью разрушений при воздушном атомном взрыве.

Однако давление на поверхности земли в районе эпицентра в случае наземного взрыва гораздо больше, чем при воздушном взрыве. Поэтому в районе эпицентра наземного взрыва полностью разрушаются даже самые прочные сооружения. Действие светового излучения при наземном взрыве значительно ослабляется вследствие наличия большого количества пыли и тумана. Действие же начальной проникающей радиации при наземном взрыве остается почти таким же, как и при воздушном взрыве. Однако при наземном взрыве в районе взрыва выпадает около 90% радиоактивных продуктов деления, в то время как при воздушном взрыве местного выпадения радиоактивных продуктов деления почти не наблюдается. Площадь местного выпадения радиоактивной пыли зависит от характера грунта, определяющего количество выброшенной в воздух земли, и метеорологических условий в момент взрыва, определяющих направление движения радиоактивной пыли и расстояние, на которое она будет унесена, прежде

чем успеет осесть на землю<sup>1</sup>. Более подробно об этом сказано в главе V. Здесь же достаточно будет указать, что площадь опасного радиоактивного заражения местности, вызванного выпадением радиоактивных продуктов деления при взрыве номинальной атомной бомбы, будет равна примерно 250 км<sup>2</sup>. Район выпадения радиоактивной пыли будет иметь форму овала, вытянутого в направлении ветра. При этом направление и скорость ветра берутся не у земли, а определяются их средним значением по высоте от 0 до 2 тыс. м для номинальной атомной бомбы и до значительно большей высоты для более мощных бомб.

Следующим видом взрыва является подземный<sup>2</sup>. Подсчитано, что при подземном взрыве атомной бомбы, произведенном на глубине около 15 м, в песчаном грунте образуется воронка, диаметр которой равен примерно 600 м, а глубина составляет  $\frac{1}{6}$  диаметра. В обычном грунте диаметр воронки будет равен примерно 250 м. Радиус зоны разрушений, вызванных действием ударной волны, составит в зависимости от характера грунта от  $\frac{1}{2}$  до  $\frac{2}{3}$  соответствующего радиуса для воздушного атомного взрыва. Радиус зоны разрушения при подземном взрыве гораздо больше в случае глинистого грунта, чем в случае песчаного. Отражение подземной ударной волны скалистыми слоями грунта на глубине 60—90 м заметно усиливает действие воздушной ударной волны. В результате подземного взрыва в грунте создаются большие давления и происходит смещение грунта. Поэтому такой взрыв может произвести серьезные повреждения подземной проводки (канализации, газопроводов и водопроводной системы). При подземном взрыве отсутствует световое излучение, и действие начальной ядерной радиации почти незаметно.

---

<sup>1</sup> В качестве примера необычных путей распространения продуктов деления на большие расстояния можно привести случай засвечивания рентгеновской пленки фирмы «Кодак», которое произошло в августе 1945 года. Засвечивание объясняется тем, что упаковочный картон, изготовленный из соломы, содержал в себе цериий 141 (один из продуктов деления), который был принесен течением реки Уобаш к картонной фабрике, находившейся на расстоянии 1500 км от места взрыва. Более подробно этот случай описан: Webb J. H., *Physical Review*, 76. 375, 1949.

<sup>2</sup> Подземный взрыв атомной бомбы производился в США во время испытания в Неваде в начале 1955 года («Time», April 4, 1955).



Местное выпадение радиоактивной пыли ограничивается небольшим районом значительно меньшей площади, чем при наземном атомном взрыве.

После рассмотрения наземного и подземного взрывов перейдем к рассмотрению надводного и подводного взрывов, которые применяются для поражения таких целей, как корабли и подводные лодки. Воздушный взрыв над водой по своему действию почти ничем не отличается от воздушного взрыва над землей. Примером воздушного взрыва над водой является испытание «Эйбл», проводившееся США на Бикини в 1946 году. Поражения, нанесенные кораблям во время этого взрыва, вызваны почти полностью действием ударной волны. Совершенно очевидно, что при воздушном взрыве в основном происходят повреждения открытых надстроек (мачт, антенн радиолокационных установок и пр.). При этом радиус сильного поражения кораблей при взрыве номинальной атомной бомбы составляет несколько больше 800 м.

Перейдем к подводным взрывам, которые могут производиться на большой и малой глубинах. Взрыв атомной бомбы, который производится на глубине примерно 300 м под водой, называется глубоким подводным взрывом. В случае такого взрыва повреждения кораблей и подводных лодок вызываются действием подводной ударной волны. Установлено, что при взрыве номинальной атомной бомбы кораблям торгового типа и легким морским судам наносятся серьезные повреждения на расстоянии до 900 м от эпицентра взрыва, а тяжелые корабли могут не получить серьезных повреждений даже на расстоянии около 700 м (в данном случае эпицентром взрыва является точка на поверхности воды прямо над центром взрыва).

Подводный взрыв на малой глубине, являющийся наиболее важным видом подводного взрыва, производится на глубине примерно 15 м. Примером взрыва такого вида может служить испытание «Бейкер» на Бикини в 1946 году. Во время этого взрыва наблюдалась вспышка значительно менее яркая, чем при воздушном атомном взрыве, так как огненный шар в этом случае прорывается на поверхность воды. Взрывом был поднят вверх столб воды, представлявший собой пустотелый цилиндр с шапкой («султаном»). Через 15 сек. высота поднятого столба воды достигла 1,5 км, а через 1 мин. она достигла своего максимума, равного около 2,4 км. Диаметр основания водяного столба был

равен 500 м, а диаметр шапки—около 2,5 км. Вес выброшенной воды составлял около 1 млн. т. Водяной столб состоял из мелких брызг воды, размельчение которых продолжалось при падении, после того как высота столба достигла своего максимума. У основания водяного столба образовалось кольцо белого тумана, так называемая базисная волна, которая распространялась от центра со скоростью около 80 км/час. Спустя 3 мин. после взрыва из расширяющегося кольца тумана начал выпадать дождь. Вскоре распространение базисной волны замедлилось, а еще через 2 мин. совсем прекратилось. Распространение базисной волны происходило на площади более 13 км<sup>2</sup>. Вместе с частицами тумана в базисной волне находилась часть продуктов деления. Основная же часть продуктов деления, по всей вероятности, содержалась в грибовидной шапке водяного столба<sup>1</sup>.

Базисная волна представляет большую опасность для кораблей, находящихся в районе взрыва. Кроме того, сильные повреждения наносятся кораблям подводной ударной волной. В отличие от воздушного взрыва при подводном взрыве давление в ударной волне значительно больше, а время воздействия меньше. Величина давления достигает 80 кг/см<sup>2</sup>, а продолжительность—0,01 сек. Таким образом, в результате подводного атомного взрыва корабли, находящиеся на расстоянии до 800 м от центра взрыва, будут потоплены, а корабли на расстоянии от 800 м до 1500 м получают значительные и слабые повреждения.

При подводном взрыве на малой глубине образуется также воздушная ударная волна, эффективность действия которой будет, по-видимому, в 4 раза слабее по сравнению с ударной волной при воздушном атомном взрыве.

Из всего сказанного можно сделать вывод, что разрушения, вызываемые действием атомного взрыва, происходят в основном в результате действия ударной волны (при этом не учитываются такие особые случаи, как например взрыв в порту на малой глубине). Колоссальная раз-

---

<sup>1</sup> Теория базисной волны была недавно подробно рассмотрена Хиксом и Пенни (Hicks E. S., Penny W. G., Symposium on the Physical Effects of Atomic Weapons, 1955). Ими был рассмотрен вероятный процесс быстрого образования капель дождя из мельчайших брызг, из которых состоит базисная волна. При этом первоначальный радиус мельчайших брызг считался равным 1 мк.

ница между действительным весом атомной бомбы и весом эквивалентного по разрушительной силе количества обычных бомб, несомненно, приводит к коренному различию между двумя системами оружия и их экономичностью. При сравнении атомных и обычных бомб представляет интерес тот факт, что наиболее разрушительным воздушным налетом во время войны с Японией была не атомная бомбардировка, а воздушный налет на Токио, в котором применялись обычные фугасные и зажигательные бомбы. Налет на Токио производился 9 марта 1945 года. На город было сброшено 1700 *т* фугасных и зажигательных бомб, в результате чего подвергся разрушению район площадью 41,5 км<sup>2</sup>. При этом было убито и пропало без вести 83 тыс. и более 100 тыс. человек было ранено.

Следующая глава посвящена действию взрывов большой мощности (с тротиловым эквивалентом, измеряемым миллионами тонн), основным поражающим действием которых является радиологическое.

## ДЕЙСТВИЕ ВЗРЫВОВ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

В настоящей главе дается описание действия ударной волны, светового излучения, проникающей радиации и радиоактивного заражения при взрывах большой мощности, то есть при взрывах с тротильным эквивалентом порядка нескольких миллионов тонн. При рассмотрении поражающего действия радиации на людей мы затронем только соматическое действие, то есть такой случай, когда вредные последствия облучения проявляются в течение периода жизни человека. Что же касается генетического действия радиации, которое зависит от облучения только половых желез и в отличие от соматического сказывается лишь на потомстве человека, то оно будет рассмотрено в следующей главе.

Будем считать «номинальной бомбой большой мощности» бомбу, обладающую тротильным эквивалентом 20 млн. *t* ( $8,4 \cdot 10^{23}$  эрг). Количество энергии, освобождающейся при взрыве такой бомбы, в тысячу раз больше того количества, которое освобождается при взрыве номинальной атомной бомбы. Это огромное количество энергии составляет примерно 2% от количества электроэнергии, вырабатываемой за год во всем мире, или же равно среднему количеству солнечной энергии, падающей на территорию Индии в течение 2 мин. Величина этой энергии того же порядка, что и энергии, освобождаемой при таких мощных природных явлениях, как землетрясения и ураганы<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Ниже приводится величина энергии, освобождающейся при землетрясениях различной интенсивности (см. табл. на стр. 85):

Кинетическая энергия перемещающихся масс в районе, занятии циклоном (диаметр—1400 км, высота—10 миллибар), равна  $1,5 \cdot 10^{24}$  эрг, а кинетическая энергия перемещающихся воздушных масс во всей атмосфере равна  $3 \cdot 10^{27}$  эрг (Sutton O. G., *Thermonuclear Explosions and the Weather, Nature*, 175, 319, 1955).

## УДАРНАЯ ВОЛНА, СВЕТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И НАЧАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ РАДИАЦИЯ

Известно, что радиус зоны разрушений под действием ударной волны пропорционален корню кубическому из общего количества энергии, которая выделяется при взрыве. Такому же закону подчиняется длительность каждой отдельной фазы ударной волны. Так, например, время прохождения зоны сжатия ударной волны равно 1 сек. для номинальной атомной бомбы и 10 сек. для номинальной бомбы большой мощности. Ввиду большого времени действия зоны сжатия критерием разрушения зданий и сооружений является максимальное давление, а не импульс ударной волны.

Площадь, на которой отмечаются поражения световым излучением, прямо пропорциональна количеству энергии, выделяющемуся при взрыве. Это относится к случаю, когда атмосферное поглощение светового излучения отсутствует. Но так как в действительности оно всегда существует—в меньшей степени в ясный день, в большей степени при наличии тумана,—то величина отношения площади поражения световым излучением при взрыве номинальной бомбы большой мощности к площади поражения световым излучением при взрыве номинальной атомной бомбы является значительно меньшей, чем величина отношения количеств выделяющейся в обоих случаях энергии. Кроме того, поскольку при взрыве номинальной бомбы большой мощности время действия светового излучения равно примерно 20 сек. по сравнению с 2 сек. при взрыве номинальной атомной бомбы

$$M = \frac{1}{1,8} \log \left( \frac{E}{2 \cdot 10^9} \right)$$

	Средняя величина $M$ по шкале Рихтера	Энергия $E$ , эрг
Сильное землетрясение . . . . .	8,5	$10^{26}$
Землетрясение средней силы . .	7,5	$10^{24}—10^{26}$
Слабое землетрясение (наблюдаются разрушения) . . . . .	6,5	$10^{22}—10^{24}$

(вспышка больше напоминает длительное облучение), его эффективность (при одинаковом количестве, падающем на поверхность земли) несколько меньше<sup>1</sup>.

При взрыве большой мощности интенсивность начальной ядерной радиации в 1000 раз больше, чем при взрыве номинальной атомной бомбы. Однако площадь поражения проникающей радиацией увеличивается в значительно меньшее количество раз вследствие поглощения излучений атмосферой. Это поглощение, величина которого определяется зависимостью  $e^{-kD}$  (см. стр. 67 и 73), значительно ограничивает увеличение площади эффективного поражения световым излучением и начальной ядерной радиацией.

Зная параметры поражающих факторов взрыва номинальной атомной бомбы, мы можем приблизительно определить поражающее действие взрыва номинальной бомбы большой мощности. В качестве примера в табл. 8 приведены данные о поражающем действии воздушного взрыва номинальной бомбы большой мощности, произведенного над городом. Оптимальной высотой взрыва для номинальной бомбы большой мощности считается высота 2400 м. Изучая таблицу, следует иметь в виду, что в случае наземного взрыва площадь района разрушений, вызванных действием ударной волны, составляет  $\frac{2}{3}$  площади района разрушений, вызванных ударной волной воздушного взрыва такой же мощности.

В случае воздушного взрыва номинальной бомбы большой мощности (20 млн. т) площадь района полного разрушения всех зданий обычного типа составит около 200 км<sup>2</sup>, в этом районе здания будут «полностью разрушены, обращены в пыль или в пар»; площадь района сильного разрушения составит более 520 км<sup>2</sup> и площадь района частичного разрушения—2600 км<sup>2</sup>.

Одной такой бомбой можно практически полностью разрушить самый крупный город. Так, например, в резуль-

---

<sup>1</sup> Повышение температуры поверхности земли в результате поглощения определенного количества световой энергии происходит по закону  $\frac{1}{\sqrt{t}}$ , где  $t$ —время воздействия светового излучения. Этим объясняется относительное снижение эффективности действия светового излучения при взрывах большой мощности по сравнению с атомными («Nature», 164, 923, 1949).

## Взрыв номинальной бомбы большой мощности\*

(взрыв воздушный; высота взрыва—2400 м)

Ударная волна (время воздействия зоны сжатия ударной волны—около 10 сек.)		Световое излучение (время воздействия—около 20 сек.)	Начальная ядерная радиация (время воздействия—1 мин.)
Характер разрушений	Радиус зоны разрушений, км		
Полное разрушение зданий	8	Если взрыв происходит над облаками, то значительная часть светового излучения не достигает поверхности земли	Доза гамма-излучения, полученная на расстоянии до 3 км, равна примерно 400 р. На расстоянии более 6 км от эпицентра взрыва облучение не представляет большой опасности. Радиус поражения нейтронами значительно меньше, поэтому их действие можно не учитывать
Сильное разрушение зданий (восстановление невозможно)	13		
Среднее разрушение зданий (требуется капитальный ремонт)	21	В ясный же день пожары и ожоги открытых участков тела могут отмечаться на расстоянии до 32 км от эпицентра взрыва. Таким образом, радиус поражающего действия светового излучения больше радиуса зоны разрушения ударной волной	
Слабое разрушение зданий (возможно быстрое восстановление)	32		
Легкие повреждения зданий (выбиты стекла и пр.)	130		

\* См. «Operation CUBE» (программа атомных испытаний в США, осуществлявшаяся федеральным управлением гражданской обороны совместно с комиссией по атомной энергии на полигоне в Неваде весной 1955 года) и «Nuclear Weapons» (Manual of Civil Defence: vol. I, Pamphlet № 1), H.M.S.O., 1956.

тате взрыва одной номинальной бомбы большой мощности над Нью-Йорком материальный ущерб будет составлять примерно 20 млрд. долл., а потери—до 7,5 млн. человек. На основе детального анализа Гарт<sup>1</sup> пришел к выводу, что общая площадь важнейших стратегических объектов США, которые могут стать целями атомного нападения противника (таких, как базы стратегической авиации, важнейшие промышленные центры, угольные и нефтяные районы, крупные порты и др.), равна примерно 5200 км<sup>2</sup>. *Разрушение всех этих жизненно важных районов приведет к тому, что вся жизнь страны будет полностью парализована.* Говоря о запасах ядерного оружия в Советском Союзе, Гарт отмечает, что уже в 1954 году количество ядерного оружия в СССР было достаточным для того, чтобы поразить площадь 26 тыс. км<sup>2</sup>, а к 1957 году оно увеличится настолько, что площадь вероятного района разрушений будет составлять 180 тыс. км<sup>2</sup>. Эта площадь более чем в 30 раз превышает общую площадь важнейших военных и промышленных объектов США, являющихся вероятными целями атомного нападения. При этом следует учесть, что определение этой площади основано только на данных о поражающем действии ударной волны (без учета еще более опасного поражающего действия радиоактивной пыли).

### ПОРАЖАЮЩЕЕ ДЕЙСТВИЕ РАДИАЦИИ: ВНЕШНЕЕ И ВНУТРЕННЕЕ ОБЛУЧЕНИЕ

Перейдем к рассмотрению радиологического действия взрывов большой мощности, которое в этом случае является основным поражающим фактором и по сравнению с которым поражающее действие ударной волны и светового излучения имеет второстепенное значение. Для того чтобы можно было оценить размеры новой опасности, возникающей в результате взрывов большой мощности, дадим краткую характеристику действия ионизирующей радиации на человека<sup>2</sup>. Рассмотрим отдельно: 1) поражение организма, вызываемое радиоактивными веществами,

<sup>1</sup> Hart H., Bulletin of the Atomic Scientists, 10, 197, 1954.

<sup>2</sup> Известно, что Кюри был первым человеком, который сознательно подвергся облучению, желая продемонстрировать вредное



попадающими внутрь организма (например, при их вдыхании, заглатывании или инъекциях), и 2) поражение организма, вызываемое действием проникающей радиации в случае, когда источник облучения находится вне организма. Эти два вида облучения можно также назвать внутренним и внешним облучением. В случае попадания радиоактивных веществ внутрь организма поражающее действие оказывают альфа-частицы, бета-частицы и гамма-лучи. В случае же внешнего источника облучения поражающее действие оказывают только гамма-лучи; альфа- и бета-частицы при этом не учитываются ввиду их малого пробега в воздухе<sup>1</sup>.

В первую очередь мы рассмотрим действие радиации, когда источник облучения находится вне организма. Внутреннее же облучение организма будет рассмотрено позже. Следует указать на то, что, как правило, в условиях ведения войны с применением ядерного оружия более опасными являются случаи внешнего облучения.

Механизм поражающего действия радиоактивных излучений на живые клетки организма все еще остается не совсем ясным. Его изучение является одной из важнейших и интереснейших задач, стоящих перед современной наукой. Первым звеном сложного ряда физических, химических и биохимических процессов, происходящих в результате воздействия радиоактивных излучений на организм, является ионизация молекул, из которых состоит клеточное вещество.

Ионизация молекулы происходит в результате выбивания из нее одного или нескольких электронов под действием бомбардирующего молекулу излучения. В результате ионизации молекула разрушается. Интересно отме-

---

действие радия. Он в течение 10 час. держал руку близ радионного источника, в результате чего через 20 дней на руке образовалась язва, для лечения которой потребовалось более 2 месяцев.

<sup>1</sup> При попадании радиоактивных веществ на кожу человека бета-частицы проникают через кожу на глубину 0.13 см. Так как бета-частицы не достигают кровеносной системы и других органов, то внешнее облучение бета-частицами не вызывает общего поражения организма. Однако результатом облучения, при котором 1 г ткани организма поглощает 100 эрг, являются эмплязии и ожоги третьей степени, для лечения которых требуется пересадка тканей. Глубина проникания альфа-частиц через кожу еще меньше, чем глубина проникания бета-частиц, поэтому их поражающее действие является совсем незначительным.

тить при этом, что облученная клетка ткани разрушается даже в том случае, когда поглощенная клеткой доза излучения способна ионизировать только бесконечно малую часть от общего количества молекул, составляющих клетку.

## РЕНТГЕН, РАД<sup>1</sup> И БЭР

За единицу дозы излучения, поглощаемой тканью, принято считать такое количество излучения, которое в единице массы облученной ткани вызывает образование определенного количества пар ионов. Такой единицей является рентген ( $p$ )<sup>2</sup>. Доза в 1  $p$  вызывает образование  $1,6 \cdot 10^{12}$  пар ионов в каждом грамме облученной ткани. Это примерно эквивалентно двум ионизированным молекулам и такому же числу возбужденных молекул в каждом кубическом микроне облученной клетки. Говоря о том, что ткань получила дозу в 1  $p$ , мы имеем в виду образование в каждом грамме облученной ткани  $1,6 \cdot 10^{12}$  пар ионов, не указывая при этом, какова общая масса ткани, получившей эту дозу<sup>3</sup>.

Точное определение рентгена и двух других единиц, употребляемых в радиобиологии,—*рад* и *бэр*<sup>4</sup>,—дается в приложении VI. Здесь же достаточно будет сказать, что 1  $p$  соответствует поглощению 93 *эрг* энергии на 1 г ткани, а 1 *рад* соответствует поглощению 100 *эрг* на 1 г ткани. Ниже приводятся примеры, которые помогают представить реально величину дозы излучения в 1  $p$ :

1) Доза излучения от радиевого источника 1 г радия, получаемая в течение 1 часа на расстоянии 1 м от источника, равна 1  $p$ .

2) Доза излучения от 60-киловольтной рентгеновской

---

<sup>1</sup> Единица измерения поглощенной дозы, редко применяемая в СССР. Отвечает поглощению 100 *эрг* энергии на 1 г ткани.—Прим. ред.

<sup>2</sup> Единица *рентген*, названная так в честь Рентгена, открывшего X-лучи, была впервые официально принята на II Международном конгрессе радиологов в 1928 году.

<sup>3</sup> Физические величины разделяются на экстенсивные и интенсивные. Примерами интенсивных величин являются давление и температура, а экстенсивных—масса и объем. Доза излучения, измеряемая в рентгенах, является интенсивной физической величиной.

<sup>4</sup> Единица *рад* была официально утверждена на VII Международном конгрессе радиологов в 1953 году. Единица *бэр* официально еще не утверждена.

трубки, работающей на токе 10 *ма*, получаемая на расстоянии 1 м от трубки в течение 1 мин., равна 30 *р*.

3) Доза излучения, получаемая в течение 1 года от светящегося циферблата ручных часов (активность 1 *мккюри*) на расстоянии 0,3 м, равна примерно 40 миллирентгенам.

4) При обычном просвечивании грудной клетки получаемая человеком доза излучения равна примерно 0,3 *р*. При флюороскопических исследованиях получаемая доза равна 1 *р*. При просвечивании грудной клетки с помощью передвижной рентгеновской установки получаемая доза в результате одного облучения равна 2—10 *р*.

5) Доза, получаемая человеком в течение его жизни, вследствие наличия радиоактивного фона, создаваемого космическими лучами и радиоактивными веществами, постоянно содержащимися в воздухе, воде и почве, равна приблизительно 10 *р*.

Дополнительно ряд примеров приводится в схеме IV. Рентген в отличие от единиц *рад* и *бэр* применяется только для измерения доз рентгеновского и гамма-излучений (иногда он используется также и для бета-излучения). К другим ионизирующим излучениям, таким, как излучение альфа-частиц, протонов и нейтронов, он неприменим, ибо относительная биологическая эффективность (о. б. э.) этих излучений резко отличается от относительной биологической эффективности рентгеновских и гамма-лучей.

Обычная клетка ткани имеет длину 5 *мк* и диаметр 1 *мк*. Такая клетка содержит около 70% воды и 27% солей и веществ, молекулярный вес которых (*М*) равен менее  $10^3$ . Остальные 3% включают около 1 млн. протеиновых молекул ( $M \approx 10^5$ ) и несколько сот молекул нуклеиновой кислоты ( $M \approx 10^7$ ). (В организме человека хромосома, которая в основном состоит из дезоксирибонуклеиновой кислоты, имеет длину 2—3 *мк* и диаметр 0,05—0,1 *мк*.) Доза в 1000 *р*, приводящая к гибели большинства клеток, вызывает образование до 20 тыс. пар ионов. Исходя из молекулярного веса, мы можем легко определить, что при поглощении такой дозы излучения подвергнутся ионизации только 1% молекул нуклеиновой кислоты и 0,01% протеиновых молекул. Ионизация меньших молекул практически происходить не будет<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Pollard E. C., Statistics and Mathematics in Biology, edited by O. Kempthorne et al., Iowa State College Press, 1954, p. 487.

Следует указать на то, что только очень большие дозы, измеряемые в тысячах рентгенов, могут привести к мгновенной гибели облученных клеток. При получении меньшей дозы клетка продолжает свою деятельность до момента деления, которое является серьезным испытанием жизнеспособности клетки. Облученная клетка либо погибает в процессе деления, либо делится на дочерние клетки, которые оказываются нежизнеспособными. Вследствие этого ткани, состоящие из делящихся клеток, например костный мозг, являются значительно более чувствительными к радиации, чем ткани, состоящие из клеток, которые не подвергаются дальнейшему делению, как например клетки головного мозга. По этой же причине существует скрытый период лучевой болезни, то есть период с момента облучения человека до момента появления признаков лучевой болезни.

### ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ТКАНЕЙ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ОРГАНИЗМА К РАДИАЦИИ

Степень чувствительности тканей человеческого организма к радиации различна. Наиболее чувствительными к воздействию радиации являются кроветворные органы и зародышевые ткани, наименее чувствительными — ткань мозга и мышечная ткань<sup>1</sup>.

Расположив ткани различных органов в порядке уменьшения их чувствительности к действию радиации, мы получим следующий ряд: лимфатическая ткань, зародышевый эпителий яичка, костный мозг, желудочно-кишечный эпителий, яичники, кожный покров, соединительная ткань, костная ткань, печень, поджелудочная железа, почки, нервы, головной мозг и мышечная ткань<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> Отчет о некоторых представляющих большой интерес работах советских ученых по действию гамма-излучения на первую систему животных, на условные рефлексы и др. можно найти в «The Proceedings of the International Conference on the Peaceful uses of Atomic Energy held at Geneva, 1955», vol. 11, United Nations, 1956.

<sup>2</sup> «Admiralty Notes on Atomic Energy for Medical Officers», СН. 12. Н.М.С.О., 1955. Отчет о гематологических изменениях и общем течении лучевой болезни у людей, случайно подвергшихся облучению (2 случая в СССР и 4 случая в США), имеется в «The Proceedings of the International Conference on the Peaceful uses of Atomic Energy held at Geneva, 1955», vol. 11.

Доза излучения, необходимая для серьезного поражения этих тканей (за исключением первых шести или семи в приведенном выше ряду), превышает смертельную дозу облучения всего тела. Большая чувствительность к радиации кроветворных органов имеет большое значение при определении характера лучевой болезни и ее течения. Если полученная доза излучения является достаточно большой (примерно 100 p), то скорость образования кровяных телец кроветворными органами падает в зависимости от степени облучения. В результате происходит заметное уменьшение в крови количества кровяных телец всех видов, причем время, когда наступает это уменьшение, связано с продолжительностью жизни каждого вида кровяных телец. Так, например, быстрее всего происходит сокращение числа лимфоцитов, которые имеют продолжительность жизни менее одного дня. Изменение их количества наблюдается уже через день после облучения. Продолжительность жизни эритроцитов (красных кровяных телец) равна примерно 120 дням, поэтому уже через 2 недели после облучения происходит заметное уменьшение их количества в крови<sup>1</sup>.

Достаточно подробное описание изменений состава крови в результате облучения дается в книге «The Effects of Atomic Weapons».

### ДОПУСТИМАЯ ДОЗА

Характер и степень поражения, вызванного действием ионизирующей радиации, зависят как от величины дозы излучения, получаемой человеком, так и от времени, в течение которого происходит облучение<sup>2</sup>.

При облучении одинаковыми дозами в одном случае в течение малого промежутка времени, а в другом — в течение длительного периода результаты будут различ-

---

<sup>1</sup> Обычно к концу периода жизни эритроцитов ежедневно в крови убывает примерно  $2 \cdot 10^{11}$  эритроцитов, что составляет около 1% их общего количества.

<sup>2</sup> Во всех случаях имеется в виду облучение всего тела, случаи же частичного (или местного) облучения специально оговариваются. При частичном облучении допускаются гораздо большие дозы, чем при общем облучении всего тела. Например, при облучении дозой 400 p участка тела площадью 6 см<sup>2</sup> заметного поражения не наблюдается, а при облучении такой же дозой всего тела смертельный исход наступает в 50% случаев.

ные. При этом следует помнить, что мы учитываем здесь только соматическое действие, о чем уже упоминалось в начале главы. Часто считают (хотя данные, основанные только на наблюдениях, можно оспаривать), что если интенсивность облучения является достаточно малой, то есть меньше определенного порогового значения, то при продолжительном облучении, даже в том случае, когда оно продолжается в течение всей жизни человека, у облучавшегося не будет наблюдаться сколько-нибудь заметного биологического поражения.

Международная комиссия по защите от радиоактивного излучения определяет *допустимую дозу облучения* как «дозу ионизирующего излучения, которая, как доказывает современная наука, не вызовет у человека в течение его жизни заметного поражения, которое бы он сам или же компетентные медицинские работники считали вредным для здоровья человека». Допустимая еженедельная доза облучения определяется как такая доза, которая существенно не отражается на здоровье человека, получающего ее каждую неделю в течение длительного времени. Величина этой дозы, рекомендуемая международной комиссией по радиологической защите, составляет 0,3 *р* в неделю при облучении всего тела<sup>1</sup>.

(В том случае, когда облучению подвергаются только отдельные участки тела—ноги, руки, голова, шея,—допустимая доза увеличивается до 1,5 *р* в неделю.) Международная комиссия по защите от радиоактивного излучения рекомендует также в случае длительного облучения большого числа людей считать допустимой дозу в 10 раз меньше установленной для персонала, работающего в атомной промышленности. Однако комиссия по атомной энергии США установила для людей, не связанных с атомным производством, допустимую дозу облучения 3,9 *р* в год, то есть в 4 раза меньше рекомендуемой Международной комиссией по защите от радиоактивного излучения для персонала, работающего в атомной промышленности. Если человек будет подвергаться облучению, получая при этом допустимые дозы, установленные этой комиссией, то за 1 год он получит общую дозу, равную 15 *р*, а за

---

<sup>1</sup> «Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (Revised December 1, 1954)», *British Journal of Radiology*, Supplement № 6, 1955.

40 лет—600 р. Если такая огромная доза будет получена в течение одного дня, то, по всей вероятности, она окажется смертельной.

Ряд опытов, проводившихся над млекопитающими животными, показывает, что у животных при получении ими даже самых малых доз излучения всегда оказывались необратимые поражения. Если этот результат будет подтвержден дальнейшими исследованиями, значит, даже для соматического действия излучений не может быть пороговой величины. Одним из оснований для гипотезы о том, что облучение всегда ведет к необратимым вредным изменениям в организме, являются результаты проводившихся недавно экспериментов над животными, доказывающие, что вредное действие облучения может аккумулироваться, сокращая продолжительность жизни<sup>1</sup>. При получении дозы в 100 рентген продолжительность жизни уменьшается на 1%. Таким образом, в результате получения человеком допустимой дозы 600 р в течение 40 лет жизнь его укоротилась бы на 6%.

Марч<sup>2</sup> в своих работах пишет о том, что в США за период с 1928 по 1948 год смертность среди врачей-рентгенологов составляла 4,7% по сравнению с 0,5% среди врачей других специальностей. Кроме того, установлено, что средняя продолжительность жизни у рентгенологов на 5 лет меньше, чем у других врачей. В результате тщательного изучения последствий атомной бомбардировки<sup>3</sup> японских городов выяснилось, что в Хиросиме смертность от лейкемии в период 1948—1950 годов в 3—5 раз превышала среднюю смертность для Японии.

Все имеющиеся экспериментальные данные показывают, что действие ионизирующей радиации на клетки ткани может быть только вредным. Лечение же рака радиоактивным излучением означает лишь то, что быстро размножающиеся раковые клетки, являясь более чувствительными к воздействию излучения, подвергаются поражению в большей степени, чем клетки здоровой ткани.

---

<sup>1</sup> Blair H. A., The Proceedings of the International Conference on the Peaceful uses of Atomic Energy held at Geneva, 1955, vol. 11.

<sup>2</sup> March H. C., Leukemia in Radiologists in a 20 Year Period, *American Journal of Medical Science*, 220, 282, 1950.

<sup>3</sup> Kusano Nobuo, Atomic Bomb Injuries, Tokyo, 1953.

На основании всего этого международная комиссия по защите от радиоактивного излучения пришла к следующему заключению:

«Хотя величина предлагаемых допустимых доз облучения рассчитана на то, что опасность вредных последствий при получении этих доз человеком является очень небольшой по сравнению с другими существующими в жизни опасностями, тем не менее, учитывая многочисленные данные, доказывающие способность вредного действия облучения аккумулироваться и вызывать в организме необратимые изменения, *Международная комиссия по защите от радиоактивного излучения настоятельно рекомендует принять все меры к тому, чтобы облучение всеми видами ионизирующих излучений свести до минимума*<sup>1</sup>. Таким образом, едва ли можно сомневаться в том, что уровни допустимых доз облучения, установленные международной комиссией по защите от радиоактивного излучения, являются завышенными. Это особенно резко бросается в глаза при рассмотрении генетического действия радиации, описание которого будет дано в следующей главе. Следует ожидать, что в ближайшем будущем рекомендуемые комиссией допустимые нормы облучения будут пересмотрены с целью их уменьшения.

### ДОЗА ИЗЛУЧЕНИЯ, ПРИВОДЯЩАЯ К ГИБЕЛИ 50% ПОДВЕРГШИХСЯ ОБЛУЧЕНИЮ (LD-50)

До сих пор мы имели дело со сравнительно малыми дозами облучения и большими периодами, в течение которых это облучение происходило. Теперь рассмотрим действие больших доз облучения, получаемых за короткое

---

<sup>1</sup> В этой связи необходимо привести следующие наблюдения Марковича: «Количество случаев навсденного рака возрастает с увеличением дозы облучения, но при этом увеличивается также скрытый период, то есть время с момента облучения до момента проявления болезни. Таким образом, мы можем говорить о пороговом значении действия радиоактивных излучений. Природа такого порога еще не выяснена, так как существует много факторов, влияющих на образование раковых опухолей, и их взаимодействие является очень сложным. Однако мы не ошибемся, если будем считать, что при всех равных условиях ионизирующие излучения даже в самых малых дозах являются еще одним средством возбуждения рака («The Proceedings of the International Conference on the Peaceful uses of Atomic Energy held at Geneva, 1955», vol. 11).



время. Для того чтобы можно было оценить величину опасности, которая возникает в связи с выпадением радиоактивных продуктов деления в районе ядерного взрыва, необходимо иметь представление о действии больших доз излучения на человека. Ряд научных экспериментов, проводившихся над животными с целью определить смертельную дозу, показывает, что для различных животных величина дозы, которая является смертельной для 50% животных, различна (табл. 11). Эксперименты показывают, что доза LD-50 может быть легко воспроизведена<sup>1</sup>.

Таблица 11

**LD-50 для некоторых видов млекопитающих**

Млекопитающие	Доза гамма-излучения, вызывающая смерть 50% облученных животных, р
Морская свинка . . . . .	200
Собака . . . . .	300
Обезьяна . . . . .	500
Крыса . . . . .	600
Кролик . . . . .	800

Следует отметить, что микроорганизмы обладают значительно большей устойчивостью к действию ионизирующих излучений, чем млекопитающие животные. Это частично объясняется более сложными биологическими процессами, происходящими в организме млекопитающих. Смертельная доза облучения для насекомых в 10 раз больше, чем для млекопитающих, а для микроорганизмов — в сотни раз. Ионизирующие излучения используются сейчас, хотя еще пока в малых масштабах, для стерилизации и консервирования продуктов питания. При этом требуются дозы облучения в несколько миллионов *рад*.

Вполне очевидно, что непосредственно определить величину LD-50 для человека нельзя. Однако на основа-

<sup>1</sup> Если дозы излучения, вызывающие смерть 95% и 5% облученных особей, мы обозначим соответственно LD-95 и LD-5, отношение LD-95 к LD-5 будет равно примерно  $< 2$  для млекопитающих животных и предположительно  $> 3$  для человека.

нии многолетнего опыта клинического лечения больных рентгеновскими лучами и радиоактивными источниками, а также на основании данных, полученных в результате изучения пострадавших при взрывах в Хиросиме и Нагасаки и случайно подвергшихся облучению большими дозами<sup>1</sup>, можно предположить, что для человека эта доза равна 400—500 р. Примем ее в 400 р. Доза в 800 р будет смертельной для 95% людей, подвергшихся облучению. Как правило, в этом случае смерть наступает не мгновенно, а через несколько недель. Для того чтобы вызвать мгновенную смерть, необходимо облучать человека дозами в 10 и даже 100 раз большими, чем LD-50<sup>2</sup>.

Человек, получивший дозу 400 р (облучение всего тела), поглотит при этом 28 кэм энергии. Это количество энергии совершенно случайно оказывается равным минимальному количеству энергии, которой должна обладать винтовочная пуля для того, чтобы поразить человека насмерть. В качестве другого примера отметим, что энергия, затрачиваемая на рукопожатие, примерно равна энергии, получаемой человеком при облучении всего тела дозой в несколько рентгенов. Однако 400 рукопожатий не эквивалентны 400 р. Рукопожатия не ионизируют атомов, а гамма-лучи ионизируют и тем самым нарушают основные

---

<sup>1</sup> «Продолжают происходить случаи переоблучения большими дозами рентгеновского излучения, в результате чего наступает тяжелое заболевание и даже смерть. Особенно часто подвергаются переоблучению врачи, не имеющие опыта в проведении рентгеновских исследований. Причиной является халатность врачей или незнание опасности, которая связана с переоблучением. Иногда врачи просто не знают способов предотвратить переоблучение... Случаи лейкемии среди радиологов и тех, кто подвергся облучению, являются более частыми, чем среди других врачей. Действие излучения на половые органы может привести к бесплодию и к генетическим изменениям. У радиологов и других людей, подвергшихся облучению, в первом поколении рождается значительно больше детей уродами. Исходя из данных, полученных в результате экспериментов над животными, можно предполагать, что во втором и третьем поколениях этот процент будет еще выше. Максимально допустимой дозой должна считаться доза, равная 300 миллирентгенам в неделю. Было бы совершенно правильным понимать под чрезмерным облучением такое облучение, которого можно избежать» (Ritvo M. et al., Radiation Hazards to Non-radiologists participating in X-ray Examination, *The Journal of the American Medical Association*, 160, 4, 1956).

<sup>2</sup> Brace K. C., Andrews H. L., Early Radiation Death, The Proceedings of International Conference on the Peaceful uses of Atomic Energy held at Geneva, 1955, vol. 11.

процессы, происходящие в клетках ткани, в результате чего может наступить смерть.

В табл. 11 приводятся наиболее вероятные последствия облучения людей различными дозами. Таблица взята из «Nuclear Weapons» (Manual of Civil Defence, vol. 1, Pamphlet № 1), Н. М. С. О., 1956. Эти данные относятся к мгновенному облучению. Если же дозы будут получены в течение сравнительно большого периода времени, то эффект будет намного слабее. Например, при получении человеком дозы 500 *p* в течение одного дня эффективность действия излучения снижается примерно вдвое по сравнению с эффективностью действия при мгновенном получении такой же дозы.

Для военного времени допустимой дозой однократного облучения предлагается считать дозу 25 *p*, получаемую в течение нескольких часов. Доза вдвое большая (50 *p*) будет считаться допустимой при получении ее в течение 2—3 дней.

Необходимо отметить, что обычным симптомом лучевой болезни является рвота, а время появления рвоты после облучения может служить показателем степени тяжести лучевой болезни.

Следует указать на то, что в результате облучения может наступить бесплодие. В этом случае имеет значение только та доза, которая будет получена половыми органами. Бесплодие обычно наступает через месяц после облучения, причем длительность периода временного бесплодия зависит от величины полученной дозы (от нескольких месяцев и дольше)<sup>1</sup>.

Если доза, полученная половыми органами, достаточно велика, например 1000 *p*, то может наступить постоянное бесплодие.

Лоутит<sup>2</sup> в своей работе отмечает: «После облучения всего тела однократными большими дозами быстро наступает бесплодие. Вырабатываемые женскими и мужскими органами размножения клетки чрезвычайно подвержены

<sup>1</sup> Временное бесплодие отмечалось у японских рыбаков, подвергшихся действию радиоактивной пыли, которая выпала при взрыве 1 марта 1954 года. Они получили дозу излучения, равную нескольким сотням рентгенов.

<sup>2</sup> Loutit J. E., The Experimental Animal for Study of the Biological Effects of Radiation, The Proceedings of the International Conference on the Peaceful uses of Atomic Energy held at Geneva, 1955, vol. 11.

Вероятное действие на людей различных доз гамма-излучения, получаемых однократно  
(данные получены от научно-исследовательского медицинского Совета Соединенного Королевства)

Величина однократных доз, p	Смерть в период 24 час. после облучения	Смерть в период 6 недель после облучения	Число выведенных из строя за 24 часа	Вероятный период, в течение которого человек считается выведенным из строя
0—25	0	0	Ничтожно малое	2—3 дня
25—75	0	0	Отдельные случаи	2—3 дня
75—100	0	Менее 0,1%	Около половины	1—2 недели
100—150	0	Менее 0,5%	Более половины	Около 3 недель
150—200	0	До 5%	Более $\frac{3}{4}$	Не менее 3 недель, на- блюдаются тяжелые заболевания
200—400	Почти нет	Около $\frac{1}{3}$	Предположительно все	Не менее 3 месяцев
400—600	Отдельные случаи	50%	» »	Не менее 3 месяцев
Более 800	Небольшое количество	Почти все	» »	—

воздействию радиоактивных излучений, в то время как созревшие клетки подвержены такому воздействию гораздо в меньшей степени. В лечебных целях доза в несколько сот рентгенов может применяться с целью вызвать преждевременный климакс. Для полной стерилизации мужчины требуется значительно большая доза, хотя, насколько это мне известно, такая процедура в лечебных целях не применяется. Яичник, в котором убиты вырабатываемые им яйцеклетки, не может производить новые, в то время как функции яичка во многих случаях восстанавливаются.

В полугодовом отчете комиссии по атомной энергии США («The Nineteenth Semiannual Report of the USAEC», January 1956) приводятся другие примеры возможных последствий действия средних доз ионизирующего излучения: «Эксперименты с обезьянами, проводившиеся в медицинской школе при Университете Джонса Гопкинса, показывают, что получение средних доз ионизирующих излучений часто приводит к повторному заболеванию тифом животных, которые уже полностью выздоровели от этой болезни за несколько месяцев до облучения. Введение больших доз кортизоны также может привести к активизированию скрытых вирусов и заболеванию тифом. Таким образом, возникает серьезная опасность возможных эпидемий, которые значительно осложнят лечение больших масс людей в густонаселенных районах в случае ядерной войны.

У  $1/3$  большой группы жителей Балтимора, которые эмигрировали из Восточной Европы несколько десятков лет назад, были найдены скрытые вирусы, свидетельствующие о ранее перенесенном заболевании тифом. В этой группе наблюдались случаи, когда после инъекции кортизоны или после облучения происходило повторное заболевание тифом.

### ИЗМЕНЕНИЕ СТЕПЕНИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЖИВОТНЫХ К ДЕЙСТВИЮ ИЗЛУЧЕНИЙ

Очень важно отметить здесь, что при проведении опытов над мышами удалось искусственными средствами добиться изменения величины дозы LD-50<sup>1</sup>. Известно,

---

<sup>1</sup> Hollaender A., Kimball R. F., *Nature*, 177, 726, 1956.

что чувствительность клеток к рентгеновскому и гамма-излучению зависит от степени концентрации кислорода, содержащегося в клетках ткани. Степень концентрации кислорода в значительно меньшей степени влияет на чувствительность клеток к облучению нейтронами и почти совсем не влияет на чувствительность клеток к альфа-излучению. Причиной этого является то, что в случае действия этих видов излучений удельная ионизация очень отличается от той, которая характерна для излучений первого вида. Уменьшение содержания кислорода ниже нормального вызывает соответствующее уменьшение чувствительности к излучению, в то время как увеличение его содержания почти не влияет на чувствительность<sup>1</sup>.

Подобное же влияние содержания кислорода отмечается в случае простых неорганических систем, например под действием радиоактивного излучения происходит окисление сульфата железа в воде. Присутствие кислорода может увеличить в 4 раза выход продуктов реакции окисления. Молекулы воды, содержащиеся в большом количестве в биологических системах, под действием ионизирующего излучения распадаются на Н и ОН. При наличии кислорода Н соединяется с  $O_2$ , образуя активные окисляющие радикалы, такие, как  $HO_2$ . Таким образом, мы можем сказать, что основная роль  $O_2$  заключается в использовании Н также для окисления<sup>2</sup>.

Увеличение сопротивляемости к воздействию радиации в условиях пониженного содержания кислорода особенно ярко проявилось при проведении экспериментов с мышами. Установлено, что для мышей, помещаемых на время облу-

---

<sup>1</sup> Возможным следствием влияния концентрации кислорода является тот факт, что катаракта (непрозрачность) глазного хрусталика может быть гораздо быстрее вызвана действием быстрых нейтронов, чем действием рентгеновских или гамма-лучей. В глазном хрусталике нет кровяных сосудов, поэтому питание его кислородом происходит в результате процесса медленной диффузии. Таким образом, содержание кислорода в глазном хрусталике значительно меньше, чем в других тканях организма. Ввиду этого чувствительность глазного хрусталика к гамма-излучению очень ослабляется. Однако этого нельзя сказать в отношении его чувствительности к нейтронам и другим видам излучений с высокой удельной ионизацией, которые не вызывают уменьшения чувствительности к излучению при уменьшении содержания кислорода.

<sup>2</sup> Gray L. H., Some Characteristics of Biological Damage Induced by Ionizing Radiation, *Radiation Research*, 1, 189, 1954.

чения в атмосферу, содержащую от 5 до 7% кислорода, величина дозы LD-50 почти удваивается. Этот метод, безусловно, неприменим к человеку, так как недостаток кислорода в воздухе может привести к его смерти. Однако существует другой путь решения этой проблемы. При введении мышам в оптимальных дозах некоторых химических препаратов, таких, как цистеин и цистеамин, доза LD-50 увеличивается почти вдвое. Процесс, происходящий при этом, еще не вполне ясен: по-видимому, эти препараты в некоторых случаях непосредственно реагируют с окислителями, причем результат получается такой же, как и в случае уменьшения содержания кислорода. Указанные препараты вследствие их токсичности нельзя вводить в организм человека в требуемом количестве. Можно, однако, надеяться, что в ближайшем будущем будут найдены другие, менее токсичные препараты.

Мы, таким образом, рассмотрели ряд экспериментов, целью которых было увеличить в период до облучения способность организма сопротивляться вредному воздействию радиоактивного излучения. Можно также добиться ослабления эффекта действия радиации. Наиболее эффективным методом ослабления результатов действия радиации в период после облучения является пересадка или инъекция селезенки и костного мозга, взятых у животных, не подвергавшихся облучению.

На основании всех этих работ напрашивается вывод о возможности ослабления физиологического поражения у млекопитающих животных, вызываемого действием ионизирующей радиации. В настоящее время проводятся работы, целью которых является ослабление поражающего действия радиации на человека.

Вместе с тем следует указать на то, что, судя по тем методам, которые применялись до сих пор, вряд ли можно добиться большего, чем увеличения LD-50 вдвое<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Хотя механизм процесса поражения биологической ткани радиацией еще не вполне ясен, можно считать, что поражение ткани имеет частично физический характер (например, разрыв или абerrация хромосом под прямым воздействием падающих частиц), а частично—химический и биохимический. В то время как поражения химического характера можно ослабить путем искусственного изменения химической среды клеток, поражения физического характера вряд ли можно заметно уменьшить.

## РАДИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ВЗРЫВОВ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

После довольно большого отступления возвратимся к рассмотрению радиологического действия ядерных взрывов большой мощности. Как уже отмечалось в начале главы, мы будем касаться здесь только соматического действия радиации, генетическое же ее действие будет рассмотрено в следующей главе.

Радиологическое действие ядерного взрыва вызывается радиоактивными веществами, являющимися продуктами взрыва<sup>1</sup>. Следует указать два источника радиоактивности:

- 1) радиоактивность продуктов деления, а также непрореагировавших остатков плутония и урана;
- 2) радиоактивность, наведенная освободившимися при взрыве нейтронами в атмосфере и на поверхности земли в результате поглощения этих нейтронов.

Ко второму источнику радиоактивности мы также относим наведенную нейтронами активность в веществах, входящих в облако взрыва. В случае взрыва, основанного полностью на синтезе, первый источник радиоактивности практически отсутствует. В случае взрыва, основанного на делении, налицо оба источника радиоактивности, однако при этом величина наведенной радиоактивности, является сравнительно малой и составляет только 1% от общей активности продуктов деления. Непрореагировавшие остатки плутония и урана при попадании внутрь организма также представляют опасность, которая оказывается незначительной по сравнению с той опасностью, которая возникает в связи с внешним облучением, вызываемым действием радиоактивной пыли.

### РАДИОАКТИВНОСТЬ, НАВЕДЕННАЯ НЕЙТРОНАМИ

Очень кратко рассмотрим второй источник радиоактивности—радиоактивность, наведенную нейтронами, испускаемыми при ядерных взрывах. При номинальном

---

<sup>1</sup> Мы уже рассмотрели раньше действие начальной ядерной радиации, то есть гамма-лучей и нейтронов, испускаемых в первую минуту после взрыва, до того как облако взрыва начинает заметно расти. Радиус поражения людей начальной ядерной радиацией значительно меньше, чем радиус разрушений, вызываемых ударной волной и световым излучением



взрыве большой мощности освобождается около 10 кг нейтронов (табл. 12). Но только небольшая часть этих нейтронов испускается облаком взрыва—всего около 10%. Наведенная нейтронами активность тщательно изучалась как в случае подводного взрыва, так и в случае подземного взрыва<sup>1</sup>. При воздушном взрыве можно с уверенностью предположить, что все нейтроны, испускаемые облаком взрыва, поглощаются азотом воздуха, в результате чего образуется углерод 14. При подводном взрыве большая часть нейтронов поглощается водородом, в результате чего образуется устойчивый тяжелый водород. Натрий и марганец, присутствующие в воде в виде примесей, под действием нейтронов уже через несколько часов после взрыва становятся основными источниками наведенной радиоактивности. Эти же элементы являются основными источниками наведенной радиоактивности при подземном взрыве.

В табл. 13 приведены значения общей активности, наведенной нейтронами, для различных промежутков времени после взрыва.

Таблица 13

Время, прошедшее с момента взрыва	Активность, наведенная нейтронами при взрыве номинальной атомной бомбы большой мощности, кюри		
	воздушный взрыв	подводный взрыв (в пресной воде)	Подземный взрыв
0	$6,4 \cdot 10^4$	$1,4 \cdot 10^9$	$2,8 \cdot 10^{12}$
1 час	$6,4 \cdot 10^4$	$5,0 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^{11}$
1 день	$6,4 \cdot 10^4$	$6,0 \cdot 10^4$	$2,8 \cdot 10^9$
1 неделя	$6,4 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^2$	$4,0 \cdot 10^8$

## ВЗРЫВЫ, ОСНОВАННЫЕ НА ДЕЛЕНИИ И СИНТЕЗЕ

В случае взрыва с тротиловым эквивалентом 20 млн. т, основанного полностью на синтезе, величина наведенной активности будет значительно больше, чем приведенная

<sup>1</sup> M a n d e v i l l e C. E., *Journal of the Franklin Institute*, 252, 297, 1951.

в табл. 11. Максимальное значение активности может быть получено в результате умножения приведенных в таблице величин на 10. Далее, конечные продукты взрыва, основанного на синтезе, являются в большинстве своем устойчивыми ядрами, поэтому будет правильным предположить, что радиоактивное заражение, создаваемое ими, будет очень незначительным.

Из табл. 13 и 14 видно, что активность продуктов деления намного больше активности, наведенной нейтронами. Это имеет место в том случае, когда период, прошедший с момента взрыва, не слишком велик, то есть не более нескольких лет. К концу этого периода активность станет незначительной. (Опасность попадания радиоактивных веществ, в частности углерода 14, внутрь организма будет рассматриваться в конце главы.)

Таблица 14

Номинальный взрыв большой мощности,  
основанный на делении

Тротиловый эквивалент . . . . .	20 млн. $m=8,4 \cdot 10^{23}$ эрг
При взрыве образуется:	.
1) продуктов деления . . . . .	1000 кг
2) нейтронов . . . . .	10 кг
Гамма-активность (в кюри)* продуктов деления спустя время $t$ (в часах) после взрыва . . . . .	$\frac{6,0 \cdot 10^{12}}{t^{1,2}} =$ $=8,2 \cdot 10^{14}$ спустя 1 мин. $=6,0 \cdot 10^{12}$ спустя 1 час $=1,3 \cdot 10^{11}$ спустя 1 день $=1,3 \cdot 10^{10}$ спустя 1 нед.
Активность стронция 90, входящего в смесь продуктов деления . . . . .	$2,8 \cdot 10^6$ кюри (5,4 мккюри на 1 км <sup>2</sup> земной поверхности)
Гамма-активность 3850 кюри на км <sup>2</sup> дает у поверхности земли мощность дозы . . . . .	1 р/день

\* 1 кюри =  $3,7 \cdot 10^{10}$  распадов в сек.

На основании всего сказанного можно прийти к общему выводу, что, во-первых, радиологическое действие взрыва, основанного полностью на синтезе, является ничтожным

по сравнению с радиологическим действием взрыва такой же мощности, основанного на делении, и, во-вторых, основным источником радиоактивного заражения в случае взрыва, основанного на делении, являются продукты деления.

## МЕСТНОЕ И ГЛОБАЛЬНОЕ ВЫПАДЕНИЕ РАДИОАКТИВНОЙ ПЫЛИ

При взрывах большой мощности, основанных на делении, образуется большое количество радиоактивных продуктов деления. Величина опасности, возникающей вследствие выпадения радиоактивных продуктов деления, зависит от того, каким образом и где они осядут. В связи с этим рассмотрим характер выпадения радиоактивной пыли при различных видах взрыва.

В предыдущей главе мы рассмотрели действие взрывов различного вида для номинальной атомной бомбы. Сейчас мы рассмотрим воздушный и наземный взрывы номинальной бомбы большой мощности, основанной на делении<sup>1</sup>.

Рассмотрим выпадение радиоактивных продуктов деления в случае воздушного взрыва.

При воздушном взрыве огненный шар не касается поверхности земли (диаметр огненного шара в этом случае равен примерно 5 км), поэтому в него всасывается потоками воздуха сравнительно небольшое количество

---

<sup>1</sup> В предыдущей главе делались ссылки на подземный взрыв атомной бомбы. В случае глубокого подземного взрыва, тротиловый эквивалент которого измеряется несколькими миллионами тонн, выделяется энергия, которую можно сравнить с энергией, выделяющейся при сильных землетрясениях. Разрушения будут такого же характера и размера, как и при сильном землетрясении. Следует отметить, что в отличие от подземного взрыва при наземном взрыве энергия, идущая на образование сейсмических волн, составляет только небольшую часть общей энергии. Так, например, подсчитано, что при взрыве в Оппау 21 сентября 1924 года, вызванном детонацией 4000 т нитрата аммония, на образование сейсмических волн ушло 0,1% общей энергии. В случае подземного, а также глубокого подводного взрывов продукты деления попадают в атмосферу только в незначительном количестве. Поэтому выпадение их на землю происходит только в районе взрыва (или воронки при подземном взрыве), и опасность радиоактивного заражения имеет сравнительно меньшее значение, чем разрушительное действие воздушной ударной волны.

материала с поверхности земли. Продукты деления под действием огромной силы взрыва и высоких температур распыляются на чрезвычайно малые частицы и переходят в газообразное состояние. Они уносятся в высокие слои атмосферы, где вследствие своих ничтожно малых размеров (диаметр этих частиц равен нескольким микронам, микрону и меньше) они могут оставаться в течение нескольких лет и даже десятков лет. Оседание радиоактивных частиц на землю происходит очень медленно. В течение этого процесса оседания частицы разносятся ветром на большие расстояния, в результате чего они оседают более или менее равномерно на всей поверхности земного шара. Такое выпадение радиоактивных продуктов деления называется *глобальным*.

Совершенно иной характер носит выпадение продуктов деления при наземном взрыве. В этом случае значительная часть огненного шара соприкасается с землей, в результате чего образуется огромная воронка диаметром 1,5 км и больше, из которой выбрасывается вверх и всасывается огненным шаром примерно от 10 до 100 млн. *т* обращенных в пар размельченного грунта и обломков<sup>1</sup>. Огненный шар быстро поднимается вверх, расширяясь и охлаждаясь. Диаметр его достигает 5 км. Сильные восходящие потоки воздуха также несут с собой поднятую с земли размельченную пыль и обломки. Спустя несколько минут облако взрыва достигает тропопавзы на высоте 9—12 км. Здесь инверсионный слой воздуха значительно снижает скорость

---

<sup>1</sup> В результате взрыва с тротильным эквивалентом 5 млн. *т*, произведенного в Энвистокке в ноябре 1952 года, был полностью уничтожен небольшой остров (Элугелаб). Диаметр образовавшейся воронки был равен 1,5 км, а глубина ее—52 м. Объем воронки составлял  $\frac{1}{20}$  км<sup>3</sup>, вес выброшенной взрывом земли—50 млн. *т*. Диаметр огненного шара при взрыве был равен 5,6 км. Высота ножки облака взрыва—40 км. Облако взрыва, образовавшееся на высоте 16 км, имело протяжение более 160 км.

Диаметр воронки ядерного взрыва можно приблизительно определить по формуле, применяемой для обычных бомб: Диаметр воронки (в футах) =  $2 \times (\text{энергия взрыва в футах TNT})^{1/3}$ .

В качестве сравнения со взрывами большой мощности можно привести огромное извержение вулкана Кракатоа в августе 1883 года. В результате извержения было выброшено в воздух огромное количество лавы и пепла—примерно от 100 млн. *т* до 20 000 млн. *т*. Было определено, что около  $\frac{1}{3}$  выброшенного материала упала в радиусе до 50 км,  $\frac{1}{3}$ —в радиусе 3000 км, а остальная часть осталась в воздухе в течение почти 3 лет.

его подъема. Облако расширяется в стороны, принимая грибовидную форму. Диаметр облака, имеющего вид «шапки» гриба, достигает 160 км, а диаметр «ножки» равен диаметру, который имел огненный шар—5 км. Центральная часть облака продолжает подниматься вверх и достигает уже через 10 мин. высоты 24—27 км. Однако вследствие повышения температуры воздуха с увеличением высоты в верхних слоях стратосферы облако почти не поднимается выше 32 км. Продукты деления конденсируются и оседают на частицах пыли, которые в большом количестве содержатся в облаке взрыва. Это огромное количество радиоактивной пыли рано или поздно должно осесть на поверхность земли.

Мы уже говорили о тропопаузе. Слой атмосферы, находящийся над тропопаузой, называется стратосферой. Высота тропопаузы около 15 км в тропических широтах и 8 км в умеренных. Все явления погоды, например ветер, шторм, образование облачности, дождь и др., происходят в тропосфере. В стратосфере течение воздуха является постоянным и ничем не нарушается. Температура в атмосфере (если не учитывать самых низких слоев, прилегающих к поверхности земли) с увеличением высоты до уровня тропопаузы, как правило, понижается. На уровне тропопаузы температура с увеличением высоты начинает резко повышаться, то есть происходит температурная инверсия. На некотором расстоянии над тропопаузой температура достигает значения —50°С и остается постоянной в слое высотой около 30 км, выше которого опять происходит ее повышение. Температурная инверсия на уровне тропопаузы задерживает движение восходящих потоков воздуха. Таким образом, если конвекционный поток не обладает достаточно большой мощностью, он не может проникнуть в стратосферу. Частицы пыли, поднимающиеся вместе с конвекционным потоком, остаются в слое тропопаузы и затем рано или поздно оседают на землю. Скорость оседания частицы в спокойном воздухе зависит от ее размеров. Для сравнительно крупных частиц (с диаметром  $d$  от 1 мм и больше) скорость оседания пропорциональна  $\sqrt{d}$ ; для частиц меньших размеров (с диаметром менее 1 мм), которые подчиняются действию закона Стокса, скорость оседания прямо пропорциональна  $d^2$ . Частица с диаметром 100 мк пройдет слой воздуха высотой 12 км за 4 часа, тогда как частице с диаметром

10 мк для прохождения слоя такой же высоты требуется 2 недели. При оседании частиц, имеющих диаметр менее 5—10 мк, сила тяжести имеет очень небольшое значение. Частицы таких размеров оседают на землю в результате различных процессов, происходящих в атмосфере. Наиболее эффективным из этих процессов является дождь, который одинаково действует как на большие, так и на малые частицы. Количество дождевых осадков, равное 2,5 мм, является достаточным для того, чтобы очистить атмосферу практически от всей имеющейся в ней радиоактивной пыли. Это явление иногда называют «промыванием» атмосферы<sup>1</sup>.

Представляет интерес тот факт, что распределение частиц в зависимости от их размеров, изучавшееся после атомного взрыва в Аламогордо (испытание «Тринити»), примерно соответствует распределению частиц в облаке пыли над пустыней Сахара. В табл. 15, взятой из руководства «The Effects of Atomic Weapons», 1950, приводятся размеры частиц в атомном облаке. Таблица основана на том предположении, что распределение частиц в обоих указанных случаях одинаково. Высота облака берется равной 12 000 м. Цифры в последней колонке учитывают только 50% пыли, остальные 50% составляют частицы очень малых размеров, которые остаются в атмосфере в течение длительного времени.

Приведенное выше краткое описание строения атмосферы позволяет лучше уяснить различие между характером выпадения радиоактивной пыли при ядерных взрывах различного вида. В случае взрыва большой мощности под действием огромной силы взрыва и большого количества выделяющейся тепловой энергии значительная часть быстро поднимающегося облака взрыва (центральная его часть) проходит через тропопаузу и поднимается на довольно большую высоту непосредственно в страто-

---

<sup>1</sup> Недавно проводившиеся работы по изучению столкновений водяных капель показали, что поток воздуха, образующийся вокруг падающей капли, способствует захватыванию частиц пыли и других капель, находящихся в воздухе. Захватывание происходит в потоке, поперечное сечение которого в 100 раз больше поперечного сечения капли, а высота равна 40 диаметрам капли. Этот процесс является очень эффективным процессом формирования больших капель из малых. Представляет интерес описание метеорологических явлений, связанных с ядерными взрывами, помещенное в журнале «*Meteorology and Atomic Energy*», USAEC, 1955.

**Распределение по размерам радиоактивной пыли,  
оседающей из атомного облака на землю**

Время после взрыва, мин.	Диаметр частиц пыли, мк	Количество осе- дающей пыли, %
0—22	840	3,8
22—42	840—250	12,6
42—117	250—150	14,5
117—480	150—75	18,1

сферу. Сравнительно большие частицы вскоре опять возвращаются в тропопаузу, а частицы малых размеров, имеющие диаметр 1 мк и меньше, остаются в стратосфере длительное время, в среднем около 10 лет. Часть продуктов деления, которая уходит в стратосферу, оседает на землю с очень малой скоростью. Так как процесс диффузии и перемешивания в этом случае происходит в течение длительного времени, оседание радиоактивной пыли будет происходить равномерно и почти с одинаковой скоростью на всей поверхности земли. Такое выпадение радиоактивной пыли называется *глобальным*<sup>1</sup>.

Перейдем теперь к той части облака взрыва, которая остается в тропосфере. Частицы сравнительно большого размера, имеющие диаметр от 10 до 500 мк, оседают на землю спустя несколько часов или дней после взрыва. Этот вид выпадения радиоактивной пыли называется *местным* (или *локальным*). Частицы меньших размеров остаются в тропосфере в течение примерно двух недель. За это время радиоактивное облако взрыва успевает 2—3 раза обойти вокруг земного шара, причем обычно оно движется с запада на восток, по всей вероятности, вследствие постоянного направления движения воздушных масс. Вследствие такого движения облака выпадение радиоактивной пыли происходит вдоль довольно широкого пояса вокруг земли, идущего параллельно широте места

<sup>1</sup> Либби, основываясь на проводившихся измерениях глобального выпадения радиоактивной пыли в результате взрывов большой мощности, считает, что почти 50% продуктов деления выпадает именно таким путем.

взрыва. Такой вид выпадения радиоактивной пыли называется *кольцевым* (или *полуглобальным*). В этом случае выпадение радиоактивных продуктов деления является более интенсивным в районе взрыва и менее интенсивным в отдаленных от взрыва районах. Частицы пыли в тропосфере остаются в среднем одну-две недели. В умеренных широтах они, как правило, оседают вместе с дождями, которые, как мы уже говорили, наиболее эффективно «промывают» атмосферу от радиоактивной пыли, осаждая ее на землю.

Все то, о чем мы говорили выше, относится к взрывам большой мощности. В случае атомных взрывов, например взрыва номинальной атомной бомбы, облако взрыва не сможет подняться выше тропопаузы. Поэтому выпадение радиоактивной пыли при атомном взрыве будет только местным (локальным) и кольцевым. Глобального же выпадения происходить не будет.

В табл. 16 приводятся различные виды выпадения радиоактивной пыли и качественная характеристика сравнительного распределения продуктов деления.

В войне, в которой будет применяться оружие большой мощности, основанное на делении, наибольшую опасность будет представлять, как мы увидим дальше, местное выпадение радиоактивной пыли<sup>1</sup>.

Характер местного выпадения радиоактивной пыли в случае наземного взрыва зависит от ряда сложных факторов, из которых наиболее важными являются распределение частиц по размерам в облаке взрыва и метеорологические условия.

Распределение частиц по размерам зависит в некоторой степени от того, в какой мере огненный шар соприкасается с поверхностью земли, а также от состава грунта. Количество материала, всасываемого в огненный шар, и сам процесс выпадения радиоактивной пыли во многом отличаются при взрыве над водой и при взрыве над землей.

---

<sup>1</sup> В мирное время, когда испытания ядерного оружия проводятся на специальных полигонах (например, на изолированных островах или в других местах, удаленных от населенных районов) и когда соблюдаются все возможные меры предосторожности, местное выпадение радиоактивной пыли почти не представляет опасности. Однако остаются еще два вида выпадения продуктов деления — глобальное и кольцевое. О них речь будет идти в конце данной главы и в следующей главе.



# Виды выпадения радиоактивной пыли в результате ядерных взрывов

	Местное	Кольцевое (полуглобальное)	Глобальное
Часть земной поверхности, на которой происходит выпадение радиоактивной пыли	Район взрыва	Пояс вокруг земного шара на широте места взрыва	Вся поверхность земли
Длительность выпадения радиоактивной пыли	От нескольких часов до нескольких дней	Несколько недель	Около 10 лет
Сравнительное распределение радиоактивной пыли (качественная характеристика):			
а) воздушный взрыв	$\sim 1/10$	$1/3$	$2/3$
б) наземный атомный взрыв (в тыс. т)	$2/3$	$1/3$	Ничтожно малое
в) наземный взрыв большой мощности (в млн. т)	$1/4$	$1/4$	$1/2$

Кроме того, характер грунта, соприкасающегося с огненным шаром (будет ли это вода, коралловые образования, гранит или песок), определяет степень растворимости радиоактивной пыли в воде. Это имеет значение с точки зрения прямой ассимиляции выпадающих радиоактивных веществ растениями и попадания этих веществ в организм животных через кожу. Степень растворимости радиоактивной пыли в воде имеет значение также с точки зрения принятия необходимых мер по дезактивации зараженных

районов и санитарной обработке лиц, подвергшихся действию радиоактивной пыли.

Наиболее важными метеорологическими факторами, которые определяют характер и размеры местного выпадения радиоактивной пыли, являются направление и сила господствующих в районе взрыва ветров. Необходимо отметить, что характер выпадения радиоактивной пыли определяется не тем ветром, который дует у поверхности земли, а средним суммарным ветром для слоя воздуха, начиная с высоты примерно 1 км и кончая 30 км. Поскольку на характер выпадения радиоактивной пыли влияет ветер на всех высотах и поскольку этот ветер постоянно меняет свое направление и силу, очень трудно дать долгосрочный и даже краткосрочный прогноз характера выпадения радиоактивной пыли. При средних условиях площадь района заражения при местном выпадении радиоактивной пыли прямо пропорциональна общему количеству продуктов деления, образуемому при взрыве, или, другими словами, количеству энергии, выделяемому при взрыве.

Радиологическое действие номинального взрыва большой мощности, основанного на делении, в тысячу раз больше, чем радиологическое действие номинального атомного взрыва. В то же время площадь района разрушений, вызванных действием ударной волны при взрыве большой мощности, только в 100 раз больше. Таким образом, бомба большой мощности, основанная на делении, является по преимуществу радиологическим оружием.

### ПЛОЩАДЬ РАЙОНА ЗАРАЖЕНИЯ ПРИ МЕСТНОМ ВПАДЕНИИ РАДИОАКТИВНОЙ ПЫЛИ

При номинальном взрыве большой мощности, основанном на делении, образуется 1000 кг продуктов деления. В качестве основы для расчетов предположим, что  $1/4$  всех продуктов деления оседает в районе взрыва (местное выпадение) и что оседание этих продуктов деления происходит в среднем за 8 час. Обозначим через  $R$  дозу гамма-излучения, получаемую человеком, находящимся на открытой местности в районе, зараженном выпавшей радиоактивной пылью, в течение периода от начала выпадения на землю радиоактивной пыли (8 час. после взрыва) до момента  $(8+t)$  часов. Тогда, обозначив через  $A$  площадь района выпадения радиоактивной пыли, из табл. 17 мы

получим величины произведения  $RA$  при различных значениях  $t$ .

Таблица 17

$t$	$RA \left( \frac{p}{10^6}, \text{ км}^2 \right)^*$
0 . . . . .	0
1 день . . . . .	13,0
2 дня . . . . .	17,5
1 нед. . . . .	25,3
1 мес. . . . .	32,0
Бесконечность . . . . .	54,0

\* Площадь  $A$ —в  $\text{км}^2$ , а доза  $R$ —в  $p$ .

Приведенные в таблице величины доз относятся к тому случаю, когда человек находится в районе, зараженном радиоактивной пылью, вне укрытия. Если же человек будет находиться в здании, он получит меньшую дозу, ввиду того что часть гамма-лучей будет поглощена при прохождении преграды, в данном случае стен здания. Коэффициент уменьшения дозы определяется отношением дозы излучения, получаемой человеком, находящимся в укрытии, к той дозе излучения, которую он получил бы, находясь вне укрытия, при прочих равных условиях. Значения коэффициента уменьшения дозы при нахождении человека за различными преградами приведены в табл. 18.

Из табл. 17 мы видим, что в районе выпадения радиоактивной пыли, площадь которого равна примерно 26 тыс.  $\text{км}^2$  (что является вполне реальным), средняя доза излучения, получаемая человеком в течение двух дней, составляет 670  $p$ . Если площадь района выпадения будет в 10 раз больше, то соответствующая доза составит  $1/10$  указанной, то есть 67  $p$ . Однако даже она является опасной, тем более что она будет той средней дозой, которую получит каждый человек в огромном районе площадью 260 тыс.<sup>1</sup>  $\text{км}^2$ . Площадь 260 тыс.  $\text{км}^2$  является, по всей вероятности, верхним пределом площади радиоактивного заражения, вызван-

<sup>1</sup> Доза излучения, равная 70  $p$ , оказывает серьезное генетическое действие (гл. VI).

Человек находится:

Коэффициент  
уменьшения  
дозы \*

За слоем бетона толщиной 7,5 см (или эквивалентным ему слоем кирпичной кладки или грунта)	$1/2$
За слоем бетона толщиной 15 см (или эквивалентным ему слоем кирпичной кладки или грунта)	$1/4$
За слоем бетона толщиной 22,5 см (или эквивалентным ему слоем кирпичной кладки или грунта)	$1/10$
За слоем бетона толщиной 30 см (или эквивалентным ему слоем кирпичной кладки или грунта)	$1/20$
На первом этаже двухэтажного дома (учитывается толщина перекрытий и расстояние между ними)	$1/40$
В траншее с верхним земляным перекрытием толщиной 30 см . . . . .	$1/100$
В подвальном убежище . . . . .	$1/200 - 1/300$
В траншее с верхним земляным перекрытием толщиной 90 см . . . . .	$1/300$ и менее
(30 см бетона = 38 см кирпичной кладки, 46 см грунта)	

\* «Nuclear Weapons» (Manual of Civil Defence, vol. 1, Pamphlet № 1) E.M.S.O., 1955.

ного местным выпадением радиоактивной пыли после взрыва номинальной бомбы большой мощности. Действительная площадь опасного заражения, вызванного местным выпадением радиоактивной пыли, зависит, как мы уже говорили, от метеорологических условий и многих других факторов, но при «обычном» стратегическом ударе она будет скорее равна 260 тыс. км<sup>2</sup>, чем 26 тыс. км<sup>2</sup>.

Из сказанного очевидно, что бомба большой мощности, основанная на делении, является по преимуществу радиологическим оружием. Ударная волна, образующаяся при взрыве одной бомбы большой мощности, может уничтожить самый крупный город, а радиологическое действие такого взрыва может привести к опустошению района, равного по площади самому крупному штату Индии. 260 тыс. км<sup>2</sup>—это площадь, которая составляет около  $1/500$  общей площади, занимаемой сушей на земном шаре.

## ВЗРЫВ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ, ПРОИЗВЕДЕННЫЙ 1 МАРТА 1954 ГОДА

1 марта 1954 года во время испытаний ядерного оружия, проводившихся США на атолле Бикини (в центральной части Тихого океана), был произведен взрыв «мощного термоядерного устройства», пазванного так в сообщении комиссии по атомной энергии США. Выделившаяся при взрыве энергия, эквивалентная энергии 15 млн. *t* тротила, была практически вся получена в результате деления урана 238. В главе II уже упоминалось о том, что после взрыва в результате местного выпадения радиоактивной пыли заражению подверглось японское рыболовное судно «Фукурюмару» («Счастливый дракон»), которое находилось в то время на расстоянии 145 км восточнее места взрыва<sup>1</sup>.

Выпадение на судно серовато-белой пыли началось через 3 часа 30 мин. после взрыва и продолжалось в течение 4 час. Количество пыли, осевшей на судно, примерно составляло 50 г на 1 м<sup>2</sup> поверхности судна. (Определение производилось экспериментальным путем в присутствии пострадавших рыбаков. «Выпадение» радиоактивной пыли воспроизводилось с помощью распыленного кораллового рифа.) Наиболее крупные частицы пыли имели размеры от 0,1 до 0,5 мм. При исследовании этих частиц с помощью микроскопа было обнаружено, что они состоят из мелких частиц кубической и продолговатой формы, имеющих размер менее 1 мк. Изучение японскими учеными с помощью электронной дифракции пыли, выпавшей на «Фукурюмару», показало, что в результате выделившегося при взрыве жара коралловый риф испарился, а затем при охлаждении паров произошла кристаллизация с образованием кальцита, включавшего или абсорбировавшего радиоактивные продукты деления, образовавшиеся при взрыве. Изучение поляризации световых лучей в верхних слоях

---

<sup>1</sup> Район, объявленный опасным при проведении испытаний, был ограничен следующими координатами: N 10°15'—12°45' и E 160°35'—166°16'. Таким образом, площадь опасного района составляла около 130 тыс. км<sup>2</sup>. Рыболовное судно «Фукурюмару» в момент взрыва (3 часа 40 мин.) находилось на расстоянии 130—140 км к востоку от Бикини. Его координаты в этот момент были: N 11°53' и E 166°58'. При следующих взрывах (19 марта и 22 мая) опасный район был увеличен и представлял собой примерно полуокружность радиусом 720 км. Площадь этого района составляла около 780 тыс. км<sup>2</sup>.

атмосферы, проводившееся в Токио в августе 1954 года, показало, что в верхних слоях атмосферы присутствуют частицы пыли размером от 0,8 до 1  $\text{мк}^1$ .

Измерения скорости распада радиоактивных веществ, содержащихся в пыли, выпавшей на «Фукурюмару», показало, что в момент выпадения радиоактивной пыли на судно ее активность была равна 1 *кюри* на 1 г пыли. Поскольку активность 1 г продуктов деления через 3 часа после взрыва равна примерно 2 млн. *кюри*<sup>2</sup>, то можно заключить, что радиоактивные продукты деления (весащие 1000 кг) распределились в 2 млн. *т* коралловой пыли. Общий вес втянутой в огненный шар пыли и грунта был, по всей вероятности, равен 10—100 млн. *т*, однако большая часть этой поднятой в воздух массы грунта упала непосредственно в районе эпицентра, не успев перемешаться с продуктами взрыва.

Напомним еще раз, что интенсивность выпадения радиоактивной пыли на «Фукурюмару» равнялась 50 г/ $\text{м}^2$ . Это означает, что после выпадения пыли на судно радиоактивное заражение поверхности судна составляло 50 *кюри* на  $\text{м}^2$ . Суммарная доза, которую получил бы незащищенный человек, находясь на судне 2 недели, была бы равна 6000 *р*. Эта доза является смертельной для 100% подвергшихся облучению. Однако в рассматриваемом случае с японскими рыбаками эта доза явно является слишком большой, поскольку необходимо учесть, что радиоактивная пыль смывалась с судна водой, что действительная интенсивность выпадения пыли была, по всей вероятности, в три раза меньше предполагаемой и что рыбаки были частично защищены. Все это говорит о том, что полученная рыбаками доза излучения значительно меньше той, которая могла бы быть получена ими при самых неблагоприятных условиях. В действительности суммарная доза, полученная рыбаками за 13 дней, которые они находились в пути, не может быть выше нескольких сотен рентгенов, так как все 23 рыбака, за исключением одного<sup>3</sup>, выжили.

---

<sup>1</sup> Nishiwaki Y., *Atomic Scientists Journal*, 4, 279, 1955. В статье содержится обзор работы японских ученых по изучению последствий экспериментальных взрывов, в частности действия радиоактивной пыли, выпавшей на «Фукурюмару».

<sup>2</sup> См. табл. 7.

<sup>3</sup> См. сноску на стр. 22 (гл. 1).

Можно привести здесь еще один пример поражающего действия радиоактивной пыли, выпавшей после взрыва 1 марта 1954 года. Действию радиоактивной пыли подверглись 28 американских военнослужащих и 239 жителей Маршалловых островов. Полученные ими дозы лежат в пределах от 15 до 175 *р*. В группе жителей Маршалловых островов, насчитывающей 64 человека, которая получила дозу излучения, равную 175 *р*, смертных случаев не наблюдалось. Однако через 2 недели после облучения у 90% пострадавших отмечались поражения кожного покрова и эпиляция (выпадение волос). Через год после облучения почти все пострадавшие чувствовали себя вполне здоровыми<sup>1,2</sup>.

Первое официальное сообщение о характере выпадения радиоактивной пыли после взрыва 1 марта 1954 года было сделано комиссией по атомной энергии США 15 февраля 1955 года. Характер выпадения радиоактивной пыли после этого взрыва изображен графически на схеме (стр. 124), которая составлена на основе данных, опубликованных комиссией по атомной энергии США, в указанном сообщении. Район выпадения радиоактивной пыли имеет сигарообразную (овальную) форму, причем площадь опасного заражения равна 18 тыс. км<sup>2</sup>. Человек, находящийся в этом районе вне укрытия в течение 36 час., получит в среднем дозу, равную примерно 1000 *р*, при условии, что выпадение пыли начнется спустя 8 час. после взрыва. На диаграмме (см. стр. 122) показаны радиусы районов поражения ударной волной, световым излучением и длина района радиоактивного заражения (имеющего овальную форму) для взрыва номинальной бомбы большой мощности. Для сравнения рядом приводятся соответствующие радиусы районов поражения для взрыва номинальной атомной бомбы. При изучении сравнительных данных с совершенной очевидностью вытекает один вывод: оружие большой мощности является в основном радиологическим. Площадь опасного радиоактивного заражения при взрыве большой мощности очень велика. В случае взрыва 1 марта

<sup>1</sup> Cronkite E. P. et al., *Journal of the American Medical Association*, 159, 430, 1955.

<sup>2</sup> Следует отметить, что самая большая доза, которая была получена за время проведения ядерных испытаний в США (за пределами полигона в Неваде), составляет для отдельных лиц, подвергшихся облучению (всего 15 человек), 7 *р*, а для группы лиц (около 200 человек)—4 *р*.

1954 года она была равна 18 тыс. км<sup>2</sup>. Однако, как уже указывалось выше, форма и площадь района местного выпадения радиоактивной пыли в большой степени зависит от метеорологических условий, в частности от скорости ветра в слое воздуха над поверхностью земли высотой примерно около 30 км. Если грубо предположить, что при местном выпадении радиоактивной пыли частица оседает на землю из верхних слоев атмосферы за 8 час. (частица, имеющая диаметр 0,1 мм, оседает за 8 час. на землю с высоты 21 км), то при средней скорости ветра 48 км/час она будет отнесена от места взрыва на расстояние до 380 км. Подобное явление наблюдалось при взрыве 1 марта 1954 года.

Таким образом, во время войны, для того чтобы увеличить площадь района радиоактивного заражения при нанесении противнику атомного удара, необходимо выбирать такое время атомного удара, когда скорость ветра является сравнительно большой. При этом следует учитывать скорость ветра не у поверхности земли, а среднюю скорость ветра для высоты от 3 до 30 км. В условиях ведения войны с применением ядерного оружия следует исходить из того, что, как правило, площадь радиоактивного заражения будет максимальной, то есть равна 260 тыс. км<sup>2</sup><sup>1</sup>.

Доза излучения, которую получают все находящиеся в районе выпадения радиоактивной пыли, может привести к серьезным последствиям, поэтому необходимо в течение первого же дня после взрыва эвакуировать из района, в котором произошло выпадение радиоактивной пыли, всех оставшихся в живых. Однако осуществить практически эвакуацию населения, подвергнувшегося воздействию ударной волны, светового излучения и сильнейшей радиации, из района, площадь которого равна 260 тыс. км<sup>2</sup>, вряд ли сможет даже высокоразвитая в техническом отношении страна. Кроме того, в условиях войны едва ли найдется безопасный район, где можно было бы найти убежище для такой огромной массы людей.

---

<sup>1</sup> При проведении испытаний ядерного оружия в мирное время обычно выбирают такие метеорологические условия, при которых район радиоактивного заражения будет минимальным. Во время войны будут стремиться к тому, чтобы при нанесении атомного удара увеличить район радиоактивного заражения до максимального.



15 июня 1955 года в США в масштабе всей страны проводились учения гражданской обороны под названием «Алерт» («Тревога». — *Ред.*). По программе учений предполагалось, что 60 городов США подверглись атомному нападению. На эти города условно была сброшена 61 бомба. Бомбы были различных видов, начиная от номинальной атомной бомбы и кончая бомбой большой мощности с тротильным эквивалентом 5 млн. т. Предупреждение населения об атомном нападении было сделано примерно за 3 часа. На основе данных, собранных группой оценки ущерба, организованной при Федеральном управлении гражданской обороны, было подсчитано, что к концу первого дня атомного нападения погибло более 8 млн. человек и спустя несколько недель после нападения умерло еще 8 млн. человек. Около четверти всех погибших умерло от действия радиоактивной пыли. Согласно подсчетам, в результате атомного нападения было уничтожено также более 11 млн. жилищ, вследствие чего около 25 млн. человек осталось без крова. Только в одном Нью-Йорке при наземном взрыве бомбы с тротильным эквивалентом 5 млн. т условно погибло почти 3 млн. человек, или 38% всего населения города. Раненых в результате взрыва оказалось 23%. Таким образом, из каждых 8 жителей Нью-Йорка 3 человека оказались убитыми и 2—ранеными.

На основе проведенных учений работники гражданской обороны сделали вывод, что США еще отнюдь не в состоянии выдержать нападение противника с применением ядерного оружия<sup>1,2</sup>.

<sup>1</sup> «Report on Operation ALERT»; «*New York Times*», June 18, 1955.

<sup>2</sup> Начальник управления армии США по научно-исследовательским работам и разработкам новых видов вооружения генерал-лейтенант Джэмс Гэвин, выступая на заседании сенатской подкомиссии по изучению сравнительной мощи ВВС, заявил, что в случае ядерной войны в Центральной Европе «погибнет несколько сот миллионов человек, причем пострадает главным образом та страна, в направлении которой будет дуть ветер. Если ветер будет дуть на юго-восток, то пострадает в основном Советский Союз, а также Япония и, возможно, даже район Филиппинских островов. Если же направление ветра будет обратным, то пострадает Западная Европа» (*Hindustan Times*, June 30, 1956).

## ГЛОБАЛЬНОЕ ВЫПАДЕНИЕ РАДИОАКТИВНОЙ ПЫЛИ И ЕГО РАДИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ

Мы до сих пор рассматривали опасность, связанную с местным выпадением радиоактивной пыли, которое является важнейшим поражающим фактором в условиях ядерной войны. Поражающее действие радиоактивной пыли в случае местного ее выпадения является сравнительно кратковременным: развитие лучевой болезни, которая может закончиться смертью, длится несколько недель или месяцев. Во время войны такое кратковременное действие радиоактивной пыли будет представлять основную опасность, в то время как последствия, которые проявляются через десятки лет после облучения, будут иметь второстепенное значение<sup>1</sup>.

Совершенно иначе мы будем рассматривать опасность, связанную с проведением испытаний ядерного оружия в мирное время. В этом случае испытания проводятся в районах, удаленных от основных населенных центров, причем условия, в которых они проводятся, обеспечивают лишь минимальную опасность для населения, исключая возможность поражения людей (за редкими единичными случаями) радиоактивной пылью<sup>2</sup>. В то же время при проведении испытаний ядерного оружия всегда существует опасность облучения всего населения земного шара в результате глобального выпадения радиоактивной пыли, которое тесно связано с ядерными взрывами. *Глобальное выпадение радиоактивной пыли присуще всем ядерным взрывам, особенно взрывам большой мощности, и его нельзя избежать*<sup>3</sup>.

Так как в случае глобального выпадения радиоактивной пыли мощность дозы облучения очень мала, то поражающее действие этой пыли сказывается в основном спустя длительное время после облучения. Действие же радиоактивной пыли в этом случае в течение ближайшего времени

---

<sup>1</sup> Опасность отдаленных последствий облучения, связанная с глобальным выпадением радиоактивной пыли, относится также и к местному выпадению радиоактивной пыли (гл. VI).

<sup>2</sup> Часто проведение испытательных взрывов переносится на другое время, если метеорологические условия меняются и возникает опасность неблагоприятных условий для производства взрыва.

<sup>3</sup> Это означает, что испытания ядерного оружия нельзя держать в секрете, они всегда будут обнаружены. Это обстоятельство является очень важным.

после облучения настолько ничтожно, что им можно пренебречь.

Отдаленные последствия облучения при глобальном выпадении радиоактивной пыли следует рассматривать в двух вариантах действия: 1) при внешнем облучении организма, 2) при попадании радиоактивной пыли внутрь организма.

При внешнем облучении население получает определенную дозу гамма-излучения, испускаемого радиоактивной пылью. Доза, получаемая в результате глобального выпадения радиоактивной пыли после ядерных испытаний, настолько мала, что ее соматическое действие можно совсем не учитывать. В то же время генетическое ее действие является довольно значительным и даже опасным. Об этом речь будет идти в следующей главе. Здесь же мы коснемся вопроса о величине той дозы гамма-излучения, которую уже получило население земного шара в результате проводившихся испытаний ядерного оружия.

### ПОПАДАНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ ВНУТРЬ ОРГАНИЗМА

Радиоактивные вещества, содержащиеся в радиоактивной пыли, могут попасть внутрь организма. В дальнейшем мы увидим, что единственным элементом, который представляет серьезную опасность для организма, является радиоактивный стронций, причем действие его является соматическим, а не генетическим. Попадая в организм вместе с кальцием, содержащимся в продуктах питания, он осаждается в костных тканях. Радиоактивный стронций<sup>1</sup> представляет собой смесь двух радиоактивных изо-

<sup>1</sup> Содержание природного стронция в почве равно 0,01%. Природный стронций имеет следующий состав: стронций 88 (82,56%), стронций 87 (7,02%), стронций 86 (9,86%) и стронций 84 (0,56%). Поскольку стронций 89 и стронций 90 являются неустойчивыми изотопами и имеют малые периоды полураспада, они не входят в состав природного стронция. Период полураспада стронция 89 равен 53 дням, а стронция 90—28 годам. При ядерном взрыве образуется одинаковое количество радиоактивных изотопов стронция 89 и стронция 90. Но так как период полураспада стронция 89 относительно мал, основную опасность представляет стронций 90. Если сразу после взрыва в продуктах деления они находятся в одинаковых количествах, то уже спустя 1 год после взрыва количество стронция 90 будет в 115 раз больше, а спустя 2 года—в  $1,3 \cdot 10^4$  раз больше, чем стронция 89. Для более продолжительного времени можно считать, что стронций 89 практически отсутствует.

топов—стронция 89 и 90. Он испускает бета-частицы (гамма-излучения нет)<sup>1</sup>.

Радиоактивные вещества могут попасть в организм следующими путями:

- 1) при вдыхании вместе с зараженным воздухом;
- 2) при заглатывании вместе с зараженной пищей;
- 3) при заражении ими открытых ран, порезов или при прямом поглощении кожей тела.

Применительно к обычным условиям, в которых находится человек, можно считать, что наиболее тщательного рассмотрения заслуживает случай, когда радиоактивные вещества попадают в организм при заглатывании их вместе с пищей.

Соблюдая необходимые меры предосторожности, можно избежать попадания радиоактивных веществ в организм через раны или через кожу. Что же касается вдыхания их вместе с воздухом, то из проводившихся над животными опытов известно, что частицы пыли размером менее 0,5 мк ведут себя точно так же, как молекулы газа, то есть при вдохе попадают вместе с воздухом в легкие и опять же вместе с воздухом выходят из легких при выдохе. Частицы более 5 мк почти все задерживаются в носовой полости. Таким образом, только небольшая часть частиц определенного размера задерживается в легких. Поэтому можно считать, что в результате вдыхания в организм не может попасть сколько-нибудь значительного количества радиоактивных веществ.

### **МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАДИОАКТИВНОГО ВЕЩЕСТВА В ОРГАНИЗМЕ**

При оценке опасности, которая возникает в связи с попаданием радиоактивного вещества в организм, необходимо исходить из максимально допустимого количества радиоактивного вещества для организма. Обозначим это количество через  $q$ . Таким образом  $q$ —это такое количество радиоактивного вещества, которое может содержаться

---

<sup>1</sup> Ввиду очень незначительной длины пробега бета-частиц, испускаемых радиоактивным стронцием, находящимся в костях, они не достигают половых органов. Поэтому радиоактивный стронций в организме не оказывает генетического действия.

в организме в течение длительного времени, не оказывая вредного действия на организм или не вызывая сколько-нибудь заметного поражения в организме человека в течение его жизни.

При определении величины  $q$  обычно берется коэффициент безопасности, равный 10. Таким образом, с точки зрения вероятности поражения доза  $10 q$  не будет оказывать на организм заметного действия, при дозе  $20-30 q$  вероятность поражения возрастает до ощутимой, а для дозы  $30-40 q$  вероятность поражения становится большой. Так как биологическое действие радиоактивного вещества зависит от его активности, величина максимально допустимого содержания радиоактивного вещества в организме выражается в *кюри* (или *мккюри*), а не в единицах веса—граммах. Международная комиссия по защите от радиоактивного излучения установила в 1954 году для целого ряда радиоактивных веществ величину максимально допустимого содержания их в организме. Величины  $q$  для различных радиоактивных веществ очень отличаются. Это объясняется тем, что одни радиоактивные вещества, попадая в организм, распределяются в нем более или менее равномерно, а другие концентрируются в некоторых важных внутренних органах или даже в одном органе<sup>1</sup>. Международная комиссия по защите от радиоактивного излучения установила также величины максимально допустимой концентрации радиоактивных веществ в воздухе и воде. При этом в качестве допустимой концентрации радиоактивного вещества было взято такое количество данного радиоактивного вещества, содержащееся в воздухе или в воде, которое при употреблении человеком воды или воздуха, зараженных этим количеством радиоактивного вещества в течение длительного периода (даже в продолжение всей жизни), накопится в организме в таком количестве, что средняя доза облучения организма в неделю будет равна  $0,3 \text{ бэр}$ .

Величины максимально допустимой концентрации для

---

<sup>1</sup> Например, величина  $q$  для хлора 36 (источник бета-излучения), который равномерно распределяется в организме, равна  $230 \text{ мккюри}$ , для трития (третиевая вода НТО)  $q=10\,000 \text{ мккюри}$ . С другой стороны, для радия (источник альфа-излучения), который оседает в костях, величина  $q$  равна только  $0,1 \text{ мккюри}$  («Recommendations of ICRP», 1954, *British Journal of Radiology*, Supplement № 6, 1955).

важнейших радиоактивных элементов приводятся в приложении VII.

Следует отметить, что только в случае радия имелись определенные экспериментальные и клинические данные, которые брались за основу при определении международной комиссией максимально допустимых концентраций. В остальных случаях такие данные отсутствовали, поэтому вполне возможно, что для многих радиоактивных элементов величина  $q$  весьма ошибочна. Это неудивительно, поскольку радиоактивное заражение стало предметом изучения совсем недавно—всего 10—20 лет назад. К тому же поражения организма, вызванные действием радиоактивных веществ, могут проявляться зачастую только спустя длительное время, иногда через десятки лет. Даже в отношении радия можно сказать, что имеющиеся данные о его поражающем действии являются далеко не достаточными.

Одно время в Европе и Америке радий широко применялся как лекарство. Его вводили в организм через рот и путем инъекций, ошибочно приписывая ему лечебные свойства. В начале XX в. радий очень часто попадал в опасных количествах в организм рабочих на предприятиях, вырабатывающих люминесцентные краски. Только в 1932 году Американская медицинская ассоциация исключила радий из списка новых лекарств. Даже в настоящее время в США имеются тысячи людей, в организме которых содержатся значительные количества радиевых и ториевых солей. Изучение этих людей и помогло установить величину  $q$  для радия. Зильберштейн и другие пишут в своем труде<sup>1</sup> по этому вопросу: «Наиболее важные сведения, собранные на основе всего этого материала, можно наилучшим образом суммировать путем многократного сравнения результатов поражающего действия радия для того, чтобы установить допустимую концентрацию радия для организма. Известны, например, семь случаев, когда в организме людей содержалось от 0,02 до 0,5  $мкг$  (микрограммов) радия в течение 7—25 лет. В этих случаях не отмечалось никаких клинических признаков радиоактивного заражения. Однако в другом случае количество радия, равное всего 1,2  $мкг$ , оказалось смертельным. На

---

<sup>1</sup> Silberstein H. E. et al., Biological Studies with Polonium, Radium and Plutonium, edited by R. M. Fink, NNES IV—3, McGraw-Hill, 1950, p. 232.

основании этого Национальное бюро стандартов установило в 1941 году, что максимальное безопасное количество радия в организме человека не должно превышать 0,1 *мкг*. Это значит, что общее безопасное для организма содержание радия равно 1 *мкг* и безусловно не более 5 *мкг*, поскольку известно, что за счет заглатывания в организме постоянно находится от 0,1 до 10% этой дозы (в среднем 2%). Для определения количества радия, содержащегося в организме, используется следующая зависимость: при содержании в организме 1 *мкг* радия активность радона, содержащегося в 1 л выдыхаемого воздуха, составляет 1 *мкмккюри*<sup>1</sup> (1 *мкг* радия имеет активность 1 *мккюри*).

Радий, попадая в организм, отлагается главным образом в костях. Среди радиоактивных веществ, которые отлагаются в костных тканях, необходимо отметить радий, уран и плутоний, являющиеся источниками альфа-излучения; стронций и иттрий, являющиеся источниками бета-излучения, и церий, являющийся источником гамма-излучения.

Содержание радия в костях в течение длительного времени приводит к общей слабости, изменениям в костных тканях челюстей, образованию злокачественных опухолей

---

<sup>1</sup> 0,1 *мккюри* радия, что соответствует массе  $1^{-7}$  г радия, испускает в 1 мин.  $8 \cdot 10^{-15}$  см<sup>3</sup> радона (период полураспада радона—3,8 дня). Активность указанного количества радона равна 12,6 *мкмккюри*. Радон по своим химическим свойствам напоминает инертные газы, например аргон. Известно, что около 70% радона, образующегося в организме в результате распада радия, выходит из организма вместе с выдыхаемым воздухом. Считая, что объем выдыхаемого в 1 мин. воздуха равен 7 л, мы получаем, что активность, содержащаяся в 1 л выдыхаемого воздуха, равна 1 *мкмккюри*. Количество радия, содержащегося в организме человека, определяется с помощью измерения содержащегося в выдыхаемом воздухе радона. Таким путем можно определить содержание радия в организме человека в количестве  $10^{-10}$  *кюри*. Можно отметить, что радий, нормально присутствующий в организме, большей частью поступает из питьевой воды. Концентрация радия в воде изменяется в широких пределах от  $10^{-14}$  до  $10^{-11}$  *кюри* на литр; содержание радия в организме при этом составляет  $10^{-11}$ — $10^{-10}$  *кюри*. Максимально допустимая концентрация радия в воде, установленная Международной комиссией по защите от радиоактивного излучения, равна  $4 \cdot 10^{-11}$  *кюри/л* воды. Концентрация радия в почве примерно равна  $10^{-13}$ — $10^{-12}$  *кюри/г*.

Отметим также, что концентрация радона в воздухе составляет обычно от  $10^{-14}$  до  $10^{-12}$  *кюри/л*.

Величина максимально допустимой концентрации радона для воздуха составляет  $10^{-10}$  *кюри/л* воздуха.

и костному раку (остеогенической саркоме). Эксперименты с животными показывают, что почти такое же действие на организм оказывает радиоактивный стронций<sup>1</sup>. Он может также вызвать лейкемию. (Данных о заражении людей радиоактивным стронцием не имеется.)

Финкель<sup>2</sup> пишет: «Относительная эффективность радиоактивных элементов как канцерогенных веществ зависит от ряда физических и биологических факторов, которые в настоящее время еще плохо изучены. За исключением уже установленного сильного действия альфа-частиц, которые вызывают образование злокачественных костных опухолей, относительное значение различных свойств ядерных излучений, действующих на организм, еще остается неизвестным».

При проведении опытов над крысами отмечено, что плутоний в 20 раз эффективнее, чем радий, ослабляет функции костного мозга. Очевидно, это объясняется тем, что плутоний отлагается в поверхностном слое костей, а не в глубине и оказывает более сильное действие на костный мозг и надкостницу.

Радий и стронций по своим химическим свойствам близки к кальцию, поэтому в процессе обмена веществ в организме их пути одинаковы. Некоторые наблюдения указывают на то, что в детском возрасте поступает в организм и задерживается в нем основная часть всех этих веществ. Кроме того, стронций поглощается организмом сильнее в том случае, когда в пище содержится недостаточно калия.

Величины  $q$ , установленные Международной комиссией по защите от радиоактивного излучения, для радиоактивных веществ, которые отлагаются в костях и являются источниками альфа-излучения, основаны на данных, полученных для радия. В случае других радиоактивных веществ, являющихся источниками бета- и гамма-излуче-

---

<sup>1</sup> Одна инъекция радиоактивного стронция в количестве 5 *мкюри*/г ткани почти наверняка вызовет у мышей костную опухоль через несколько месяцев после инъекции. Представляет интерес тот факт, что подобные же результаты имеют место при введении химических препаратов, сходных с радиоактивными веществами (гл. V).

<sup>2</sup> Finkel M. P., Internal Emitters and Tumor Induction, The Proceedings of the International Conference on the Peaceful uses of Atomic Energy held at Geneva, 1955, vol. 11.



ний, в основе определения величин  $q$  лежит предположение, что средняя доза, получаемая важнейшими внутренними органами, в которых концентрируются эти радиоактивные вещества, должна составлять 0,3 бэр в неделю. (Следует употреблять здесь бэр, а не рентген для того, чтобы учесть различную биологическую эффективность альфа-, бета- и гамма-излучений. Об этом подробнее сказано в приложении VI.) Максимально допустимое содержание стронция 90 в организме определяется в 1 мккюри<sup>1</sup>.

Необходимо иметь в виду, что приведенные выше величины относятся только к профессиональному (то есть связанному с условиями работы) облучению в мирное время, к тому же они рассчитаны только на взрослых. В них не включена доза облучения, получаемая всеми людьми на земле в результате существования естественного радиоактивного фона. Международная комиссия по защите от радиоактивного излучения рекомендует уменьшить величину  $q$  в 10 раз в том случае, когда большие массы населения подвергаются облучению в течение продолжительного времени. Это значит, что при учете эффекта глобального выпадения радиоактивной пыли мы должны считать за максимально допустимое содержание в организме стронция величину 0,1 мккюри, а не 1 мккюри<sup>2</sup>.

На основании всего сказанного мы приходим к заключению, что установленные в настоящее время величины являются очень неточными, поскольку практические данные отсутствуют<sup>3</sup>. Далее, по всей вероятности, они должны

---

<sup>1</sup> Эта величина  $q$  может быть легко подсчитана, исходя из дозы 0,3 бэр в неделю. См. приложение VI.

<sup>2</sup> В этой связи представляет интерес следующая выдержка из труда Е. Р. Карлинга: «В настоящее время утверждают, что при облучении больших масс населения допустимые дозы должны уменьшаться в 10 раз. Эта цифра может быть изменена. Так, например, для реки Темзы, вода которой употребляется как питьевая примерно  $\frac{1}{5}$  населения страны, допустимая концентрация должна быть уменьшена в 100 раз. Допустимая концентрация радиоактивных веществ в каждом отдельном случае должна устанавливаться в зависимости от населенности местности и других условий. В настоящее время нет прямого ответа на вопрос о том, «какая концентрация радиоактивных веществ является безопасной» (The Proceedings of the International Conference of the Peaceful uses of Atomic Energy held at Geneva, 1955; Paper 8/P/450).

<sup>3</sup> В качестве примера различного подхода к определению величины можно привести следующий случай: «В рудниках по добыче

быть значительно меньшими, поскольку необходимо учитывать не только взрослое население, но и детей, начиная с самого малого возраста и даже с момента их зачатия<sup>1</sup>.

Люди в молодом возрасте, у которых кости растут, в большей степени, чем люди пожилого возраста, подвергаются поражающему действию радиоактивных веществ, отлагающихся в костях, например радия и радиоактивного стронция.

### ПОРАЖАЮЩЕЕ ДЕЙСТВИЕ СТРОНЦИЯ 90 ПРИ ПОПАДАНИИ ЕГО В ОРГАНИЗМ

В состав продуктов деления входит большое количество различных элементов. Однако при глобальном выпадении радиоактивных продуктов деления большинство из них почти не приносит вреда. Продукт деления может представлять серьезную опасность (при попадании внутрь организма) в том случае, когда он отвечает всем указанным ниже требованиям<sup>2</sup>:

1) должен находиться в смеси продуктов деления в значительном количестве;

2) период его полураспада должен быть достаточно большим (несколько десятков лет), с тем чтобы при попадании данного продукта деления в организм его действие было длительным;

урановой руды в Чехословакии, где концентрация радона составляла примерно  $10^{-9}$  кюри/л воды, процент заболеваемости рабочих раком легких был в 30 раз выше обычного. На основании изучения этих данных в США была установлена допустимая норма содержания радона в воздухе  $10^{-10}$  кюри/л, а в Европе— $10^{-11}$  кюри/л» (USAEC Health Physics Insurance Seminar, TID-338, 1951).

<sup>1</sup> В своем труде Хастерлик приводит результаты изучения 40 пациентов, которые в 1930—1932 годах получили суммарные дозы радия от 70 до 450 мккюри. В большинстве случаев уже при содержании радия 0,4 мккюри и более отмечались поражения костей. В одном случае заметное поражение было вызвано даже такой малой дозой, как 0,15 мккюри. В этом случае доза радия была получена пациентом в возрасте 8 лет (H a s t e r l i k R. J., The Proceedings of the International Conference on the Peaceful uses of Atomic Energy held at Geneva, 1955, vol. 11).

<sup>2</sup> Например, из табл. 6 (стр. 57) видно, что цезий 137 отвечает всем требованиям, за исключением пункта 4. В отличие от радиоактивного стронция он легко удаляется из организма. Далее, максимально допустимая концентрация в организме для цезия 137, бария 137 составляет 98 мккюри по сравнению с 1 мккюри для стронция 90. Это объясняется в основном тем, что, в то время как стронций концентрируется в костях, цезий уходит в мышцы.

3) должна существовать большая вероятность попадания этого продукта деления в организм;

4) метаболизм его должен быть таким, чтобы данный продукт деления легко поглощался организмом, накапливался и задерживался в важнейших частях организма (например, в костях).

Только немногие продукты деления отвечают этим требованиям. Фактически полностью отвечает им только один продукт деления—стронций  $90^1$ . Период его полураспада равен 28 годам. Количество его составляет 5% всех продуктов деления. Он отлагается в костях и находится там в течение длительного времени, возможно в течение всей жизни человека. Вследствие того что по своим химическим свойствам стронций очень близок к кальцию, он прodelьывает такой же метаболический путь и попадает в организм человека с кальцием, содержащимся в зараженных радиоактивными продуктами деления овощах, а также через молоко и мясо животных, питающихся зараженным подножным кормом.

При номинальном взрыве большой мощности образуется около 19 кг стронция 90, общая активность которого составляет 2,8 млн. *кюри*<sup>2</sup> (см. табл. 6 и 12). Если мы предположим, что весь этот стронций 90 при глобальном выпадении радиоактивной пыли равномерно оседает на поверхности земли (в основном вместе с дождевыми осадками), то активность будет равна 5,4 *мкюри/км*<sup>2</sup>, или  $0,54 \cdot 10^{-2}$  *мккюри/м*<sup>2</sup>. Радиоактивный стронций поглощается верхним слоем почвы толщиной 5—7 см, в котором он и задерживается. (Поскольку весь радиоактивный стронций задерживается в почве, он почти не содержится в речной воде.)

---

<sup>1</sup> Данные о действии стронция 90 основаны главным образом на материале, взятом из Libby W. F., *Science*, 123, 657, 1956. Либби за максимально допустимое содержание стронция 90 берет 1 *мкюри*, то есть величину, которую рекомендует комиссия США по защите от радиоактивного излучения для рабочих, работающих на предприятиях комиссии по атомной энергии (при профессиональном облучении). Мы же взяли для непрофессионального облучения величину, равную 0,1 приведенной.

<sup>2</sup> В настоящее время мировое производство энергии (тепловой и электрической) в год составляет  $10^{10}$  *мгвт-ч*. Если бы вся эта энергия была получена за счет деления урана, то для этого потребовалось бы подвергнуть расщеплению  $0,4 \cdot 10^6$  кг урана в год. При этом образовалось бы 7600 кг стронция 90 с активностью 1120 млн. *кюри*.

Рассмотрим теперь, каким образом радиоактивный стронций попадает в растения и организм животных и в конце концов в организм человека. Растворимая в воде радиоактивная пыль ведет себя совершенно иначе, чем нерастворимая. Она поглощается почвой и растениями, в то время как нерастворимая радиоактивная пыль слабо взаимодействует с ними<sup>1</sup>. Процесс поглощения и усвоения растениями ионов металла изучен пока еще недостаточно. Но так как стронций по своим химическим свойствам подобен кальцию, то правильно будет предположить, что во время процессов обмена в растениях эти два элемента будут находиться вместе и не будут разделяться в сколько-нибудь значительной степени<sup>2</sup>. Это означает, что отношение количества стронция к кальцию в растениях будет почти таким же, как и в почве, на которой эти растения растут. Позже мы увидим, что это не совсем так: у растений (а также у животных) имеется тенденция поглощать стронций несколько в меньшем количестве. Однако мы пока этого учитывать не будем. Содержание кальция в почве в большой степени зависит от характера почвы. При этом необходимо отметить, что мы здесь имеем дело не с общим содержанием кальция в почве, а с тем его количеством, которое обычно поглощается злаками и овощами, то есть с количеством, содержащимся в верхнем слое почвы толщиной 5—7 см. Это содержание кальция может быть равно от 20 до 400 г/м<sup>2</sup>. Известняковые почвы и почвы вулканического происхождения содержат относительно большое количество кальция. Если считать, что в почве содержится в среднем 200 г кальция на 1 м<sup>2</sup> ( $2 \cdot 10^5$  кг/м<sup>2</sup>), то при распределении радиоактивного строн-

---

<sup>1</sup> Степень растворимости радиоактивной пыли определяется в основном характером грунта, над которым происходил взрыв. Так, например, в результате взрыва над коралловым атоллom (1 марта 1954 года) образовалась растворимая радиоактивная пыль.

<sup>2</sup> Содержание в растениях природного стронция, который не является радиоактивным, зависит от отношения стронция к кальцию в почве, на которой растут эти растения. Это отношение равно примерно 1 : 1000. Содержание стронция в организме животных определяется содержанием стронция в растениях, которыми они питаются. Кальций является важнейшей составной частью растений и животных; его содержание в организме человека около 1,5% общего веса (см. табл. 20). Поглощаемый растениями и животными стронций можно грубо назвать «примесью» к кальцию.

ция в количестве  $5,4$  *мкюри* на каждый килограмм кальция будет приходиться  $2,5 \cdot 10^{-2}$  *мккюри*.

В скелете взрослого человека содержится около  $1$  *кг* кальция. Если предположить, что весь этот кальций накапливается в результате употребления человеком в пищу мяса и молока животных, питавшихся подножным кормом, содержащим стронций  $90$ , а также в результате употребления овощей, поглотивших стронций  $90$  из почвы, и считать при этом, что в почве содержится  $5,4$  *мкюри* стронция на  $\text{км}^2$ , то мы получим, что общее содержание стронция  $90$  в организме составляет  $0,025$  *мккюри*. Максимальное количество стронция, которое может содержаться в организме среднего человека в течение всей его жизни, не вызывая вредных последствий (например, злокачественных опухолей), равно, как мы уже отмечали,  $1$  *мккюри* при профессиональном облучении и  $0,1$  *мккюри* при облучении всего населения. Именно об этой величине  $0,1$  *мккюри* приходится говорить, поскольку она близка к величине  $0,025$  *мккюри*, которая, согласно приведенным выше вычислениям, соответствует количеству радиоактивного стронция  $90$ , попадающему в организм каждого человека вследствие глобального выпадения радиоактивной пыли в результате одного номинального взрыва большой мощности.

Если мы определим коэффициент безопасности ( $S$ ) как отношение максимально допустимой концентрации радиоактивного вещества в организме ( $q$ ) к действительной концентрации радиоактивного вещества в организме ( $Q$ ), то величина  $S$  в рассматриваемом случае будет равна  $4$ .

Такая величина коэффициента безопасности говорит о серьезности положения. Она означает, что в результате четырех номинальных взрывов большой мощности коэффициент безопасности для стронция  $90$  станет равным  $1$ , что сигнализирует об опасности. Чем больше  $S$  превышает единицу, тем опасность поражения меньше. Когда  $S$  становится равным  $0,1$  и менее, появляется вероятность проявления вредного воздействия радиоактивного вещества, а при  $S=0,01$  его поражающее действие почти наверняка приведет к смертельному исходу.

Если  $a$  *мкюри/км<sup>2</sup>* будет означать количество стронция  $90$  в почве, а  $b$  *кг/км<sup>2</sup>*—количество кальция, содержащегося в почве, то активность стронция  $90$  на  $1$  *кг* кальция

в почве будет определяться отношением  $\frac{a}{b}$  (*мкюри* на 1 кг кальция). Возникает вопрос: какова будет активность на 1 кг кальция, содержащегося в растениях, произрастающих на этой почве? Результаты работ, проводившихся недавно по заказу комиссии по атомной энергии США, показывают, что стронций поглощается растениями в меньшей степени, чем кальций, поэтому отношение стронция к кальцию в растениях меньше (возможно, в 2 раза), чем в почве. Однако в некоторых случаях содержание радиоактивного стронция в растениях может быть значительно выше, чем в почве, на которой они растут. Это происходит в результате прямого поглощения радиоактивного стронция растениями при выпадении растворимой радиоактивной пыли на листья растений. При этом происходит процесс, подобный ассимиляции удобрений через листья.

Организмом животных стронций поглощается также в меньшей степени, чем кальций<sup>1</sup>. Так, содержание радиоактивного стронция в молоке и сыре в 5—10 раз меньше, чем в траве, которой питались животные<sup>2</sup>. Все это говорит о том, что количество радиоактивного стронция, попадающего в организм человека на единицу массы кальция значительно уменьшается.

Если мы обозначим через  $k$  коэффициент уменьшения, или, иначе, отношение количества радиоактивного стронция в организме человека к количеству радиоактивного стронция в почве (отнесенному на единицу массы кальция), то величина  $k$  будет лежать между 0,1 и 0,5 в зависимости от того, что является для организма источником кальция — животная или растительная пища. Учитывая коэффициент  $k$ , мы получим для количества радиоактивного стронция, содержащегося в организме нормального человека (общее содержание кальция 1 кг), величину  $\frac{ka}{b}$  *мкюри*. Считая, что максимально допустимое количество радиоактивного стронция в организме человека равно 0,1 *мкюри* (при

---

<sup>1</sup> Это является важным обстоятельством, которое должно быть твердо установлено.

<sup>2</sup> Эти данные относятся только к продуктам, которые дают коровы. Для остальных животных, молоко которых употребляется в пищу, соответствующие данные необходимо определить.

непрофессиональном облучении), мы получим следующую зависимость для определения коэффициента безопасности<sup>1</sup>:

$$S = \frac{b}{ak} \cdot 10^{-4}.$$

Рассмотрим входящие в эту формулу величины  $a$ ,  $b$  и  $k$ .

Величина  $a$  равна количеству радиоактивного стронция, осевшего вместе с радиоактивной пылью на  $1 \text{ км}^2$  поверхности земли. После взрыва большой мощности, который был произведен США в 1954 году, в нескольких местах, находящихся на больших расстояниях одно от другого, проводились измерения скорости глобального выпадения радиоактивной пыли. Согласно данным, которые приводит Либби, скорость выпадения равна в среднем  $0,56 \text{ мкюри радиоактивного стронция}$  на  $1 \text{ км}^2$  в год. Либби отмечает, что при взрыве большой мощности около половины всех образующихся продуктов деления оседает на землю в процессе глобального выпадения, которое происходит в течение примерно 10 лет. Заметим, что за эти 10 лет активность стронция 90 уменьшится на очень незначительную величину, так как период его полураспада равен 28 годам.  $0,56 \text{ мкюри/км}^2$ —это то количество радиоактивного стронция, которое выпадает после двух взрывов большой мощности. Суммарная активность стронция 90 в этом случае равна  $2 \cdot 2,8 \text{ млн. кюри}$ . Считая, что половина продуктов деления уходит в стратосферу и затем постепенно оседает на землю в течение 10 лет примерно с одинаковой скоростью, мы получим, что в год на  $1 \text{ км}^2$  оседает  $0,56 \text{ мкюри}$  радиоактивного стронция. Если учесть взрывы большой мощности (воздушные), которые были произведены в СССР (ноябрь 1955 года) и в США (май 1956 года), то мы получим, что в настоящее время скорость глобального выпадения радиоактивного стронция составляет  $1,2\text{—}2,0 \text{ мкюри/км}^2$  в год.

---

<sup>1</sup> Предполагается, что поглощение организмом человека кальция, содержащего радиоактивный стронций, происходит в течение большого периода времени, достаточного для того, чтобы произошел в организме обмен между «чистым» кальцием и «зараженным» кальцием. Количество кальция, ежедневно усваиваемое организмом взрослого человека, составляет  $0,8 \text{ г}$ . Поскольку в организме содержится около  $1 \text{ кг}$  кальция, то для полного обмена кальция потребуется несколько лет.

Трудно определить, сколько времени в среднем радиоактивный стронций остается в верхнем слое почвы, прежде чем он проникнет сравнительно глубоко в землю и усвоение его растениями станет невозможным. Так как этот процесс длится в течение ряда лет, то в почве будет постепенно накапливаться радиоактивный стронций. Мы будем считать, что в ближайшие 10 лет на 1 км<sup>2</sup> будет приходиться в среднем 2 мкюри радиоактивного стронция при условии, что в дальнейшем ядерные взрывы большой мощности производиться не будут (действительная величина может быть в 2—3 раза больше). Величина *a* после каждого номинального взрыва большой мощности, по самым осторожным подсчетам, увеличивается на 0,8 мкюри/км<sup>2</sup>.

Вследствие местного и полуглобального выпадения радиоактивной пыли после испытаний ядерного оружия, проводившихся в Неваде (США), величину *a* для территории США можно считать в 3 раза больше средней величины *a* для остальной территории земного шара. Для Австралии величина *a* также берется больше вследствие выпадения радиоактивной пыли после испытаний на островах Монте-Белло и на полигоне Вумера.

В этой связи следует отметить важные выводы Либби<sup>1</sup>. «Таким образом,—пишет он,—мы приходим к выводу, что содержание радиоактивного стронция в организме человека ниже, чем у всех проверенных животных, и примерно в 10 раз меньше, чем в почве и в растениях. У человека в молодом возрасте, когда его кости еще растут, отношение количества стронция 90 к кальцию соответствует  $1/_{1000}$  максимально допустимой концентрации, установленной для взрослого человека,—1 мкюри на 1000 г кальция, содержащегося в нормальном организме человека. Среднее содержание радиоактивного стронция в почве на территории США в 10 раз больше этой величины, а в других районах земного шара, где не происходит местного выпадения радиоактивной пыли, оно в 3 раза меньше соответствующего содержания радиоактивного стронция в почве на территории США». Считая, что на 1 м<sup>2</sup> приходится 215 г кальция (то есть более 2 т на 1 га), приведенная выше величина  $10^{-2}$  мкюри радиоактивного стронция на 1 кг кальция дает для США 2,3 мкюри радиоактивного

---

<sup>1</sup> Libby W. F., *Science*, 123, 657, 1956.



стронция на  $1 \text{ км}^2$ . Для районов, где не происходит местного выпадения радиоактивной пыли, содержание радиоактивного стронция в 3 раза меньше указанного, то есть  $0,8 \text{ мкюри/км}^2$ . (Эта величина относится только к выпадению пыли после ядерных взрывов в марте 1954 года.) Таким образом, величина  $2 \text{ мкюри/км}^2$ , принятая нами для выпадения радиоактивной пыли в результате всех взрывов большой мощности, производившихся до середины 1956 года, является вполне обоснованной.

Теперь рассмотрим величину  $b$ , которая определяет количество кальция, содержащегося в  $1 \text{ км}^2$  почвы. Эта величина может быть равна от  $2 \cdot 10^4$  до  $4 \cdot 10^5 \text{ кг}$ , что соответствует от 20 до  $400 \text{ г/м}^2$ . Подсчитаем величину  $S$  для этих двух крайних значений (табл. 19). Нижнее крайнее значение  $S$  соответствует почвам с недостаточным содержанием кальция.

Перейдем теперь к величине  $k$ , которая зависит от относительного содержания кальция в среднем количестве потребляемых человеком продуктов питания животного (молоко и молочные продукты) и растительного происхождения. Подсчитаем величину  $S$  для значений  $k=0,1$  и  $k=1,0$ , соответствующих продуктам животного ( $k=0,1$ ) и растительного ( $k=1,0$ ) происхождения. В странах с высоким уровнем потребления продуктов питания более половины ежедневно усваиваемого организмом кальция ( $0,8 \text{ г}$ ) попадает в организм вместе с молоком и сыром. При этом укажем, что в  $0,5 \text{ л}$  молока содержится  $0,5 \text{ г}$  кальция, в твердом сыре—в 5 раз больше, в  $0,5 \text{ кг}$  непросеянной пшеничной муки— $0,22 \text{ г}$  кальция, а в 70% просеянной муки— $0,08 \text{ г}$ .

Таблица 19

Величина  $S$  для различных значений  $b$  и  $k$

$$S = \frac{b}{ak} \cdot 10^{-4} \text{ и } a = 2 \text{ мкюри/км}^2$$

$k \backslash b$	0,1	1,0
$2 \cdot 10^4$	10	1
$4 \cdot 10^5$	200	20

Из таблицы видно, что наименьшая величина  $S$  равна 1, а наибольшая—200. Следует снова напомнить о том, что в основу этих величин положена максимально допустимая концентрация стронция в организме человека, равная 0,1 мккюри. Однако вследствие ряда причин, о которых говорилось в предыдущих параграфах, эта величина максимально допустимой концентрации является далеко не точной. Если, например, считать эту величину в 10 раз меньшей, чем действительная величина максимально допустимой концентрации (что вполне возможно, особенно для случаев облучения в раннем возрасте, когда скелет еще формируется), то это будет означать, что опасный предел уже превышен. Дальнейшее проведение испытаний ядерного оружия, даже при существующих темпах, может привести к тому, что уже примерно через 10 лет содержание радиоактивного стронция в организме превысит допустимое на значительную величину, вследствие чего количество случаев заметных поражений скелета у людей, а также других эффектов увеличится. В первую очередь это будет относиться к населению стран со сравнительно низким уровнем питания.

Оценка опасности, которую несет с собой радиоактивный стронций, связана с целым рядом трудностей и с наличием ряда еще не выясненных факторов. Тем не менее эта опасность, которая является очевидной, должна быть изучена самым тщательным образом, для чего потребуются совместные усилия ученых всех стран.

## ОПАСНОСТЬ, СВЯЗАННАЯ С РАДИОАКТИВНЫМ ЙОДОМ

Кратко рассмотрев глобальное выпадение стронция 90, который с точки зрения радиологической опасности является наиболее важным из продуктов деления, перейдем к рассмотрению другого продукта деления, который заслуживает внимания,—йода 131. (В дальнейшем мы скажем также несколько слов о радиоактивном углероде, который, однако, не является продуктом деления.) Йод имеет ряд радиоактивных изотопов с различными периодами полураспада. Все они образуются при делении, но из них только йод 131 имеет достаточно большой период полураспада (хотя и он равен всего 8 дням) и, таким образом, представляет опасность для организма. Йод 131, или иначе радио-

активный йод<sup>1</sup>, является источником бета- и гамма-излучений (см. табл. 6, стр. 57). Радиоактивный йод попадает внутрь организма вместе с радиоактивной пылью при вдыхании зараженного воздуха или заглатывания зараженной пищи. Попад в организм, он накапливается главным образом в щитовидной железе. Щитовидная железа сравнительно мало чувствительна к радиации и может подвергаться облучению большими дозами, не претерпевая при этом заметных изменений. Так, например, для того, чтобы вызвать заметные поражения щитовидной железы у овец, требуется доза в 10 тыс. *p*. Для лечения увеличенной щитовидной железы у человека радиоактивным йодом 131 требуется доза облучения 5—10 тыс. *p*. Йод 131, выпадающий вместе с радиоактивной пылью, находят при вскрытиях в щитовидной железе у крупного рогатого скота и овец, а также у людей. Излучение в течение длительного времени радиоактивности в щитовидной железе у скота показало, что в определенное время, которое соответствует времени проведения испытаний ядерного оружия, в щитовидной железе отмечаются максимумы активности. Интересный отчет о недавно проводившихся измерениях был опубликован Мидлсвортом<sup>2</sup>. В отчете сообщается, что максимальная доза йода 131, полученная щитовидной железой у крупного рогатого скота и овец в Европе в результате глобального и полуглобального (кольцевого) выпадения радиоактивной пыли, равна примерно  $10^{-3}$  *мккюри/г* щитовидной железы. В США эта доза в 10 раз больше. Мидлсворт отмечает, что у человека «максимальное содержание йода 131 на грамм щитовидной железы составляет 0,5% максимального количества йода 131, содержащегося у скота из того же района. Такая разница объясняется тем, что у человека щитовидная железа в 10 раз больше<sup>3</sup>, чем, например, у коровы (при сравнении за основу берется общий вес тела), а общий объем воздуха,

---

<sup>1</sup> Строго говоря, радиоактивный йод является смесью радиоактивных изотопов йода. Однако, поскольку эти изотопы, за исключением йода 131, имеют малые периоды полураспада, их концентрация уже неделю спустя после взрыва становится ничтожной.

<sup>2</sup> Van Middlesworth, *Science*, 123, 982, 1956.

<sup>3</sup> Средний вес щитовидной железы у человека—20 г. Для того чтобы человек получил дозу 0,3 *p* в неделю (максимально допустимая недельная доза), концентрация йода 131 должна быть равна 0,03 *мккюри/г* щитовидной железы.

вдыхаемого человеком за день, меньше. Кроме того, человек поглощает вместе с пищей во много раз меньше радиоактивной пыли, чем скот».

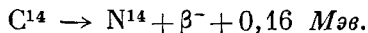
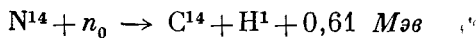
Указанные максимальные дозы являются слишком малыми и не вызывают заметного поражающего действия.

## ОПАСНОСТЬ, СВЯЗАННАЯ С УРАНОМ И ПЛУТОНИЕМ

Кроме продуктов деления, в радиоактивной пыли содержатся также непрореагировавшие уран и плутоний, которые в больших количествах остаются после взрыва. Однако радиологическое их действие является ничтожным. Плутоний, например, отлагается в костных тканях. Максимально допустимая концентрация его в организме равна  $0,04$  мккюри, что соответствует массе около  $0,5$  мкг. Поскольку в организме остается менее  $1\%$  всего заглатываемого количества плутония, для того, чтобы получить максимально допустимое содержание плутония, необходимо, чтобы в организм вместе с пищей попало  $0,1$  мг плутония. Если предположить, что человек получил это количество плутония вместе с зараженной пищей в течение 30 лет, то средняя концентрация плутония в радиоактивной пыли, содержащейся в пище, должна быть равна  $10^{-9}$  г на грамм радиоактивной пыли (при этом мы считаем, что количество съеденной за 30 лет пищи равно  $30 \cdot 500$  кг;  $1\%$  этого количества составляет радиоактивная пыль). Принимая концентрацию плутония в радиоактивной пыли, содержащейся в пище, равной концентрации плутония в почве и считая, что в почве плутоний содержится только в верхнем слое толщиной  $1$  см, мы приходим к заключению, что в рассматриваемом случае в результате глобального выпадения должно осесть на землю примерно  $3$  тыс. т плутония. (Приведенный пример основан на данных, содержащихся в книге «The Effects of Atomic Weapons», 1950, р. 436.) Таким образом, мы видим, что при выпадении радиоактивной пыли плутоний практически не представляет опасности. То же самое, но в еще большей степени, относится и к урану 235. Уран 235 представляет опасность скорее с точки зрения его вредного химического действия (аналогичного действию свинца), чем радиологического.

## ОПАСНОСТЬ, СВЯЗАННАЯ С РАДИОАКТИВНЫМ УГЛЕРОДОМ

Радиоактивный углерод, то есть углерод 14, не принадлежит к продуктам деления. Он образуется при захвате нейтронов азотом воздуха.



Углерод 14 испускает бета-частицы, обладающие средней энергией, равной 0,05 Мэв (максимальная их энергия—0,16 Мэв; период полураспада радиоактивного углерода равен 5600 лет). Можно считать, что почти все нейтроны, испускаемые облаком взрыва, в конце концов захватываются азотом, в результате чего образуется радиоактивный углерод. При взрыве номинальной бомбы большой мощности, основанной на делении, освобождается около 10 кг нейтронов. Если предположить, что 10% этих нейтронов испускается облаком взрыва, то количество образовавшегося радиоактивного углерода будет составлять 14 кг. При взрыве такой же мощности, основанном полностью на синтезе, количество освобождающихся нейтронов будет в 10 раз больше, следовательно, и радиоактивного углерода образуется в 10 раз больше.

Образование радиоактивного углерода в атмосфере происходит непрерывно в результате захвата нейтронов, возникающих при взаимодействии космических лучей с воздухом.

Однако непрерывного накопления радиоактивного углерода не происходит. Поскольку период его полураспада равен 5600 годам, *равновесное состояние* (при котором количество образующегося в единицу времени радиоактивного углерода равно количеству распадающегося радиоактивного углерода за это же время) достигается приблизительно за 100 тысяч лет<sup>1</sup>. Так как 100 тысяч лет по сравнению с возрастом земли период небольшой, отмечаемое

<sup>1</sup> Если  $p$ —скорость образования радиоактивного углерода в результате действия космических лучей, то есть количество радиоактивного углерода, образующегося за 1 сек., а  $N$ —количество радиоактивного углерода при равновесном его состоянии, то

$$\lambda N = p,$$

где  $\lambda$ —постоянная распада (период полураспада—0,7 $\lambda$ ). Исходя из имеющихся данных, можно считать, что интенсивность космических лучей остается постоянной на протяжении ряда геологических периодов.

в настоящее время количество радиоактивного углерода находится в равновесном состоянии.

Подсчитано, что на поверхности земли (в атмосфере, биосфере<sup>1</sup> и океанах) находится около 80 тыс. кг углерода 14, что соответствует активности 7 мкмккюри/г природного углерода<sup>2</sup>. Углекислый газ, входящий в состав атмосферы, содержит 1200 кг радиоактивного углерода, что составляет 1,5% общего количества радиоактивного углерода на поверхности земли.

Так как при номинальном взрыве большой мощности, основанном на делении, образуется около 14 кг радиоактивного углерода, то потребуются 90 таких взрывов, для того чтобы удвоить содержание радиоактивного углерода в атмосфере, и 6 тыс. взрывов, для того чтобы удвоить общее количество радиоактивного углерода на земле. Однако даже это не привело бы к заметному радиологическому его действию. В организме человека содержится до 12 кг углерода, который более или менее равномерно в нем распределен.

Радиоактивный углерод, содержащийся в организме, имеет общую активность 0,1 мккюри. Таким образом, получаемая организмом доза излучения в год составляет 1,5 миллирентгена. Эта доза в 10 раз меньше дозы, получаемой организмом в результате присутствия в нем радиоактивного калия (калия 40) (см. гл. IV).

На основе сказанного можно сделать вывод, что радиоактивный углерод, образующийся при ядерных взрывах, практически не представляет опасности<sup>3</sup>.

---

<sup>1</sup> Подсчитано, что в биосфере—области распространения растительного и животного мира на земном шаре—содержится примерно  $10^{11}$  т углерода, в том числе около 100 кг радиоактивного углерода. Это составляет 0,1% общего количества радиоактивного углерода на поверхности земли.

<sup>2</sup> В природном углероде содержится только один радиоактивный изотоп—углерод 14. На каждые  $10^{12}$  частей углерода приходится одна часть радиоактивного углерода. Необходимо отметить, что количество углерода 14, содержащегося в природном углероде, соответствует равновесному состоянию при условии, что этот изотоп непрерывно участвует в обмене с углеродом в атмосфере, так как только в атмосфере происходит образование радиоактивного углерода. Если бы процесс обмена прекратился, то радиоактивность природного углерода уменьшилась бы вдвое через 5600 лет. Эта зависимость используется для определения возраста окаменевшей древесины, пролежавшей под землей в течение нескольких тысяч лет.

<sup>3</sup> В этой связи следует привести результаты недавно проводившихся измерений изменения концентрации тритиевой воды в морской воде с изменением глубины (третий, имеющий период полу-

## ДОЗА ИЗЛУЧЕНИЯ, ПОЛУЧАЕМАЯ ЧЕЛОВЕКОМ В РЕЗУЛЬТАТЕ ГЛОБАЛЬНОГО ВЫПАДЕНИЯ РАДИОАКТИВНОЙ ПЫЛИ

Прежде чем перейти к следующей главе, необходимо сначала определить дозу излучения, которую получают люди вследствие глобального выпадения радиоактивной пыли после ядерных взрывов (при этом облучение тела является полным). Мы увидим, что доза излучения, полученная человеком в результате выпадения радиоактивной пыли, до настоящего времени является слишком малой и не оказывает заметного соматического действия, однако ее генетическим действием нельзя полностью пренебрегать.

Мы уже говорили выше, что внутреннее облучение организма при попадании продуктов деления (особенно радиоактивного стронция) внутрь организма не оказывает генетического действия, поскольку излучение в этом случае не достигает половых органов. Совершенно иначе обстоит дело с гамма-лучами, испускаемыми продуктами деления, выпавшими на местность.

Рассмотрим номинальный взрыв большой мощности. Известно, что 50% продуктов деления, образующихся при взрыве, оседает на землю при глобальном выпадении радиоактивной пыли. Радиоактивная пыль в этом случае более или менее равномерно оседает на всей поверхности земного шара, причем оседание это начинается спустя несколько недель после взрыва и продолжается в течение примерно 10 лет. Однако для упрощения мы будем считать, что радиоактивная пыль выпадает сразу, спустя месяц

распада  $12,4$  года, образуется в атмосфере под действием космических лучей и соединяется затем с кислородом, образуя радиоактивную воду). В то время как в верхнем слое морской воды глубиной  $100$  м происходит полное перемешивание (в основном вследствие турбулентных потоков), нижние слои фактически изолированы от верхнего слоя. Между углекислым газом в верхнем слое воды и углекислым газом в атмосфере происходит непрерывный обмен, причем количества углекислого газа в верхнем слое воды и в атмосфере почти равны. Любое количество радиоактивного углерода, образовавшееся в атмосфере, через несколько недель или месяцев равномерно распределяется между атмосферой и верхним слоем воды в море.

Учитывая все это, мы должны будем внести поправку в наши расчеты и считать, что количество взрывов, которые необходимо произвести, чтобы удвоить содержание радиоактивного углерода в атмосфере, должно быть в  $2$  раза больше указанного.

после взрыва (это допущение не приведет к искажению конечных результатов вычислений). При этом активность пыли, выпавшей на каждый кв. километр земной поверхности, будет равна 2,3 *кюри* (см. табл. 7). В этом случае доза, получаемая человеком, находящимся вне укрытия, будет составлять 0,6 миллирентгена в день. Так как активность пыли с течением времени уменьшается, то суммарная доза, полученная человеком в течение неопределенно долгого периода (мы будем называть ее «бесконечной дозой»), не будет бесконечно большой, а составит всего около 100 миллирентгенов<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Рассмотрим подробнее приведенный нами пример.

Для номинального взрыва большой мощности гамма-активность продуктов деления спустя время  $t$  после взрыва определяется выражением  $6,0 \cdot 10^{12}/t^{1,2}$  *кюри* (см. табл. 7). Можно считать, что это выражение действительно для значений  $t$  от 10 сек. до 1 года. Если предположить, что продукты деления равномерно оседают на поверхность земли (520 млн. км<sup>2</sup>), то активность, приходящаяся на 1 км<sup>2</sup>, будет равна  $1,1 \cdot 10^4/t^{1,2}$  *кюри*. Так как  $3,8 \cdot 10^3$  *кюри* на 1 км<sup>2</sup> соответствует дозе 0,04 *р*, получаемой за 1 час человеком, находящимся вне укрытия, то в рассматриваемом случае глобального выпадения мощность дозы будет равна  $0,1 t^{1,2}$  *р/час* ( $t$ —в часах), а суммарная доза в рентгенах в период времени от  $t$  до  $T$  может быть определена по следующей формуле:

$$0,5 \left( \frac{1}{t^{0,2}} - \frac{1}{T^{0,2}} \right).$$

При  $T \rightarrow \infty$  второй член в скобках  $\left( \frac{1}{T^{0,2}} \right)$  обращается в нуль, и «бесконечная доза»  $R$  будет равна  $R = 0,5/t^{0,2}$  *р*, где  $t$ —в часах.

В таблице, приведенной ниже, даны значения  $R$  для различных значений  $t$ . Для сравнения приведены также значения дозы  $R_1$ , получаемой за 30 лет начиная с момента  $t$ .

$t$	1 час	1 день	1 неделя	1 месяц	1 год
$R$	0,50	0,27	0,18	0,13	0,8
$R_1$	0,46	0,22	0,14	0,09	0,04

«Основными источниками гамма-излучения, получаемого человеком в течение первого год после взрыва, являются Nb 95 (период полураспада 35 дней), Zr 95 (65 дней) и Ru 103 (42 дня); в последующем основными источниками будут Se 141 (30 дней), Ru 106 (1 год) и Se 144 (275 дней), причем последние два изотопа в течение третьего года будут давать 95% гамма-активности. Через 10 лет после взрыва основным источником гамма-излучения будет Cs 137, период полураспада которого равен 33 годам» (L a r r R. E., *Bulletin of the Atomic Scientists*, 11, 339, 1955).



Определяя опасность, вызываемую облучением, удобно применять математическое понятие бесконечной дозы, которая дает теоретический верхний предел облучения. В действительности же суммарная доза излучения, получаемая человеком даже в течение всей его жизни, будет значительно меньше бесконечной. Однако не будет большой ошибкой считать дозу, получаемую человеком в течение его жизни, равной бесконечной дозе.

Из приведенного примера очевидно, что бесконечная доза, получаемая в результате глобального выпадения радиоактивной пыли после взрыва большой мощности, является очень малой—всего небольшая часть рентгена. Необходимо здесь также указать на два важных фактора, которые значительно уменьшают дозу излучения, получаемую человеком. Этими факторами являются погода и укрытия. В нашем примере мы допускали, что вся радиоактивная пыль оседала на поверхность земли сразу и что она оставалась на месте в течение длительного времени (возможно, десятками лет). В действительности же глобальное выпадение радиоактивной пыли происходит не сразу, а длится около 10 лет. Вследствие постоянного вымывания радиоактивной пыли дождем и выветривания вполне очевидно, что радиоактивная пыль не может накапливаться в одном месте в течение долгого времени (мы имеем здесь в виду радиоактивную пыль, выпавшую после одного взрыва). Трудно подсчитать, в каких количествах накапливается в действительности радиоактивная пыль, по всей вероятности, это накопление происходит по-разному в различных районах. Кроме того, люди не находятся все время под открытым небом, а часть времени прово-

---

Так как закон  $1/t^{1,2}$  неприменим для  $t > 1$  года, то для определения «бесконечной дозы» следует к дозе, полученной за год, добавлять дозу, полученную за счет гамма-излучения, испускаемого цезием 144 и цезием 137. Возьмем, например, церий 144. При номинальном взрыве большой мощности образуется около 110 млн. *кюри* церия 144 (см. табл. 6). Если предположить, что весь материал равномерно оседает на поверхности земли, то «бесконечная доза»  $R(t)$  в рентгенах будет равна

$$R(t) \sim 0,02 \exp(-\lambda t),$$

где  $\lambda \approx 10^{-4}$  (час) $^{-1}$ . Для  $t=1$  году бесконечная доза равна примерно 0,01 р. Доза, получаемая таким же образом за счет цезия 137, равна 0,03 р. Таким образом, суммарная бесконечная доза за счет церия 144 и цезия 137 равна 0,04 р. Эта величина равна половине величины, приведенной в таблице.

дят в помещениях. Различные здания защищают людей от гамма-излучения, испускаемого продуктами деления, неодинаково. Например, деревянный дом с соломенной крышей и тонкими стенами обеспечивает очень малую защиту.

Все эти факторы являются весьма неопределенными. (Дальнейшее их изучение может значительно уменьшить эту неопределенность.) Тем не менее можно считать, что общее действие всех этих факторов, снижающих степень облучения, таково, что доза излучения, получаемая человеком, уменьшается почти в 10 раз. Таким образом, доза, получаемая незащищенным человеком в течение его жизни в результате глобального выпадения радиоактивной пыли после одного номинального взрыва большой мощности, равна 10 миллирентгенам. Суммарная доза, полученная в результате всех испытательных взрывов, произведенных до настоящего времени, равна примерно 100 миллирентгенам. Эта доза относится к людям, живущим в домах сельского типа. Население же городов, живущее в домах, обеспечивающих значительно большую степень защиты от излучения, получит дозу в 10 раз меньшую.

Коккрофт<sup>1</sup> в своем выступлении перед английским парламентским и научным комитетом привел более точную цифру. Он подсчитал, что каждый житель Англии, находясь вне укрытия, получил в результате всех произведенных ядерных взрывов (до апреля 1955 года)<sup>2</sup> суммарную

<sup>1</sup> Cockroft J., *Nature*, 175, 873, 1955.

<sup>2</sup> Помещаемая ниже таблица впервые приведена в отчете Научно-исследовательского центра по атомной энергии в Харуэлле (Англия), «АЕРЕ—НР/R 1701» (июнь 1955). В сокращенном виде таблица помещена в статье Лэппа в журнале «*Bulletin of the Atomic Scientists*», 11, 1701, 1955. В таблице содержатся дозы, полученные незащищенным населением в Англии в результате глобального выпадения радиоактивной пыли после взрывов большой мощности:

Серия испытаний (место проведения)	Дата испытания	Время, за которое получена доза	Доза, мр
Эниветок, США	1/XI 1952 год	Суммарная	6,16
Бикини, США	1/III 1954 год (начало)	13/III 1954—16/IX 1954 годы	0,92

дозу, равную 0,03 *p* (при этом доза, полученная от всех атомных взрывов, составляет только  $\frac{1}{5}$  дозы от всех взрывов большой мощности). «В США, где при испытаниях в Неваде выпадали большие количества радиоактивной пыли в районе взрыва, средняя доза, полученная от всех взрывов, равна 0,1 *p*. В действительности эта доза в различных районах различна, однако при этом максимальная доза не более чем в 2 раза превышает минимальную».

Если к дозе, подсчитанной Коккрофтом, прибавить дозу, полученную в результате последующих взрывов большой мощности, произведенных США и СССР, то доза, приходящаяся на каждого незащищенного человека в результате глобального выпадения радиоактивной пыли после всех ядерных взрывов на данный момент времени, составит 0,1 *p*. При этом исходят из того, что общее количество ядерных взрывов, произведенных на июнь 1956 года, составляет 90 (хотя официальных данных по этому вопросу не имеется), в том числе 12 взрывов большой мощности, основанных на делении. Из этого общего числа ядерных взрывов в США произведено 70 взрывов, в СССР—17, в Англии—3.

#### Продолжение

Серия испытаний (место проведения)	Дата испытания	Время, за которое получена доза	Доза, <i>мр</i>
		20/IX 1954—6/I 1955 годы (интерполир.)	0,92
		6/I 1955—15/II 1955 годы (осевш.)	0,38
		Вычислен. экстра- пол. для будущего	20,30

Из работ, касающихся вопроса о дозе, получаемой в результате глобального выпадения радиоактивной пыли, следует отметить следующие:

1. Eisenbud M., Harley J. H., Radioactive Fallout in Nuclear Detonations, *Science*, 117, 141, 1953.
2. Eisenbud M., Harley J. H., Radioactive Fallout in the United States, *Science*, 121, 677, 1955.
3. Blifford I. H., jr., Rosenstock H. B., Fallout Dosages at Washington, D. C., *Science*, 123, 619, 1956.

Следует, однако, признать, что при определении суммарной дозы может быть допущена ошибка примерно в 5 раз. Для США, например, эта доза будет значительно выше указанной (возможно, в 2—3 раза) вследствие местного и полуглобального выпадения радиоактивной пыли после испытаний в Неваде. В умеренных широтах северного полушария вследствие полуглобального выпадения радиоактивной пыли суммарная доза будет выше, чем в тропиках и в южном полушарии.

### **ДОЗА ИЗЛУЧЕНИЯ, ПОЛУЧАЕМАЯ ЧЕЛОВЕКОМ В РЕЗУЛЬТАТЕ СУЩЕСТВОВАНИЯ ЕСТЕСТВЕННОГО РАДИОАКТИВНОГО ФОНА**

Рассматривая влияние на человека дозы, получаемой им в результате глобального выпадения радиоактивной пыли, необходимо сравнить эту дозу «искусственно» создаваемого облучения с той дозой, которую получает человек в результате постоянно существующего естественного радиоактивного фона и активности, содержащейся в организме самого человека. Это сравнение показывает, что доза, которую человек получает за свою жизнь в результате действия на него естественного радиоактивного фона, намного больше, чем доза, полученная человеком в результате всех ядерных взрывов, произведенных на данный момент времени.

Источниками естественного радиоактивного фона<sup>1</sup>, действующего на человека, являются:

- 1) радиоактивные вещества, содержащиеся в организме человека;
- 2) космические лучи;
- 3) радиоактивные вещества, имеющиеся в почве, в скалах, в материале зданий и пр.

### **РАДИОАКТИВНЫЕ ВЕЩЕСТВА В ОРГАНИЗМЕ ЧЕЛОВЕКА**

В организме человека содержатся два радиоактивных изотопа: калий 40 и углерод 14. Из них большее значение имеет калий 40, который входит в состав природного калия в количестве 0,012%. Он испускает бета-излуче-

---

<sup>1</sup> Libby W. F., Dosages from Natural Radioactivity and Cosmic Rays, *Science*, 123, 619, 1956. (Следует отметить, что данные, приводящиеся в настоящей книге, совпадают с данными Либби.)

ние (максимальная энергия бета-частиц— $1,36 \text{ Мэв}$ ) и гамма-излучение (при  $K$ -захвате электрона энергия гамма-излучения— $1,45 \text{ Мэв}$ ). При этом период полураспада в результате гамма-излучения равен  $10^{10}$  лет, а бета-излучения—в 10 раз меньше. 1 г природного калия испускает в 1 сек. около 30 бета-частиц и 3 гамма-кванта. В организме человека на каждый 1 кг веса тела приходится 2 г калия. В организме «нормального человека»<sup>1</sup>, например (см. гл. IV), содержится 140 г калия, что соответствует общей активности 0,01 мккюри для гамма-излучения и 0,1 мккюри для бета-излучения. Пользуясь методом, который описан в приложении VI, можно легко подсчитать дозу, которую получит человек в результате содержания в его организме калия. Эта доза равна 17 миллирентгенам в год от бета-излучения и 2 миллирентгенам в год от гамма-лучей.

В результате присутствия в организме человека углерода 14, общая активность которого в организме составляет около 0,1 мккюри, человек получает дозу 1,5 миллирентгена в год. Активность радиоактивного углерода и активность радиоактивного калия почти одинаковы, но доза, получаемая человеком в результате содержания в организме радиоактивного калия, в 10 раз больше вследствие значительно большей энергии бета-излучения, испускаемого радиоактивным калием. Таким образом, суммарная доза, получаемая человеком в год, равна 20 миллирентгенам.

Недавно были проведены прямые измерения гамма-излучения, испускаемого организмом человека<sup>2</sup>. Сиверт<sup>3</sup>

<sup>1</sup> При подсчете дозы гамма-излучения исходят из предположения, что организмом поглощается только 50% гамма-лучей, остальные 50% уходят из организма. Таким образом, «нормальный человек» является источником гамма-излучения, активность которого составляет 0,005 мккюри. Это соответствует излучению 0,5 млн. гамма-квантов в час. Из этого следует, что человек, находящийся в густой толпе, получает от своих соседей дозу гамма-излучения (вследствие присутствия в их организме радиоактивного калия), мощность которой равна 2 миллирентгенам в год (Libby W. F., Dosages from Natural Radioactivity and Cosmic Rays, *Science*, 123, 619, 1956).

<sup>2</sup> Reines F. et al., Determination of Total Body Radioactivity Using Liquid Scintillation Detectors, *Nature*, 172, 521, 1953.

<sup>3</sup> Sievert R. M., Measurement of Low Level Radioactivity, Particularly the  $\gamma$ -radiation from Living Subjects, The Proceedings of the International Conference on the Peaceful uses of Atomic Energy held at Geneva 1955; Paper 8/P/792.

определил, что гамма-излучение на единицу веса тела у мужчин ( $10^{-10}$  *кюри* на 1 кг веса тела) примерно на 20% больше, чем у женщин, при этом с увеличением возраста (до 60 лет и выше) оно уменьшается. «Это легко объясняется тем, что большая часть калия в организме человека содержится в мышечных тканях, в то же время в жировых отложениях содержание калия очень незначительно. У людей пожилых с атрофированными мышцами и у людей с большими подкожными жировыми отложениями, поглощающими гамма-излучение, количество гамма-излучения, попадающего из организма в окружающую среду, меньше, чем у людей молодого и среднего возраста».

В организме человека содержится также некоторое количество радия, попадающего в организм вместе с питьевой водой. Активность содержащегося в организме радия составляет от 0,01 *мккюри* до величины в 100 раз меньшей. Однако Сиверт на основе измерений на нескольких сотнях людей приходит к следующему заключению: «Будет правильным предположить, что если содержание радия в воде, которую пьет человек в течение своей жизни, менее  $10^{-12}$  *кюри* /л, то доза излучения, полученная за счет радия, который накапливается в организме (даже у людей пожилого возраста), составит не более 10% той дозы, которую получает человек за счет содержания в его организме калия 40».

Ввиду недостаточного количества данных и целого ряда неточностей, а также вследствие того, что доза, получаемая человеком за счет содержания в организме радия, очень мала по сравнению с дозой, получаемой за счет содержания в организме калия, можно этой дозой пренебречь.

### КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ

Интенсивность космических лучей зависит от географической широты и высоты над уровнем моря. Она является минимальной на экваторе на уровне моря и увеличивается с увеличением широты и высоты. На уровне моря число ионов, образующихся в воздухе под действием космических лучей, составляет 2 пары ионов в  $1 \text{ см}^3$  в сек. Число ионов, образующихся под действием излучения в 1 р, равно  $2,1 \cdot 10^9$  пар ионов в  $1 \text{ см}^3$  воздуха. Таким образом, доза излучения, получаемая на уровне моря под действием космической радиации, равна 30 миллирентгенам

в год. С увеличением высоты эта доза увеличивается. Величины доз для различных широт и высоты над уровнем моря приводятся в табл. 20.

### ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕ, ИСПУСКАЕМОЕ РАДИОАКТИВНЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ, СОДЕРЖАЩИМИСЯ В ЗЕМЛЕ

В скалах и почве содержатся радиоактивные вещества, наиболее важными из которых являются уран (с дочерними продуктами распада—радием и другими), торий (с дочерними продуктами) и калий. Как мы можем видеть из приложения VI, дозу гамма-излучения, испускаемого поверхностью земли, можно легко подсчитать. Наибольшую дозу излучения дают гранитные скалы—около 90 миллирентгенов в год. В океане по сравнению с земной поверхностью содержатся ничтожные концентрации радиоактивных веществ, поэтому практически дозу, получаемую за счет моря, можно считать равной нулю.

Учитывая все эти излучения, мы находим, что суммарная доза, которую получает человек за счет естественного радиоактивного фона, равна 0,1 *p* в год. Таким образом, человек с момента зачатия до возраста 30—40 лет получает в среднем дозу 4 *p*. Дозу 0,1 *p* можно считать средней дозой, получаемой в результате наличия естественного радиоактивного фона для всего земного шара<sup>1</sup>.

В некоторых районах эта доза значительно выше, например в Тибете (вследствие того, что интенсивность космических лучей увеличивается с высотой) и в отдельных местах штата Траванкор в Индии (вследствие сравнительно большой радиоактивности монацитовых песков).

---

<sup>1</sup> Представляют интерес данные, полученные Сивертом путем прямого измерения интенсивности гамма-излучения, создающего радиоактивный фон. Сиверт определил, что доза гамма-излучения за счет естественного радиоактивного фона внутри зданий в Швеции равна от 0,05 до 0,5 *p* в год в зависимости от типа здания, причем величина дозы редко превышает 0,25 *p* в год.

Он также обнаружил, что в очень плохо вентилируемых зданиях концентрация радона резко увеличивается, достигая максимально допустимой концентрации при профессиональном облучении ( $10^{-10}$  кюри на литр воздуха), установленной Международной комиссией по защите от радиоактивного излучения. При этом доза гамма-излучения за счет радиоактивного фона составляла только 0,2 *p* в год. Поскольку радон практически не задерживается в организме, входя и выходя из легких вместе с вдыхаемым воздухом, действию альфа-излучения подвергаются только легкие.

Степень облучения организма человека в результате наличия радиоактивного фона  
(единица измерений дозы—миллирентген (мр) в год)\*

I Радиоактивные вещества в организме	II Космические лучи	III Радиоактивное излучение, испускаемое веществами, содержащимися в земле	Общая доза I+II+III
<p><b>Радиоактивный углерод</b> (15 распадов в минуту на грамм углерода) 2</p> <p><b>Радиоактивный калий</b> (1980 распадов в минуту на грамм калия) 19</p> <p><b>Радий</b> (3,7·10<sup>10</sup> распадов в секунду на грамм радия) 7 (?)</p>	<p>На экваторе уровне моря 33</p> <p>1500 м 40</p> <p>3000 м 80</p> <p>4500 м 160</p> <p>6000 м 300</p>	<p>Большие широты 37</p> <p>60</p> <p>120</p> <p>240</p> <p>450</p>	<p>На экваторе (на уровне моря) 21+33+90=144</p> <p>21+33+23=77</p> <p>21+33+0=54</p>
	<p>1. Гранитная порода (содержание в частях на млн.) U Th K 4 13 3·10<sup>4</sup></p> <p>2. Осадочная порода (содержание U, Th и K равно 1/4 их содержания в граните) 3. Океан (содержание в частях на млн.) U Th K 2·10<sup>-3</sup> 10<sup>-5</sup> 4·10<sup>2</sup></p> <p>4. Урановая руда (содержание урана в руде 0,1%) На поверхности 2800 Внутри рудника (2·2800) 5600</p> <p>5. Фосфоритная руда (содержание урана 0,1—0,025%) На поверхности 280—700</p>		



Среднее содержание химических элементов в организме взрослого человека (средний вес 70 кг)

Элемент	% от общего веса	Содержание в граммах
Кислород	65,0	45 500
Углерод	18,0	12 600
Водород	10,0	7 000
Азот	3,0	2 100
Калий	1,5	1 050
Фосфор	1,0	700
Сера	0,25	175
Кальций	0,2	140
Натрий	0,15	105
Хлор	0,15	105
Магний	0,05	35
Железо	0,006	4
Медь	0,0002	0,1
Марганец	0,00003	0,02
Йод	0,00004	0,03

1. Человек, находящийся в густой толпе, получает от других людей дозу 2 *мр/год*
2. Ручные часы со светящимся циферблатом имеют активность  $10^{-8}$  *кюри*. Доза, получаемая средней частью тела человека, равна около 40 *мр/год*
3. Приборная доска самолета, насыщающаяся до 100 светящихся приборов (активность каждого  $3 \cdot 10^{-8}$  *кюри*), дает пилоту 1300 *мр/год*
4. Различные виды рентгеновского облучения

Облучаемое место	Доза, получаемая поверхностью тела, <i>мр</i>	Доза, получаемая гонадами, <i>мр</i>
Грудная клетка (сквозное)	160	0,36
Голова	4000	0,2
Поясница (сквозное)	5200	24
Флюороскопия (в мин)	2500	7

\* Таблица составлена в основном по данным Либби («Science», 122, 57, 1955).

Мы пришли, таким образом, к заключению, что доза, получаемая всем населением земного шара вследствие наличия естественного радиоактивного фона, значительно выше дозы, полученной населением в результате проводившихся до настоящего времени ядерных взрывов.

В приложении VI очень кратко рассматривается возможное действие ядерных взрывов на погоду. Делается вывод о том, что проводившиеся до сих пор взрывы не имели заметного влияния на погоду.

В приложении V рассматриваются вопросы радиоактивного заражения живых организмов в море вследствие заражения морской воды продуктами деления.

## *Приложение IV*

### **ЯДЕРНЫЕ ВЗРЫВЫ И ПОГОДА**

Часто задают вопрос о том, каково влияние ядерных взрывов на погоду. Делается, например, предположение, что огромное количество радиоактивной пыли, образующейся при ядерных взрывах и поднимающейся на большую высоту, заметно влияет на содержание в атмосфере ионов и, следовательно, на характер выпадения дождевых осадков. Под влиянием радиоактивной пыли может также в некоторой степени уменьшаться количество солнечной радиации, достигающей поверхности земли.

Мачта и Гаррис<sup>1</sup> (из бюро погоды США), изучая довольно необычные условия погоды в США в период 1950—1953 годов и возможную связь между погодой и ядерными взрывами, производившимися в тот период в Неваде, пишут: «Для выяснения вопроса, существуют ли какие-нибудь аномалии в погоде, связанные с действием атомных взрывов, проводилось изучение климатологических данных, а также ряда процессов, в результате которых, как предполагают, атомные взрывы влияют на погоду. Хотя невозможно окончательно определить, влияют ли ядерные взрывы на погоду, тем не менее на основании проведенного изучения можно считать, что такое влияние едва ли возможно. Результаты этого изучения говорят о следующем:

<sup>1</sup> Machta L., Harris D. L., *Science*, 121, 75, 1955.

1) Нет никакого теоретического основания считать, что любой из рассмотренных процессов может служить причиной значительных изменений погоды на расстоянии более нескольких километров от места взрыва.

2) 1953 год был годом необычно большого количества ураганов. Частично это можно отнести за счет чрезвычайно благоприятных для ураганов условий погоды. Частично же увеличение количества отмеченных ураганов можно объяснить улучшением метода сбора статистических данных.

3) Изучение температуры и количества осадков в США показывает, что никаких отклонений, связанных с ядерными взрывами, в температуре и количестве осадков не отмечено».

Саттон<sup>1</sup> (директор метеорологического управления, Англия) пытался найти возможную связь между термоядерными взрывами в марте 1954 года и заметным ухудшением погоды, наблюдавшимся в течение лета 1954 года в Англии и Западной Европе. Отмечая трудности, с которыми он столкнулся при изучении влияния взрывов на погоду, он пишет: «Погода в первую очередь реагирует на изменения климата, но поскольку в 1954 году на Британских островах не отмечалось никаких особых явлений, которые бы не наблюдались и в прошлые годы, то из этого можно сделать вывод, что влияние ядерных взрывов, если оно действительно имеет место, не превышает влияния обычных факторов, определяющих погоду. Чтобы обнаружить дополнительные изменения, необходим тщательный статистический анализ данных, полученных в течение ряда лет, который покажет «тенденции» в климате. Не менее серьезным затруднением является то, что пока не имеется точных данных о количестве термоядерных взрывов в 1954 году, а также о месте и времени проведения испытаний».

После рассмотрения различных факторов, которые могут предположительно влиять на погоду, Саттон приходит к заключению, что «состояние метеорологической науки в настоящее время не позволяет прийти к определенному выводу по этому вопросу; однако имеющиеся на сегодняшний день данные указывают на то, что проводившиеся испытания термоядерного оружия не могут являть-

---

<sup>1</sup> Sutton O. F., *Nature*, 175, 319, 1955.

ся причиной резких изменений погоды, наблюдавшихся на всем земном шаре в 1954 году».

Существует также предположение, что азотная кислота образуется при ядерном взрыве в таком большом количестве, что она может стать серьезной опасностью. Во время ядерного взрыва ударная волна, быстро двигаясь от центра взрыва, нагревает окружающий воздух и вызывает соединение кислорода и азота, которые образуют двуокись азота. Именно эта двуокись азота и придает облаку взрыва коричневатый оттенок.

Мартин<sup>1</sup> определил, что при взрыве с тротильным эквивалентом 20 млн. *т* образуется 0,5 млн. *т* азотной кислоты. В книге «The Effects of Atomic Weapons», 1950, приводится величина только 100 тыс. *т*.

Азотная кислота обычно образуется в атмосфере в результате разложения органических веществ, а также вследствие соединения азота и кислорода во время грозы. Кислотность обычного дождя (средняя величина рН равна 4—5) показывает, что азотная кислота образуется ежедневно в количестве примерно 100 тыс. *т*. Таким образом, для того чтобы удвоить обычное содержание азотной кислоты в атмосфере, потребовалось бы произвести несколько сот взрывов большой мощности в год<sup>2</sup>.

## Приложение V

### РАДИОАКТИВНОЕ ЗАРАЖЕНИЕ РЫБ И МОРСКИХ ОРГАНИЗМОВ

В течение нескольких месяцев после взрывов большой мощности, производившихся в марте 1954 года в южной части Тихого океана (Маршалловы острова), отмечались случаи заражения рыб, которых вылавливали на расстоянии 15—30 км от Тихоокеанского побережья Японии. При этом, однако, не наблюдалось сколько-нибудь значительного увеличения радиоактивности прибрежных вод. Небольшая часть пойманной рыбы была сильно заражена, однако в большинстве своем рыба (пойманная в марте

<sup>1</sup> Noel-Martin Ch., L'Heure H, a-t-elle sonné pour le monde?, Bernard Grasset, Paris, 1955.

<sup>2</sup> Dunning G. M., Effects of Nuclear Weapons Testing, *Scientific Monthly*, 81, 256, 1955.

1954 года) имела активность порядка  $10^{-4}$  мккюри на г в белом мясе и в 10—100 раз больше в красном мясе. Внутренние органы имели активность  $10^{-1}$ — $10^{-2}$  мккюри на г. Было обнаружено, что источником более половины всей активности являлся цинк 65. (Цинк 65 распадается в результате К- захвата электрона, период его полураспада—250 дней.) Это обстоятельство явилось для ученых полной неожиданностью, так как относительное содержание цинка 65 в продуктах деления очень мало. Содержание же этого изотопа в рыбе оказалось необычно большим по сравнению с содержанием его в зараженной радиоактивными веществами морской воде.

Кроме того, было установлено, что содержание некоторых радиоактивных элементов в микроорганизмах резко отличается от содержания их в окружающей эти микроорганизмы морской воде. Например, концентрация ванадия, содержащегося в морской воде, равна  $1 : 10^9$  (1 часть ванадия на 1000 млн. частей морской воды). В то же время кровь некоторых так называемых оболочников может содержать до 10% ванадия, то есть концентрация его в крови увеличивается в 100 млн. раз по сравнению с концентрацией его в морской воде. «Такое накопление можно сравнить с накоплением йода в щитовидной железе; избирательная способность некоторых организмов не уступает избирательной способности лучших аналитических реагентов, созданных человеком».

Интересно отметить, что на поверхности коричневой морской водоросли стронций может накапливаться в количестве, в 10—40 раз превышающем его концентрацию в морской воде. Красная морская водоросль (альга) может поглотить практически весь содержащийся в морской воде иттрий.

Многие продукты деления концентрируются в больших количествах в организме морских животных. Назовем отношение количества элемента, содержащегося в грамме общего веса морского животного, к количеству этого элемента, содержащемуся в одном грамме морской воды, «коэффициентом обогащения». Приводим значения коэффициента обогащения для некоторых продуктов деления<sup>1</sup>:

---

<sup>1</sup> R e v e l l e R. et al., Nuclear Science and Oceanography, The Proceedings of the International Conference on the Peaceful uses of Atomic Energy held at Geneva 1955 (коэффициенты обогащения взяты из этой работы).

Mo 600	Ge > 760
Ag 2000	Sn 270
Zn 3250	As 330
Cd 450	Sb > 30

Коэффициент обогащения в случае поглощения продуктов деления красной морской водорослью:

Zn 400 — 1400
Mo 2 — 15
Sr 8 — 90

Таким образом, мы приходим к заключению, что, как правило, в морских микроорганизмах, находящихся в зараженной радиоактивными веществами воде, накапливаются продукты деления, в результате чего радиоактивность этих микроорганизмов (на единицу веса) повышается в среднем в 1000 раз по сравнению с радиоактивностью морской воды. Радиоактивность планктона может увеличиваться в несколько тысяч раз. Радиоактивные вещества, содержащиеся в микроорганизмах, попадают в макроорганизмы, которые питаются микроорганизмами. Рыбы и другие макроорганизмы поглощают продукты деления не только с пищей, но и впитывают их непосредственно из воды в том случае, когда концентрация продуктов деления в воде является достаточно большой.

## П р и л о ж е н и е VI

Д.

### МОЩНОСТЬ ДОЗЫ ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ИСТОЧНИКОВ, НАХОДЯЩИХСЯ ВНУТРИ И ВНЕ ОРГАНИЗМА

#### Рентген. рад и бэр

Единицей измерения дозы рентгеновского и гамма-излучений является рентген. Рентген—это такое количество рентгеновского или гамма-излучения, которое при прохождении через воздух создает в 0,001293 г воздуха (то есть в 1 см<sup>3</sup> сухого воздуха при температуре 0° С и давлении 760 мм рт. ст.) число ионов, заряд которых одного знака равен одной электростатической единице (то есть  $\frac{1}{4,8} \cdot 10^{10}$  пар ионов).

Это соответствует поглощению 83 эрг энергии на 1 г воздуха, или 93 эрг на 1 г ткани. Следует отметить, что рентген может применяться только для измерения рентгеновского и гамма-излучений. Другие виды излучений в рентгенах не измеряются.

При поглощении биологической тканью определенного количества энергии поражение под действием ионизирующего излучения зависит не только от количества ионов, образующихся на единицу массы данной ткани, но также и от удельной ионизации, то есть от количества ионов, образующихся на единицу длины пробега падающих ионизирующих частиц. Для альфа-частиц удельная ионизация равна 4000 ионов на 1 мк ткани<sup>1</sup>.

Для вторичных электронов, которые вызывают ионизацию при прохождении гамма-лучей, удельная ионизация равна в среднем 20 ионам на 1 мк. При рассмотрении относительной биологической эффективности различных излучений удобно пользоваться следующими двумя единицами измерения: *рад* (физическая единица) и *бэр* (биологическая единица).

*Рад* соответствует поглощению 100 эрг энергии на 1 г ткани. Он может применяться при измерении всех видов ионизирующих излучений. 1 *рад* вызывает в каждом кубическом микроне облученной ткани образование двух ионизированных молекул и почти такого же количества возбужденных молекул. Как видно из определений рентгена и рада, для рентгеновского и гамма-излучения *рад* почти равен рентгену—всего на 10% больше.

Единица *бэр*, так же как и единица *рад*, применима ко всем ионизирующим излучениям. Доза, равная 1 *бэр* (для всех ионизирующих излучений), вызывает такое же биологическое поражение, какое вызывает 1 *рад* рентгеновского излучения (точнее—рентгеновские лучи с энергией 200—250 кэв)<sup>2</sup>. Таким образом, относительной биологической эффективностью ионизирующего излучения называется отношение дозы, выраженной в *бэр*, к той же дозе, выраженной в единицах *рад*. Мы здесь не будем подробно рассматривать относительную биологическую эффективность (о.б.э.) и ее изменение в зависимости от характера

<sup>1</sup> 1 мк=0,001 мм.

<sup>2</sup> Эта величина берется в связи с тем, что при практических наблюдениях в большинстве случаев имеют дело с рентгеновскими лучами такой энергии.

биологического материала, принятых критериев поражения, мощности дозы и других факторов. Существует тесная связь между о.б.э. и удельной ионизацией. Вместо удельной ионизации иногда предпочитают пользоваться понятием «линейного переноса энергии». Под «линейным переносом энергии» понимают энергию, перенесенную на материал на единицу длины пробега падающей ионизирующей частицы. Обзор литературы, недавно опубликованной по этому вопросу, содержится в «*The Annual Review of Physiology*», 1956.

В табл. 21 приведены значения удельной ионизации для нескольких типичных случаев<sup>1</sup>.

Опыты, проводившиеся с крысами<sup>2</sup>, показали, что 50%-ная смертельная доза (LD-50) для рентгеновских лучей и для гамма-лучей, испускаемых при атомном взрыве, составляет соответственно 650 р и 680 р. Отсюда можно определить относительную биологическую эффективность гамма-излучения при атомном взрыве:

$$\text{о. б. э.} = \frac{\text{LD-50}_{\text{X-лучи}}}{\text{LD-50}_{\text{гамма-лучи}}} = \frac{650}{680} = 0,96$$

Таблица 21

Удельная ионизация различных излучений

Излучение	Число пар ионов на 1 мг ткани (приблизительно)	о.б.э.
Х-лучи (250 кэ) . . . . .	~80	1,0
Гамма-лучи Co 60 (1,33; 1,7 Мэв) . . . . .	~10	1,0
Гамма-лучи (4 Мэв) . . . . .	~10	0,6
Бета-лучи (третий) . . . . .	~180	1,59
Протоны (0,6 Мэв) . . . . .	~2000	1,6
Альфа-лучи (2,4 Мэв) . . . . .	~4000	1,6

<sup>1</sup> Furchner J., Relation Between Specific Ionization of Various Radiations and Their Relative Biological Effectiveness in Mammalian System, LA-1849, USAEC, 1954.

<sup>2</sup> Cronkite E. P. et al., Science, 122, 148, 1955.



Помещаемая ниже табл. 22 содержит данные, с помощью которых можно определить дозу нейтронов, полученную человеком<sup>1</sup>:

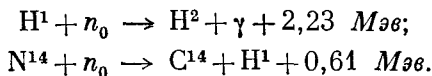
Таблица 22

Энергия нейтронов	Поток нейтронов на 1 см <sup>2</sup> , соответствующий дозе 1 бэр
0,025 эв (тепловые) . . . . .	9,6 · 10 <sup>8</sup>
10 эв . . . . .	4,8 · 10 <sup>8</sup>
10 эв . . . . .	4,8 · 10 <sup>8</sup>
0,1 Мэв . . . . .	9,6 · 10 <sup>7</sup>
0,5 Мэв . . . . .	3,84 · 10 <sup>7</sup>
1 Мэв . . . . .	2,88 · 10 <sup>7</sup>
2 Мэв . . . . .	1,92 · 10 <sup>7</sup>
3 Мэв и выше . . . . .	1,44 · 10 <sup>7</sup>

Следует знать также следующие соотношения:

$$1 \text{ бэр} = \begin{cases} 1 \text{ рад для рентгеновского и гамма-излучений;} \\ 1 \text{ рад для бета-излучения;} \\ 0,1 \text{ рад для протонов (с энергией менее 10 Мэв);} \\ 0,05 \text{ рад для тяжелых частиц отдачи.} \end{cases}$$

В случае облучения тепловыми нейтронами важнейшими реакциями в тканях являются следующие:



Подсчитано, что основную часть биологической дозы дает реакция  $\text{N}^{14}(n_0, \text{H}^1)\text{C}^{14}$ . При облучении быстрыми нейтронами основным процессом переноса энергии в ткань является процесс столкновения  $n-p$  (нейтрон—протон)<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Сообщение комиссии по атомной энергии США от 11.7. 1955 года. См. также «Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (Revised Dec. 1, 1954)», *British Journal of Radiology, Supplement № 6*, 1955.

<sup>2</sup> М о у е r В. J., Neutron Physics of Concern to the Biologist, *Radiation Research*, 1, 10, 1954.

## Поток энергии и рентген

Для материалов, состоящих из легких элементов и для значений энергии гамма-излучения в пределах от 0,08 до 2,5 Мэв массовый коэффициент поглощения  $\mu$  остается почти постоянным (величина изменения его не более 10%).

$$\text{При этом } \mu = \frac{\text{Линейный коэффициент поглощения}}{\text{Плотность}} = \frac{k}{\rho}.$$

Величина линейного коэффициента поглощения в воздухе для гамма-квантов с энергией 1 Мэв равна  $\frac{3,6 \cdot 10^{-5}}{0,001293} = 0,028^{-1} \text{ г.}$

Энергия, поглощенная 1 г воздуха при интенсивности падающего пучка  $I$ , равна, таким образом,  $0,028 I \text{ эрг/г.}$  Поскольку рентген соответствует поглощению 83 эргов энергии на 1 г, величину для дозы, равной 1 р, можно определить следующим образом:

$$0,028 I = 83$$

или

$$\begin{aligned} I &= 3 \cdot 10^3 \text{ эрг/см}^2 \\ &= 2 \cdot 10^9 \text{ Мэв/см}^2 \end{aligned}$$

Если энергию гамма-квантов мы обозначим  $E$ , то доза в 1 р будет соответствовать падающему пучку  $\frac{2 \cdot 10^9}{E}$  гамма-квантов на  $1 \text{ см}^2$ , где  $E$ —в Мэв.

**Доза гамма-излучения, испускаемого радиоактивными веществами, находящимися на плоской поверхности**

Рассмотрим площадь (достаточно большую по сравнению со средней длиной свободного пробега  $l$  фотона), на которой равномерно распределен радиоактивный материал, испускающий гамма-лучи. Определим величину дозы в точке  $P$  на высоте  $h$  над поверхностью площади.

Разделив площадь на круговые зоны, с помощью интегрирования определим величину полного потока гамма-излучения в точке  $P$ :

$$\text{Поток} = \frac{\sigma}{2} \int_h^{\infty} [\exp(-kR)] R^{-1} dR = -\frac{\sigma}{2} [Ei(-kh)],$$

где  $\sigma$ —общая энергия гамма-излучения, испускаемого на единицу площади поверхности в сек., а  $k$ —линейный коэффициент поглощения (включая рассеяние) для рассматриваемых фотонов;  $k=\mu_r$ —средняя длина свободного пробега  $l$  порядка  $\frac{1}{k}$ .

Если удельная активность поверхности  $q$ —кюри на  $1 \text{ км}^2$  ( $1 \text{ кюри}=3,7 \cdot 10^{10}$  распадов в сек.) и энергия гамма-квантов— $E \text{ Мэв}$ , то  $\sigma=0,55 E q \text{ Мэв на } 1 \text{ см}^2/\text{сек}$ , и отсюда доза в рентгенах в день равна

$$= \frac{0,55 E q [Ei(-kh)]}{2 \cdot 2 \cdot 10^9} \cdot 86\,400,$$

или

$$= 1,2 \cdot 10^{-5} E q [Ei(-kh)].$$

Для продуктов деления средняя энергия гамма-кванта равна  $0,7 \text{ Мэв}$ , отсюда для  $4 \cdot 10^3 \text{ кюри на } 1 \text{ км}^2$  на высоте около  $1 \text{ м}$  над поверхностью мощность дозы будет равна  $1 \text{ р}$  в день. Изменение дозы с высотой определяется величиной экспоненциального интеграла  $-Ei(-kh)$ , где  $k=1,0 \times 10^{-4} \text{ см}^{-1} - 10 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$ .

Таблица 23

$h$ (метры)	$[-Ei(-kh)]$
0,3	5,23
1	4,14
10	1,92
30	0,91

**Доза излучения, получаемая человеком в результате естественного радиоактивного фона**

Подсчитаем, чему равна доза, получаемая человеком в результате присутствия в верхнем слое земли таких радиоактивных веществ, как уран, торий и калий, а также в результате присутствия в организме человека радиоактивных изотопов  $\text{K } 40$  и  $\text{C } 14$ .

Рассмотрим бесконечную однородную радиоактивную среду. Поскольку поток излучения должен быть (вследствие симметрии) одинаковым в любой точке среды, излучение, поглощенное в любой точке среды, должно быть равно излучению, испускаемому в этой точке. Предполагая, что массовый коэффициент поглощения излучения для данной среды примерно равен массовому коэффициенту поглощения для биологической ткани человеческого организма, получаем следующее выражение, определяющее дозу в *рад/сек*:

$$\text{Доза} = W \cdot 1,6 \cdot 10^{-8}, \quad (1)$$

где  $W$  — энергия, излучаемая в секунду на грамм среды, выраженная в *Мэв*. В табл. 24 даются значения  $W$  для урана, радия, тория, калия и углерода.

Таблица 24

Элемент	Период полураспада, годы	Энергия испускаемого излучения, <i>Мэв</i>	Общая энергия, излучаемая в <i>сек/г</i> материала ( $W$ <i>Мэв</i> )
Уран (в равновесии с продуктами распада: ряд U=Ra)	$4,5 \cdot 10^9$	3,217 (гамма)	$4,0 \cdot 10^4$ (гамма)
Ra (с продуктами распада)	$1,62 \cdot 10^9$	2,327 (гамма)	$8,4 \cdot 10^{10}$ (гамма)
Торий (в равновесии с продуктами распада: ряд Th)	$1,39 \cdot 10^{10}$	2,17 (гамма)	$8,9 \cdot 10^3$ (Гамма)
Калий 40 (180 гамма-квантов в <i>мин/г</i> природного калия)	$1,3 \cdot 10^{10}$	1,45 (гамма)	4,35 (гамма)
Калий 40 (1800 бета-частиц в <i>мин/г</i> природного калия)	$1,3 \cdot 10^9$	0,544 (бета, ср.)	16,32 (бета)
Углерод 14 (15 бета-частиц в <i>мин/г</i> природного углерода)	$5,6 \cdot 10^3$	0,0668 (бета, ср.)	0,0167 (бета)

В табл. 25 приводится относительная распространенность некоторых, представляющих интерес элементов.

	Относительная распространенность, г/г			Общая доза гамма-излучения, р/год
	U	Th	K	
Гранит . . . .	$4 \cdot 10^{-6}$	$13 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-2}$	0,102
Осадочные породы . . . .	$3 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-3}$	0,026
Океан . . . .	$2 \cdot 10^{-9}$	$10^{-11}$	$4 \cdot 10^{-4}$	0,0004

С помощью уравнения (1) и приведенных выше таблиц мы можем легко вычислить дозу, получаемую человеком на поверхности земли, если будем исходить из предположения, что массовые коэффициенты поглощения являются одинаковыми в случае горной породы и биологической ткани. Величину, получаемую из уравнения (1), необходимо разделить на 2, поскольку в данном случае излучение исходит только от одной стороны поверхности. Значения мощности дозы, полученные таким путем, приводятся в последней колонке табл. 22.

Уравнением (1) можно также пользоваться для определения дозы, которую организм (или любой отдельный орган) получает вследствие присутствия в нем радиоактивных веществ. В случае бета-излучения, при котором пробег частиц сравнительно мал, организм можно считать бесконечной средой, и поэтому уравнение (1) применимо. В случае же гамма-излучения, когда организм нельзя считать бесконечной средой, следует предположить, что только половина испускаемого излучения поглощается организмом человека. Значения мощности дозы, приведенные в табл. 20, могут быть, таким образом, легко получены.

Применяя уравнение (1), определим величину максимально допустимого содержания радиоактивного стронция в организме ( $q$ ), которое довольно подробно рассматривалось в предыдущей главе. Радиоактивный стронций, как нам известно, накапливается в костях скелета. Вес скелета «нормального» человека равен 7 кг. При определении максимально допустимого общего содержания радиоактивного вещества в организме мы исходим из предположения, что в результате присутствия данного радиоак-

тивного вещества ( $q$ ) в определенных важных органах (в данном случае в костях) эти органы получают в неделю дозу излучения, равную  $0,3 \text{ бэр}$ . Измеряя  $q$  в микроюри, из уравнения (1) мы получаем

$$\frac{0,3}{N} = \frac{q \cdot 3,7 \cdot 10^4 \cdot 1,6 \cdot 10^{-8} \cdot E \cdot 6,05 \cdot 10^5}{7 \cdot 10^3}, \quad (2)$$

где  $E$ —средняя энергия (в  $M\text{эв}$ ) бета-излучения, испускаемого радиоактивным стронцием. При этом средней энергией считается энергия, равная по величине 40% максимальной энергии бета-частиц. Коэффициент  $N$ , который введен в уравнение (2) [в уравнении (1) он отсутствует], называется коэффициентом неоднородного распределения. Согласно рекомендациям Международной комиссии по защите от радиоактивного излучения, коэффициент  $N$  для всех радиоактивных веществ, являющихся излучателями альфа- и бета-частиц и отлагающихся в костях, равен 5. При неоднородном распределении радиоактивного вещества в организме величина максимально допустимого содержания этого вещества в организме уменьшается. Подставляя в уравнение вместо  $N$  его значение, равное 5, мы получаем, что для стронция 89 ( $E_{\text{max}} = 1,46 M\text{эв}$ ) величина  $q$  равна 2 мкюри.

Стронций 90 является бета-излучателем ( $E_{\text{max}} = 0,6 M\text{эв}$ ). Его дочерний продукт иттрий 90 также бета-излучатель ( $E_{\text{max}} = 2,2 M\text{эв}$ ). Так как период полураспада иттрия 90 равен всего 61 часу, стронций 90 и иттрий 90 в организме находятся в равновесном состоянии. Из этого следует, что общая энергия, излучаемая при одном распаде стронция 90, равна  $2,8 M\text{эв}$ . Подставляя эту величину в уравнение (2), мы получаем, что  $q = 1 \text{ мкюри}$ .

### Доза, получаемая вследствие действия космических лучей

Под действием космических лучей в  $1 \text{ см}^3$  воздуха на уровне моря образуется около 2 пар ионов в 1 сек. Это соответствует дозе около 30 миллирентгенов в год. Для других высот соответствующая доза может быть легко подсчитана, если мы будем знать величину изменения интенсивности космических лучей с изменением высоты.

# Приложение VII

Максимально допустимое содержание радиоактивных веществ в организме (q) и максимально допустимые концентрации радиоактивных веществ в воздухе и воде при продолжительном облучении

Радиоактивные вещества	Вид излучения	Энергия излучения (Мэв)*	Орган, в котором вещество оседает	Максимально допустимое содержание в организме (q), мккюри	Максимально допустимая концентрация в воздухе, мккюри/см <sup>3</sup>	Максимально допустимая концентрация в воде, мккюри/см <sup>3</sup>
H <sup>3</sup> (НТО или Т <sub>2</sub> O) C <sup>14</sup> (CO <sub>2</sub> )	Бета-	0,018 (а)	Весь организм Жирные отложения	10 <sup>4</sup>	10 <sup>-5</sup>	0,2
	Бета-	0,155 (а)		260	10 <sup>-5</sup>	3·10 <sup>-3</sup>
Na <sup>24</sup>	Бета-	1,39 (а)	Весь организм	15	2·10 <sup>-6</sup>	8·10 <sup>-3</sup>
	Гамма	1,37; 2,75				
P <sup>32</sup>	Бета-	1,701 (а)	Кости	10	10 <sup>-7</sup>	2·10 <sup>-4</sup>
S <sup>35</sup>	Бета-	0,168 (а)	Кожа	300	10 <sup>-6</sup>	5·10 <sup>-3</sup>
Cl <sup>36</sup>	Бета-	0,714 (а)	Весь организм Кровь	230	6·10 <sup>-7</sup>	4·10 <sup>-3</sup>
Fe <sup>55</sup>	(захват электрона) Гамма			10 <sup>3</sup>	7·10 <sup>-7</sup>	5·10 <sup>-3</sup>
Fe <sup>59</sup>	Бета-	0,460	Кровь	13	2·10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-4</sup>
	Гамма	0,257 (а) 1,295; 1,10				
Sr <sup>90</sup> + Y <sup>90</sup> 1. Sr <sup>90</sup> 2. Y <sup>90</sup>	Бета-	0,61 (а)	Кости	1	2·10 <sup>-10</sup>	8·10 <sup>-7</sup>
	Бета-	2,2 (а)				

Радиоактивные вещества	Вид излучения	Энергия излучения (Мэв)*	Орган, в котором вещество оседает	Максимальное содержание в организме (г), микро	Максимально допустимая концентрация в воздухе, микрог/см <sup>3</sup>	Максимально допустимая концентрация в воде, микрог/см <sup>3</sup>
U <sup>235</sup>	Бета <sup>-</sup>	0,608; 0,335 и др. (а)	Щитовидная железа	0,6	6·10 <sup>-9</sup>	6·10 <sup>-8</sup>
	Гамма	0,364; 0,638 и др.				
Ra <sup>226</sup>	Альфа	4,777	Кости	0,1	8·10 <sup>-12</sup>	4·10 <sup>-6</sup>
Pb <sup>210</sup>	Гамма	0,186				
	Альфа	5,15				
(растворимый) (нерастворимый) Любая смесь альфа-излучателей	Гамма	0,053; 0,100 и др.	Кости Легкие	0,04 0,02	2·10 <sup>-12</sup> 2·10 <sup>-12</sup> 5·10 <sup>-12</sup>	6·10 <sup>-6</sup>  10 <sup>-7</sup>
	Любая смесь продуктов деления					
	(бета, гамма)					

\* (а) величины относятся к максимальной энергии бета-излучения.

Таблица основана на данных, взятых из рекомендаций Международной комиссии по защите от радиоактивного излучения, 1954 год.



## Глава VI

### ГЕНЕТИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ

В настоящей главе рассматривается генетическое действие ядерных взрывов на человека. Это серьезный и глубокий вопрос. В целом проблема генетического влияния ядерных и других ионизирующих излучений на живые организмы очень сложна и трудна. Однако если остановиться только на самых существенных моментах, что мы и намереваемся сделать, то достаточно ясное изложение существа вопроса (иногда, правда, за недостатком места очень краткое) не будет слишком трудным делом<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Из целого ряда работ по данному вопросу, опубликованных в последнее время, следует отметить следующие:

1. Muller H. J., How Radiation Changes the Genetic Constitution, *Bulletin of the Atomic Scientists*, 11, 329, 1955.

2. Westergaard M., Man's Responsibility to his Genetic Heritage, *Bulletin of the Atomic Scientists*, 11, 318, 1955.

3. Haldane J. B. S., The Genetic Effects of Atomic Bomb Explosions, *Current Science*, 24, 399, 1955.

4. Slatis H. M., Current Status of Information on the Induction of Mutations by Irradiation, *Science*, 121, 817, 1955. Вызывает недоумение то обстоятельство, что работа Мюллера (1), который в 1927 году сделал важнейшее открытие—появление мутаций в результате воздействия ионизирующих излучений,—предназначенная для доклада на Женевской конференции по мирному использованию атомной энергии (август 1955 года), не была представлена и не обсуждалась на конференции.

Журнал «*Science*» (122, 813, 1955) пишет в редакционной статье «Мюллер и Женевская конференция»:

«Огромное значение в наше время имеет свободное и открытое обсуждение всех возможных опасных последствий действия радиации. Только таким путем можно прийти к правильной оценке опасности, связанной с радиацией, и предпринять необходимые шаги для уменьшения или уничтожения этой опасности. Нет никакого правила, которое помогло бы определить так называемую «допустимую дозу». В справочнике № 52 Национального бюро стандартов США, где дается определение этого термина, совершенно ясно сказано, что

Общий вывод, который можно сделать на основании рассматриваемого в данной главе материала, сводится к следующему: *даже самые малые дозы ионизирующих излучений оказывают вредное генетическое действие на человека*, однако нельзя утверждать (хотя это еще точно не установлено), что доза излучения, полученная в результате глобального выпадения радиоактивной пыли вследствие проводившихся до сих пор ядерных испытаний, приведет к заметным генетическим последствиям. Для того чтобы эти последствия были ощутимыми, количество ядерных взрывов (большой мощности) должно быть в 5—10 раз больше того количества взрывов, которое насчитывается на сегодняшний день.

## ХРОМОСОМЫ И ГЕНЫ

Чтобы убедиться в правильности указанного вывода, следует сначала рассмотреть в общих чертах, что представляют собой *хромосомы, гены и мутации*.

Каждый живой организм начинает свое существование в виде отдельной клетки. Возьмем, например, человека. Когда человек появляется на свет, его организм уже представляет собой колоссальную организацию клеток—всего примерно  $10^{12}$  клеток, хотя за 40 недель до этого момента существовала всего одна клетка размером 0,25 мм—продукт слияния сперматозоида (мужской зародышевой клетки) и яйца (женской зародышевой клетки). Оплодотворенное яйцо (отдельная клетка, являющаяся началом развития человеческого организма) содержит 24 пары микро-

---

допустимая доза, равная 0,3 р в неделю при облучении всего организма человека, относится только к взрослому населению, причем облучению в этом случае подвергаются только небольшие группы людей. При облучении детей и больших групп населения указанную дозу рекомендуется уменьшить в 10 раз. Ввиду открывающихся перспектив все более широкого использования атомной энергии в мирных целях трудно сейчас определить верхний предел облучения для больших групп населения. В настоящее время уже установлены нормы, которыми руководствуются при облучении, и если они окажутся несоответствующими, их будет очень трудно изменить.

Таким образом, существует ряд причин практического порядка, которые вместе с другими причинами, относящимися ко всем временам и ко всем формам знания, требуют борьбы против любого авторитарного или произвольного подавления открытого обсуждения опасностей воздействия радиации на человека.

скопических нитевидных хромосом<sup>1</sup>, причем все 24 пары хромосом отличаются одна от другой. При этом следует указать на то, что для каждого биологического вида количество хромосом, содержащихся в клетке, является совершенно определенным и характерным именно для данного вида. Так, для человека количество хромосом в клетке равно 48, для мыши—40, для плодовой мушки (*Drosophila melanogaster*)—8, для маиса—20 и т. д. Один член пары хромосом происходит от сперматозоида, а другой—от яйца. Оба члена пары называют гомологичными хромосомами (homologous chromosomes). Из 24 пар хромосом, содержащихся в клетке у человека, у 23 пар оба члена в каждой паре одинаковы, а у последней пары хромосом, которые определяют пол индивидуума (sex chromosomes), оба члена хромосом являются одинаковыми в случае женского пола, но различными в случае мужского<sup>2</sup>. Женскую пару хромосом можно представить как (X, X), а мужскую—как (X, Y). Хромосомы, определяющие пол, называют иногда аллерсомами (allersomes), а все остальные—автосомами (autosomes).

Возвратимся к оплодотворенному яйцу (zygote). Оно начинает делиться, и примерно к концу дня произойдет первое деление (mitosis), в результате которого образуются две дочерние клетки, каждая из которых имеет полный комплект 48 хромосом. Это хромосомы первоначального оплодотворенного яйца. Обе дочерние клетки также делятся, и, таким образом, процесс деления продолжается до тех пор, пока через 40 недель (когда происходит рождение ребенка) количество клеток не станет равным в среднем  $10^{12}$ , что соответствует 43 поколениям клеток первоначальной оплодотворенной клетки. Эти клетки также претерпевают деление в течение последующей жизни человека. Таким образом, в продолжение всей жизни чело-

---

<sup>1</sup> Мы здесь не рассматриваем случай партеногенеза (parthenogenesis) или размножения без оплодотворения (syngamy), который происходит у некоторых насекомых и растений. Трутни у пчел производятся в результате партеногенеза. У трутня только одна группа хромосом, полученных от пчелы (матки); группа хромосом, получаемая от пчелы-отца, отсутствует, так как у трутня нет пчелы-отца. Трутень является гаплоидом (haploid). Человек же является диплоидом (diploid), так как он имеет две группы хромосом: «материнскую группу» и «отцовскую группу».

<sup>2</sup> Это относится ко всем млекопитающим. У птиц и некоторых насекомых наблюдается обратное явление.

века «рождается» всего 50 поколений клеток. Во время всего этого процесса хромосомное содержание многих миллионов рождающихся клеток в точности повторяет хромосомное содержание первоначальной оплодотворенной клетки, явившейся началом развития человеческого организма. Исключение составляют *зародышевые клетки*—сперматозоиды у особей мужского пола и яйцеклетки у особей женского пола. (Изменения, наблюдаемые в хромосомах, называемые мутациями, будут рассмотрены позже.) Зародышевые клетки также образуются в результате деления клеток, однако это деление является *редукционным* (meiosis), когда число хромосом уменьшается вдвое. При делении материнской клетки на 2 дочерних 24 пары хромосом, которые находятся в материнской клетке, разделяются на две группы. При этом каждая пара хромосом разъединяется таким образом, что каждый из членов пары попадает в отдельную дочернюю клетку. В результате в дочерних зародышевых клетках (gametes) содержится только по 24 хромосомы<sup>1</sup>. Число вариантов распределения на 2 группы при делении очень велико. Так как на месте каждой из 24 хромосом дочерней клетки может оказаться либо один, либо второй член пары гомологичных хромосом, то всего насчитывается  $2^{24}$  вариантов распределения, то есть около 10 млн. В каждой зародышевой клетке одни хромосомы принадлежат к материнской стороне первоначальной оплодотворенной яйцеклетки (zugote), а другие—к отцовской. Но в различных зародышевых клетках, которые все произошли от одной и той же оплодотворенной яйцеклетки, материнские и отцовские хромосомы смешаны в самых различных сочетаниях, всего таких сочетаний насчитывается, как мы уже знаем, около 10 млн.<sup>2</sup>

Возникает вопрос: каким образом в первоначальной оплодотворенной клетке, которая совершает единствен-

---

<sup>1</sup> Это очень упрощенное объяснение процесса. Рассмотрим процесс более детально, беря лучший изученный случай особи мужского пола. В этом случае spermatogonium (клетка диплоида) развивается в первичный (spermatocyte), который подвергается редукционному делению, образуя два вторичных сперматоцита (гаплоида). Каждый из них путем обычного деления (mitosis) образует две дочерние клетки. Таким образом, получается четыре (spermatids), которые созревают в сперматозоиды (spermatozoa); созревшие зародышевые клетки, яйцеклетка и сперматозоид, называются гаметами.

<sup>2</sup> В течение жизни у мужчины образуется примерно  $10^{12}$  сперматозоидов, а у женщин— $5 \cdot 10^3$  яйцеклеток.

ный в своем роде удивительный путь роста и развития— онтогенезис (ontogenesis), содержатся определенные задатки, которые приводят к тому, что эта клетка развивается в человеческое существо, причем совершенно определенное существо, отличное от всех других человеческих существ, живых, мертвых и еще не рожденных? Почему оплодотворенная яйцеклетка человека развивается и превращается именно в человеческое существо, а не в обезьяну или манговое дерево? Другими словами, каким образом определенные задатки наследственности сохраняются в клетке? Едва ли необходимо объяснять, что до сих пор еще не найден достаточно полный ответ на эту загадку жизни. Однако в общих чертах это явление можно объяснить с помощью хромосомогенной теории. Уэстергаард пишет: «Когда-нибудь будет признано всеми, что одним из важнейших достижений нашего века является современная теория биологической наследственности, известная под названием «хромосома-генной теории», ибо все увидят, что эта теория произвела революцию не только в естественных науках, но также и в технических науках, медицине и даже гуманитарных науках. В биологии произведен коренной поворот вследствие того, что основная биологическая проблема—процесс органического развития—впервые начала рассматриваться с правильной, научной точки зрения».

Гены тесно связаны с хромосомами: каждая хромосома имеет до тысячи генов. Человеческая клетка, например, имеет 20 000 генов, возможно, и больше. Они расположены вдоль хромосом в линейном порядке, как бусы на нитке. Гены представляют собой чрезвычайно стабильные гигантские химические молекулы, состоящие из четырех нуклеотидов и содержащие около 1 млн. атомов каждая.

Гены являются материальными носителями определенных наследственных признаков (анатомических, физиологических и психологических). Они определяют все унаследованные и прирожденные *черты* человека. Из всего того, что было сказано о хромосомах, вполне очевидно, что все соматические клетки человеческого организма, то есть все клетки, кроме зародышевых, имеют одинаковое содержание генов, идентичное содержанию генов в оплодотворенной клетке (zigote), которая явилась началом развития организма. Совершенно противоположное мы наблюдаем у зародышевых клеток. В них, безусловно,

гены также являются идентичными генам первоначальной оплодотворенной клетки (хотя число их вдвое меньше)<sup>1</sup>. Но поскольку число вариантов распределения хромосом ( $2 \times 24$ ) на 2 равные группы мейозе является чрезвычайно большим, вероятность того, что 2 какие-нибудь зародышевые клетки в организме человека будут иметь идентичные гены, ничтожно мала.

«Гены определяют, принадлежит ли человек к группе крови А или О, рождается ли он с нормальным зрением или же его зрение поражено одним из видов наследственной слепоты, имеет ли он глаза черные, голубые или карие, толстеет ли он при обильном питании или остается худым, заложены ли в нем музыкальные способности или нет и так далее, можно перечислять бесконечно различные черты, которые все вместе составляют физический и психический облик человека»<sup>2</sup>.

Гены определяют, таким образом, общую форму или верхний и нижний пределы, внутри которых происходит выражение наследственных признаков человека. В этих общих пределах действительное проявление их будет зависеть от окружающей среды, в которой находится человек. Таким образом, на развитие индивидуума влияют *генотип* и окружающая среда, то есть природа и воспитание, причем генотип определяет те узкие рамки, в пределах которых может происходить это развитие. Часто один ген несет в себе более одного признака (*pleiotropy*). В то же время определенный признак может определяться сочетанием нескольких генов.

Мы уже знаем, что в соматических клетках имеется 2 группы хромосом: одна—материнская, другая—отцовская, причем каждая хромосома в одной группе имеет своего партнера (гомолога) в другой группе. Далее, каждый ген в хромосоме имеет обычно своего двойника (*allele*), занимающего соответствующее место (*locus*) в гомологичной хромосоме. Этот двойник является разновидностью одного и того же гена: они оба контролируют один и тот же наследственный признак.

Клетка организма содержит двойной комплект генов. Исключением является X-хромосома (она длиннее Y-хро-

<sup>1</sup> Исключение составляют случаи мутации, о которых речь будет идти ниже.

<sup>2</sup> Auerbach C., *Genetics in the Atomic Age*, Oliver and Boyd, London, 1956.

мосомы), которая несет много генов, не имеющих двойников в Y-хромосоме. Эти гены, называемые генами, определяющими пол, играют исключительно важную роль в изучении генетики.

Если у человека определенный ген и его двойник в гомологичной хромосоме, или, иначе говоря, два одинаковых гена в гомологичных хромосомах, являются идентичными, то человека называют гомозиготным в отношении данного гена. Если же две разновидности гена не являются идентичными, человек по отношению к данному гену является гетерозиготным. Некоторые гены имеют несколько «дублеров» (например, ген, определяющий основную группу крови, имеет три дублера).

Существуют понятия *доминантный* и *рецессивный* гены (или, вернее, разновидности гена), с которыми нам необходимо познакомиться. Возьмем в качестве примера ген, определяющий цвет глаз. Рассмотрим две разновидности этого гена, из которых одна соответствует голубому цвету глаз, а другая—карему. Если человек унаследовал одну разновидность данного гена, соответствующую голубому цвету глаз, а другую—карему цвету, то в действительности цвет его глаз не будет каким-то средним цветом между голубым и карим. Его глаза будут иметь определенный цвет, а именно карий. Разновидность гена, соответствующая карим глазам, подавляет проявление признака голубого цвета глаз, характерного для другого гена. Разновидность гена, соответствующая карим глазам, называется доминантной, а разновидность, соответствующая голубым глазам,—рецессивной. Обычно принято доминантную разновидность определенного гена обозначать заглавной буквой (доминантную разновидность, соответствующую карему цвету глаз, обозначим В), а рецессивную—маленькой буквой (рецессивную разновидность гена, соответствующую голубому цвету глаз, обозначим в). Рецессивная разновидность гена не может проявлять себя в присутствии доминантной<sup>1</sup>. Таким образом, голубые глаза

---

<sup>1</sup> Ген, определяющий пол, у индивидуума мужского пола, даже в том случае, когда ген является рецессивным, всегда имеет возможность проявить себя, так как он не имеет партнера (или разновидности) в Y-хромосоме. В случае индивидуума женского пола рецессивный ген в X-хромосоме не сможет проявить себя, если другая X-хромосома несет доминантную его разновидность. Признак, контролируемый геном, определяющим пол, называют признаком, свя-

у человека могут быть только в том случае, когда обе разновидности гена цвета глаз будут рецессивными (b, b). В случае (B, B) и (B, b) глаза будут иметь карий цвет. Очень важно отметить, что хотя (B, B) и (B, b) отличаются с генетической точки зрения, тем не менее в отношении цвета глаз их проявление (фенотип) одинаково.

В качестве другого интересного примера можно взять ген, определяющий прямые и вьющиеся волосы. В этом случае доминантной является разновидность гена, определяющая вьющиеся волосы. Таким образом, генотип является определяющим в отношении фенотипа, а не наоборот<sup>1</sup>.

Выше мы говорили о том, что разновидности генов могут быть доминантными и рецессивными. Следует указать на то, что доминантность разновидности никогда не бывает полной. Как правило, рецессивная разновидность гена (особенно, если она несет вредный признак), находясь вместе с доминантной разновидностью, оказывает свое действие, которое является слабым, но все же

занным с полом. У людей дальтонизм и гемофилия являются наиболее характерными примерами, связанными с полом.

Гены основных групп крови А, В и О являются ярким примером автозомных генов, то есть генов, не принадлежащих к хромосомам половых клеток. (Изучение групп крови наиболее способствовало изучению наследственных признаков у человека.) Приводим разновидности генов и соответствующие им группы крови:

Разновидность генов.....	AA	BB	OO	AO	BO	AB
Группа крови.....	A	B	O	A	B	AB

Разновидности А и В являются доминантными по отношению к разновидности О, но они равны по силе между собой (никто из них не доминирует друг над другом).

<sup>1</sup> Заметим, что в результате брака двух индивидуумов с карими глазами (B, b) и (B, b) у них может родиться ребенок с голубыми глазами (b, b). При этом варианты рождения ребенка с карими или голубыми глазами имеют следующую пропорцию: (B, B)— $\frac{1}{4}$ ; (B, b)— $\frac{1}{2}$  и (b, b)— $\frac{1}{4}$ . Это означает, что в среднем на каждые три ребенка с карими глазами приходится один с голубыми (в этом случае сочетание генов у ребенка отличается от сочетания генов у родителей).

Если предположить, что ген человека имеет в среднем 2 разновидности, то 10 000 генов, содержащихся у человека, дадут сверхастрономическую цифру возможных генотипов человека— $10^{3600}$ . (По сравнению с этим число атомов во вселенной может показаться ничтожно малым.) Большое количество генотипов будет, очевидно, нежизнеспособным. Вот почему не может быть двух одинаковых людей (умерших, живых или тел, которые еще не родились), которые бы имели один и тот же генотип (за исключением близнецов) или один и тот же фенотип.



заметным. Таким образом, проявление рецессивного признака подавляется не полностью. Это обстоятельство имеет большое значение в связи с мутациями, к рассмотрению которых мы переходим.

## МУТАЦИИ

Как известно, гены являются чрезвычайно устойчивыми и, не претерпевая изменений, переходят от одного поколения к другому. Время от времени, но очень редко, они все же претерпевают спонтанное (молекулярное) изменение, в результате чего возникает новая разновидность первоначального гена. Такая мутация называется *спонтанной*, или *естественной*. Разновидность гена, образовавшаяся в результате мутации, является такой же устойчивой, как и первоначальный ген, переходит неизменной от поколения к поколению до тех пор, пока она в свою очередь не подвергнется мутации или же прекратит свое существование вследствие преждевременной смерти человека или в случае, когда человек не оставит после себя потомства. Вероятность того, что ген человека в течение жизни одного поколения подвергнется естественной мутации, то есть мутации, вызванной естественными причинами, а не искусственным изменением естественной окружающей среды, равна 0,00001 (для некоторых генов). Это доказано прямыми статистическими наблюдениями. Проводившиеся до настоящего времени подсчеты естественных мутаций у человека относятся к очень небольшому числу генов (всего около 15 из общего количества более 10 тыс.), которые несут признаки некоторых легко распознаваемых наследственных болезней (например, гемофилия) или уродства (например, хондродистрофическая неразвитость—неравномерный рост отдельных частей тела). Болезнь или уродство, вызванные спонтанной мутацией, проявляются в потомстве «нормальных» людей и переходят к потомкам, имеющих эту болезнь или уродство людей в соответствии с законом наследственности Менделя. В табл. 26 приводятся несколько характерных примеров<sup>1</sup>:

<sup>1</sup> Neel J. V., Schull W. J., Human Heredity, University of Chicago Press, 1954; Medical Research Council (UK), The Hazards to Man of Nuclear and Allied Radiations, H.M.S.O., London, 1956.

	Частота естественных мутаций на одно поколение для гена, несущего признаки болезни
Гемофилия (вызвана рецессивным геном, определяющим пол)	$2,0 \cdot 10^{-5}$ (Hallane, 1935)
Ахондроплазия (вызвана доминантным геном)	$4,5 \cdot 10^{-5}$ (Morch, 1941)
Младенческое омавротическое идиотство * (вызвано рецессивным геном)	$1,1 \cdot 10^{-5}$ (Neel, 1949)

\* Прогрессирующая умственная недостаточность и слепота.

Весьма примечательно, что частота мутаций для таких совершенно различных болезней, как гемофилия и врожденное идиотство, одинакова. Это является убедительным доказательством справедливости генной теории.

Определено, что для преобладающего большинства генов вероятность мутаций значительно меньше приведенной выше—примерно в 10—100 раз. (Обозначив частоту естественных мутаций на одно поколение через  $\mu$ , мы имеем, что  $\mu \sim 10^{-5}$ .)

Одним из наиболее поразительных фактов в генетике является то, что для плодовой мушки и мышей частота мутаций одного гена на поколение почти не отличается от соответствующей частоты мутаций для человека—она всего в 2 раза меньше. В то же время продолжительность жизни поколения у людей более чем в 1000 раз превышает продолжительность жизни поколения у плодовой мушки.

Необходимо отметить, что, хотя мутации<sup>1</sup> происходят во всех клетках организма, как в соматических, так и в зародышевых, мы здесь будем рассматривать только те мутации, которые происходят в зародышевых клетках (и половых клетках, которые при мейозе образуют зародышевые клетки). Мутации происходят чрезвычайно редко,

<sup>1</sup> Под мутациями мы здесь понимаем только такие, которые называются «точечными мутациями». Мы не будем касаться здесь хромосомных aberrаций (различных нарушений строения хромосом), которые встречаются гораздо реже.

поэтому количество соматических клеток, несущих образовавшиеся в результате мутации гены, является ничтожно малым по сравнению с количеством клеток, несущих первоначальные (не подвергавшиеся мутации) гены, вследствие чего, как правило, такие мутации не сказываются на человеке<sup>1</sup>. С другой же стороны, участие в оплодотворении (сингамии) зародышевой клетки, несущей ген, образовавшейся в результате мутации, приводит к тому, что все клетки организма родившегося человека содержат новый ген. Поэтому, даже если этот новый ген является рецессивным, он найдет в какой-то степени свое проявление в потомстве, которое произойдет от зародышевой клетки, несущей новый ген.

### НАВЕДЕННЫЕ МУТАЦИИ

После выхода в свет известной работы Мюллера в 1927 году стал общепризнанным факт, что при воздействии ионизирующего излучения на любой живой организм гены в этом организме подвергаются мутациям. Эти мутации называются *наведенными* (радиацией) *мутациями* в отличие от естественных мутаций<sup>2</sup>. Число мутаций,

<sup>1</sup> В редких случаях даже мутации, происходящие в соматических клетках, могут иметь некоторые генетические последствия. Примером может служить мутация в одной из клеток зародыша в ранней стадии его развития. В этом случае в росте организма будут участвовать как нормальные, так и измененные клетки. Организм будет иметь с точки зрения генетики мозаичную структуру—некоторые его части будут нести признаки гена, образовавшегося в результате мутации. Если этот ген являлся доминантным, то мозаичное строение организма будет ярко выражено. (Такое явление ранней соматической мутации можно наблюдать у различных млекопитающих.)

Далее, в некоторых случаях при мозаичном строении организма клетки, образовавшиеся в результате деления первоначальной клетки, подвергшейся мутации, входят в состав зародышевой ткани половых органов. В результате этого образовавшиеся при мутации гены передаются из поколения в поколение.

Передача новых признаков поколению в случае мозаичной структуры организма у животных аналогична прививке у растений. Так, например, с помощью прививки можно выводить новые сорта фруктов.

(По этим вопросам см. Stern C., Principles of Human Genetics Freeman and Company, San Francisco, 1950.)

<sup>2</sup> Частота мутаций может изменяться также в результате изменения температуры тела животных в пределах обычно происходящих изменений и в результате введения химических препаратов. Так, повышение температуры у плодовых мушек (*Drosophila mela-*

происходящих под действием рентгеновского и гамма-излучения (а также бета-излучения), прямо пропорционально величине полученной дозы излучения, измеряемой в рентгенах<sup>1</sup>. Отметим при этом, что для тяжелых ионизирующих частиц частота мутации пропорциональна  $^{3/2}$  мощности дозы в единицах *рад*. Не вникая в детали, имеющие сравнительно небольшое значение, можно сказать, что

погастер) на 10° С приводило к увеличению частоты спонтанных мутаций более чем в 2 раза. В 1942 году Ауэрбах и др установили, что мутагенезис может быть вызван химическими агентами, например ипритом ( $\text{ClCH}_2\text{CH}_2$ )<sub>2</sub>S.

В настоящее время известны многие химические мутагены (радиомиметические химические соединения), например азотистые иприты, диэпоксиды. Для того чтобы получить одинаковый эффект в случае химического мутагена и в случае радиации, требуемое число молекул химического мутагена на кубический микрон ткани должно быть равно числу ионов на кубический микрон ткани, образующихся под действием определенной дозы радиации. Между действием на биологическую ткань химических мутагенов и действием радиации существует большое сходство. Однако в деталях мы видим и значительное отличие одного действия от другого. По сравнению с радиацией химические мутагены гораздо чаще приводят к мозаичности структуры организма. Кроме того, недавно установлено, что химические мутагены могут вызывать мутации в генах, которые совершенно устойчивы к действию радиации.

<sup>1</sup> Частота мутаций, вызванных действием радиации в зародышевых клетках, зависит от стадии развития клетки. Так, у плодовой мушки (*Drosophila*) сперматиды (семенные зародыши) в 10 раз более чувствительны к радиации, чем сперматогонии (первичные семенные клетки). Степень чувствительности к радиации созревших сперматозоидов является средней между ними. Применение полученных результатов к человеку имеет большое значение. У человека период зрелости зародышевых клеток длится всего несколько месяцев, в то время как ранний период их развития равен примерно 25 годам.

Необходимо отметить, что частота наведенных радиацией мутаций у животных, с которыми проводились эксперименты, может в некоторой степени изменяться в результате инъекций определенных химических препаратов, а также в результате изменения содержания кислорода в организме. Это явление аналогично действию химических препаратов на чувствительность к радиации, о чем шла речь выше. По-видимому, в основе обоих явлений лежит одна и та же причина, и следует полагать, что соматическое действие вообще является следствием мутаций (хромосомных aberrаций), вызванных в соматических клетках.

Закономерность пропорциональности между числом наведенных мутаций и дозой радиации, по-видимому, нарушается, если мощность дозы будет очень большой, например порядка нескольких тысяч рентгенов в минуту (см. Clark A. M., *Nature*, 177, 787, 1956).

наведенные мутации подобны естественным мутациям. Частота наведенных мутаций у человека определялась только косвенным путем<sup>1</sup>. Экспериментальным путем она была определена у насекомого (плодовой мушки) и млекопитающего (мыши)<sup>2</sup>. При этом классическим считается пример с плодовой мушкой. С точностью, соответствующей современному уровню развития науки, можно считать, что частота мутаций за одно поколение у мышей<sup>3</sup> примерно

<sup>1</sup> «Были сделаны две попытки прямым путем определить генетическое действие радиации на человека. С этой целью изучались последствия действия радиации на жителей Хиросимы и Нагасаки, подвергшихся действию атомного взрыва, и на радиологов в США. В настоящее время имеется только предварительный отчет японских ученых, в котором содержатся данные, основанные на исследовании 2000 родившихся детей. Данные говорят о том, что не отмечено сколько-нибудь заметного действия радиации на соотношение пола родившихся детей, процент случаев уродства, процент мертворождаемости и средний вес рождающихся детей, у которых оба родителя или один из них перенесли лучевую болезнь в первые месяцы после атомной бомбардировки.

Данные о действии радиации на радиологов в США были собраны путем опроса их по почте. При этом были опрошены более 3500 радиологов и такое же количество врачей других специальностей. Ответы на заданные вопросы оказались далеко не полными, причем ответили не все, а только  $\frac{3}{4}$  радиологов и около половины остальных врачей. Данные показывают, что существенной разницы в количестве случаев преждевременной смерти в обеих группах не отмечено, в то же время отмечается некоторое увеличение количества случаев прирожденного уродства среди детей, родившихся у радиологов: 5,99% из 5461 ребенка, родившегося у радиологов, по сравнению с 4,84% из 4484 детей, родившихся у остальных врачей. Однако ввиду неполных ответов нельзя считать, что эта небольшая разница вызвана облучением.

Авторы обоих исследований предупреждают, однако, о том, что их неполные результаты нельзя считать за доказательство того, что генетическое действие радиации на человека почти не заметно. Эксперименты с животными показали, что большинство мутаций—естественные и наведенные радиацией—является, по меньшей мере частично, рецессивным и поэтому их трудно заметить в первом поколении, родившемся у облученных родителей. Возможно, что наиболее заметными проявлениями мутаций в первом поколении являются не случаи мертворождаемости или прирожденного уродства, а уменьшение среднего веса взрослого человека или сокращение средней продолжительности жизни. Потребуется еще долгое время для определения этих признаков» («*British Medical Journal*, July 9, 1955, p. 113).

<sup>2</sup> Частота наведенных мутаций измерялась также у некоторых растений, например у маиса.

<sup>3</sup> Russell W. L., X-ray Induced Mutations in Mice, Cold Spring Harbor Symposia Quant. Biol., 16, 327, 1952.

равна частоте мутаций за одно поколение у человека. Проводившиеся недавно опыты с мышами (исследовалось до 100 тыс. мышей) показали, что средняя вероятность наведенных мутаций для некоторых генов у мышей равна  $\frac{1}{4 \cdot 10^6}$  для дозы 1 p<sup>1</sup>. (У плодовой мушки частота мутаций в 10 раз меньше, чем у мышей.)

Вероятность наведенных мутаций неодинакова для различных генов, и вполне возможно (хотя это пока еще только предположение), что для некоторых генов у мышей вероятность мутаций в 10 раз меньше указанной выше величины, в то время как для других—в 10 раз больше.

Обозначим частоту наведенных мутаций для дозы величиной 1 p через  $v$ . Тогда  $v \cong 2,5 \cdot 10^{-7}$ .

Наведенные мутации в большинстве своем являются рецессивными. Мюллер, проводивший эксперименты с плодовой мушкой, обнаружил, что у 1000 плодовых мушек, являющихся первым потомством насекомых, которые получили дозу рентгеновского излучения, равную 150 p, мутации происходили следующим образом:

Общее число мушек . . . . .	1000
Число мушек, у которых отмечались мутации . .	156 (15,6 %)

Виды мутаций у 156 мушек в процентном отношении распределились следующим образом:

Вид мутаций	%
1. Вредная рецессивная (приносящая человеку вред, однако мало ощутимая) . . . . .	64
2. Рецессивная смертельная (человек жизнеспособен, но здоровье слабое*) . . . . .	16
3. Доминантная смертельная (человек нежизнеспособен) . . . . .	16

\* Гомозиготный потомок будет нежизнеспособным.

<sup>1</sup> Величина частоты мутаций, полученная Расселом, относится к облучению первичных семенных клеток (сперматогоний) у мышей. Мыши, являвшиеся гомозиготными для семи доминантных генов, скрещивались с необлученными самками, имевшими рецессивные гены. Мутации отмечались в шести случаях из указанных семи генов.

Вид мутаций	%
4. Редессивная видимая (человек «нормальный», но его гомозиготный поток морфологически отличается от «нормального» типа) . . . . .	3
5. Доминантная видимая (человек морфологически отличается от «нормального» типа) . . . . .	1
	<hr/> 100

Можно считать, что примерно такое же распределение наведенных мутаций характерно и для человека.

### УДВАИВАЮЩАЯ ДОЗА

Если мы будем считать вероятность наведенной мутации для дозы 1  $r$ , равной  $\frac{1}{4 \cdot 10^6}$ , то для дозы 40  $r$  она будет равна 0,00001, что соответствует вероятности естественной мутации за одно поколение. Дозу 40  $r$  называют удваивающей, так как при получении человеком этого количества излучения (при этом учитывается только доза, получаемая половыми органами) общая вероятность мутации на один ген, то есть сумма вероятностей для естественной и наведенной мутаций, увеличивается вдвое. Если удваивающую дозу мы обозначим  $D$ , то

$$D = \frac{u}{v} \text{ (рентген)}. \quad (1)$$

Едва ли нужно объяснять, что приведенный выше подсчет удваивающей дозы излучения, действительная величина которой несколько изменяется для различных генов и групп генов, только приблизительно определяет порядок величины дозы, так как вычисление ее связано с целым рядом неизвестных факторов. Важнейшим из них является отсутствие данных о частоте естественных и наведенных мутаций у человека. Поэтому большое значение приобретает то обстоятельство, что на основе общих предложений совершенно независимо от действительной частоты естественных и наведенных мутаций, возможно довольно определенно установить для удваивающей дозы нижний пре-

дел, ниже которого действительное значение этой дозы, каково бы оно ни было, не может быть<sup>1</sup>. Спонтанные мутации вызываются целым рядом естественных причин, включая естественный радиоактивный фон, который создается радиоактивными веществами, постоянно присутствующими в организме человека, в окружающей среде, и космическими лучами. В конце гл. V был приведен расчет общей дозы, получаемой человеком в результате наличия естественного радиоактивного фона в течение 30—40 лет жизни, то есть за период, к концу которого для большинства людей значительно снижается воспроизводство потомства. Эта доза равна 4 р. Доза, получаемая за этот период половыми органами (гонадами), несколько меньше вследствие защиты половых органов другими частями тела. Она равна 3 р. Если человек и в дальнейшем будет подвергаться облучению, причем половые органы его так же получают дополнительно дозу 3 р от искусственных источников радиации, например в результате выпадения радиоактивной пыли после ядерных взрывов, то число мутаций в среднем увеличится вдвое по сравнению с числом мутаций, вызванных получением «естественной» дозы, равной 3 р. Укажем, что только часть общего числа естественных мутаций происходит в результате получения дозы 3 р, создаваемой естественным радиоактивным фоном. Остальные мутации вызваны другими причинами, например влиянием температуры и химическим действием. Таким образом, для того чтобы навести мутации в количестве, равном числу естественных мутаций, необходимо, чтобы доза, полученная гонадами, превышала 3 р (или же доза, полученная всем организмом человека, превышала 4 р). Другими словами, *доза 3 р является нижним пределом удваивающей дозы* (для гонад). Если считать (по Холдейну), что у человека и, возможно, у животных с большим периодом жизни почти все естественные мутации вызываются действием радиоактивного фона, то удваивающая доза в этом случае равна 3 р.

---

<sup>1</sup> Для установления «верхнего предела» удваивающей дозы в настоящее время не имеется достаточных данных. Тем не менее с большей уверенностью можно утверждать, что этот верхний предел не будет превышать 400 р. Вполне возможно, что он будет значительно ниже. Для оценки же возможного генетического влияния глобального выпадения радиоактивной пыли после ядерных взрывов основное значение имеет нижний предел.



Мутации генов являются почти всегда вредными для жизни человека. Мутации происходят случайно, причем подвергавшиеся естественной или искусственной мутации гены почти во всех случаях оказывают вредное действие на человека; только в редких случаях подвергшиеся мутации гены являются безвредными, и еще реже они оказывают благотворное действие.

Вследствие огромных периодов времени, в течение которых происходили естественные мутации за время существования человечества, вполне вероятно, что практически каждая возможная мутация происходила много раз. Благоприятные мутации, хотя они являются исключением, имеют тенденцию сохраняться вследствие тех преимуществ, которые они несут с собой для данной особи, в то время как вредные мутации имеют тенденцию отмирать, поскольку их действие отрицательно сказывается на ее выносливости и приспособляемости к окружающим условиям. Следовательно, с течением времени каждая особь приобретает такой состав генов, который наиболее отвечает ее существованию в окружающей среде. Он, так сказать, находится в равновесии с окружающей средой, и поэтому любые изменения в составе генов, любые мутации будут нарушать это равновесие и, таким образом, будут неблагоприятными для данной особи<sup>1</sup>. Именно

---

<sup>1</sup> Мутации всегда являются «временно» неблагоприятными для особи, но они необходимы для того, чтобы данная особь приспособилась к изменениям, происходящим в окружающей среде в течение геологических периодов. Вследствие этого частота мутаций не должна быть слишком малой, и действительно в результате процесса естественного отбора остаются гены, имеющие соответствующую частоту мутаций. Как мы можем видеть, для того чтобы происходила органическая эволюция, частота мутаций должна отвечать следующим двум условиям:

$$un_1 > 1$$

и

$$uN < 1,$$

где  $n_1$ —число поколений за период  $10^8$  лет, в течение которого происходит эволюция, а  $N$ —число генов в клетке. Условие  $uN < 1$  основано на том, что если общее число мутаций в клетке более 1 (поскольку вредные мутации происходят чаще, чем благоприятные), то действие благоприятных мутаций, по всей вероятности, теряется. Эти два условия можно объединить

$$u^2 \approx \frac{1}{n_1 N}.$$

Тогда, беря  $N \approx 10\,000$ , а  $n_1 = 3 \cdot 10^6$ , мы получим, что  $u \approx 10^{-5}$ .

в этом заключается весь смысл естественного отбора<sup>1</sup>.

Большинство мутаций является рецессивным, и вред, который они приносят, — небольшой. По своему характеру вредные признаки могут быть биохимическими и физиологическими (или психологическими). Они редко проявляются в виде уродства в наружности человека. Однако вредное действие гена, подвергнувшегося мутации, всегда вызывает одно или несколько функциональных нарушений, а также общее снижение приспособляемости организма к внешним условиям и ухудшение здоровья. Таким образом, мы приходим к выводу, что *мутации являются почти всегда вредными для жизни, развития и воспроизводства новых поколений.*

«Даже только частично вредная мутация в конце концов принесет столько же вреда, сколько принесла бы чрезвычайно вредная мутация. Это объясняется тем, что количество потомков, которым передается любой данный подвергшийся мутации ген, прежде чем он приведет к вымиранию потомков, имеет тенденцию изменяться обратно пропорционально величине вреда, наносимого этим геном. Таким образом, хотя этот ген приносит мало вреда каждому отдельному потомку, он в то же время принесет впоследствии большой вред большому числу людей. Мы все страдаем от накопления нескольких или многих так называе-

---

<sup>1</sup> Необходимо отметить, что наведенные мутации в особых случаях (например, при выращивании растений) могут выгодно использоваться человеком, который может отбирать очень редкие «благоприятные» мутации (с точки зрения человека) признаков. Например, наведенные радиацией мутации в грибковой плесени, используемой для получения пенициллина, позволяли увеличить выход пенициллина в 1000 раз. Можно отметить также проводившуюся недавно шведскими учеными работу по наведению благоприятных мутаций в ячмене. «Частота спонтанных мутаций так мала, что для сбора положительных мутаций, возникающих естественным путем, потребовалось бы чрезвычайно много времени, труда и экспериментов. Но, поскольку в результате применения ионизирующих излучений частоту мутаций можно увеличить в несколько тысяч раз, такой сбор стал в настоящее время возможным и может быть применен при выращивании растений без сколько-нибудь значительного увеличения количества и расширения площади обычных экспериментальных станций» (E h r e n b e r g L., et al., The Production of Beneficial New Hereditary Traits by Means of Ionizing Radiation, from «The Proceedings Peaceful Uses of Atomic Energy held at Geneva, 1955).

мых мутаций»<sup>1</sup>. Присутствие у человека гена, подвергнувшегося мутации, почти неизбежно увеличивает в некоторой степени вероятность прекращения воспроизводства этим человеком или вероятность его преждевременной смерти, вследствие чего уменьшается вероятность передачи этого гена потомкам.

Обозначим буквой  $p$  вероятность того, что человек, несущий подвергшийся мутации ген, не сможет воспроизводить потомство или умрет преждевременно, не достигнув периода половой зрелости. Значит,  $p$  будет означать также вероятность прекращения передачи подвергнувшегося мутации гена следующему поколению. Следуя Мюллеру, мы можем назвать  $p$  вероятностью генетической смерти, или генетического вымирания. Значение величины  $p$  лежит в пределах от нескольких процентов до нескольких долей процента в зависимости от гена, подвергнувшегося мутации. По некоторым подсчетам, средняя величина  $p$  равна 2,5% ( $p = 1/40$ ). Другими словами, потребуется в среднем 40 поколений, для того чтобы вредный ген, возникший вследствие мутации, прекратил свое существование.

В состоянии равновесия число новых мутаций должно равняться числу отмирания генов, подвергшихся мутации, то есть

$$uN = pf, \quad (2)$$

где  $u$ —вероятность спонтанной мутации на ген за одно поколение,  $N$ —число нормальных генов в зародышевой клетке и  $f$ —число генов, подвергшихся мутации.

Подставляя в приведенное выше выражение значения  $N = 10^4$ , и  $u = 10^{-5}$ , и  $p = 1/40$ , мы получим, что число генов, подвергшихся мутации (или иначе мутационная нагрузка за счет естественных мутаций), в зародышевой клетке равно

$$f = \frac{uN}{p} = 4.$$

Удвоение частоты мутаций, если оно будет продолжаться в течение столетий, приведет к удвоению генетической нагрузки  $f$ .

Мутации являются в своем большинстве рецессивными. Среднее значение вероятности рождения человека с на-

<sup>1</sup> Muller H. J., *Journal of Heredity*, XLVI, 199, 1955.

следственным уродством в результате присутствия у человека в обеих гомологичных хромосомах одного и того же гена, подвергшегося мутации, равно

$$N(f/N)^2 = N(u/p)^2 \approx 16 \cdot 10^{-4},$$

то есть 0,2%.

## ГЕНЕТИЧЕСКАЯ ОПАСНОСТЬ, СВЯЗАННАЯ С ПРОВЕДЕНИЕМ ИСПЫТАНИЙ ЯДЕРНОГО ОРУЖИЯ

Вследствие наличия целого ряда не выясненных пока факторов чрезвычайно трудно (практически невозможно) произвести точный подсчет мутаций генов, наведенных у всего населения земного шара в результате воздействия радиоактивного излучения, связанного с выпадением радиоактивной пыли после ядерных взрывов. Если считать, что в результате одного номинального взрыва большой мощности (с тротильным эквивалентом 20 млн. *т*) каждый человек получает дозу, равную 1 миллирентгену (что значительно менее действительно получаемой дозы), то общая доза для всего населения земного шара составит около 2,5 млн. человеко-рентгенов. Далее, если мы предположим, что величина наведенных мутаций у мышей соответствует величине наведенных мутаций у человека, то доза 2,5 млн. человеко-рентгенов вызовет у всего населения земного шара  $(2,5 \cdot 10^6 \cdot 2,5 \cdot 10^{-7}) N$  мутаций, где  $N$  — число генов в зародышевой клетке у человека ( $N \approx 10\,000$ ). Подсчитанное таким образом количество мутаций равно 6000. Из этого количества мутаций 2000 будет смертельными и 4000 вредными (но не смертельными). Так как практически все мутации будут рецессивными, то минимальное количество случаев смертельного исхода, вызванных действием радиации в результате глобального выпадения радиоактивной пыли после одного взрыва большой мощности, должно быть равно 1000, причем эти случаи будут относиться к целому ряду поколений. Кроме того, примерно у 4000 человек произойдут вредные мутации.

Чтобы определить общее число подвергшихся мутации генов у всего населения земного шара, необходимо количество подвергшихся мутаций генов у каждого человека ( $f$ ) умножить на количество населения земного шара. Подсчитанное таким путем общее число мутаций равно примерно 10 000 млн. мутаций. Следовательно, для того чтобы у су-

ществующего населения удвоить число мутаций генов, потребуется средняя доза, равная 1500 p на человека (или  $4 \cdot 10^{12}$  человеко-рентгенам для всего населения). Такое сильное облучение может произойти только в случае всеобщей ядерной войны, где население всего земного шара подвергнется действию дозы излучения, равной *нескольким тысячам миллионов человеко-рентгенов*. Генетические последствия такого облучения будут чрезвычайно серьезными. К этому следует добавить еще те огромные опустошения и разрушения, которые будут связаны с применением ядерного оружия и с которыми придется столкнуться огромным массам людей<sup>1</sup>.

Постараемся выяснить, какое количество мутаций (кроме естественных) может происходить у людей, не причиняя им ощутимого вреда. Мюллер считает, что удвоение частоты спонтанных мутаций у человека может привести

---

<sup>1</sup> Действие радиации, приводящее к вредным генетическим последствиям у человека, подобным же образом сказывается на животных и растениях. Эспинасс, в частности (*«Manchester Guardian»*, March 31, 1955), обратил внимание на возможное действие радиации на симбиотические и паразитические организмы. Имеется целый ряд различных биологических видов, которые в результате длительного естественного отбора приспособились друг к другу и живут вместе, причем один из них существует за счет другого, часто не принося ему вреда. Многие бактерии и простейшие животные организмы приносят мало вреда организму, в котором они живут, даже, наоборот, они могут содействовать выполнению этим организмом важной функции (например, усвоения пищи). Если под действием радиации в таких симбиотических организмах будут происходить мутации, то это может привести к серьезным последствиям для организма, в котором они живут.

Непонятно, однако, как может такой известный ученый, как Эспинасс, писать, что такая возможность, возникающая вследствие повышения радиоактивного фона, является ничтожной. По его мнению, такая возможность является очень отдаленной вследствие того, что многие одноклеточные организмы обладают большой радиорезистентностью. Тем не менее такую возможность нельзя совсем сбрасывать со счета, учитывая огромное количество биологических видов, начиная от вирусов и выше, а также астрономическое число клеток, которые облучаются. Поскольку процесс передачи наследственности у многих микроорганизмов является асексуальным, любые мутации у этих организмов не будут маскироваться присутствием нормальных разновидностей генов, получаемых от второго родителя, а будут проявляться у всех потомков данного родителя, у которого произошла мутация (Haddow A., *The Problem Before Man, The Bomb: Challenge and Answer*, edited by G. McAllister, 1955).

к катастрофе, в то же время увеличение частоты мутаций на 10% является вполне допустимым<sup>1</sup>.

Слатис<sup>2</sup> же пишет: «Что произойдет с человеком, если частота мутаций навсегда увеличится в 2 раза в результате какого-нибудь случайного заражения атмосферы радиоактивными веществами? Потребуется смена нескольких поколений, прежде чем новые мутации накопятся в большом количестве. Увеличится среднее количество вредных мутаций, а также количество таких браков, при которых оба вступивших в брак будут иметь одинаковые гены, подвергшиеся мутации, вследствие чего дети их будут дефективными. Для полностью рецессивных генов удвоение частоты мутаций означает увеличение у населения количества этих генов и ненормальных гомозигот пропорционально корню квадратному из частоты мутаций. Ген, имевший частоту мутаций 0,0001, будет иметь частоту мутаций 0,00014. Такие незначительные изменения, являющиеся результатом удвоения частоты мутаций, могут остаться почти незамеченными. Поэтому вряд ли эта проблема может иметь большое значение для жизни человечества. Некоторые из разрешенных в настоящее время дисгенических средств являются, возможно, для человечества более опасными.

Для того чтобы все эти рассуждения не были восприняты как оправдание необдуманного и опрометчивого применения возможных источников облучения, необходимо сделать следующее особое предупреждение. Всегда нужно помнить о том, что любое облучение является вредным, и поэтому оно должно применяться только в том случае, когда положительное его действие будет преобладать над отрицательным. Безусловно, необходимо стремиться к тому, чтобы каждый человек избегал облучения половых органов, пока он находится в возрасте, когда он может воспроизводить потомство. Это будет способствовать защите наших потомков от вредного действия радиации. Кроме того, человечество в целом необходимо защитить от общего повышения естественного радиоактивного фона. Применение вредных действий не должно оправдываться существованием еще более вредных».

<sup>1</sup> Westergaard M., Man's Responsibility to his Genetic Constitution, *Bulletin of the Atomic Scientists*, 11, 318, 1955.

<sup>2</sup> Slatis H. M., Current Status of Information on the Induction of Mutations by Irradiation, *Science*, 121, 817, 1955.

Мы, принимая сторону большинства генетиков, будем считать, что удвоение частоты естественных мутаций почти наверняка приведет к серьезным последствиям. Сама величина удваивающей дозы является весьма неопределенной. Она может быть равна всего 3 *p*, хотя более вероятной является величина в 10 раз больше. Величина дозы, получаемой человеком в результате глобального выпадения радиоактивной пыли, также еще не установлена, хотя наиболее приемлемой величиной для дозы, полученной каждым человеком в результате всех проведенных до настоящего времени ядерных взрывов, можно считать 0,1 *p*. На основании этого можно было бы прийти к заключению, что генетический вред, нанесенный человечеству в результате всех произведенных взрывов, является ничтожным. Однако нельзя с полной уверенностью утверждать, что такое заключение правильно<sup>1</sup>.

\* Радиация действительно оказывает вредное генетическое действие, но в настоящее время у нас нет еще возможности точно определить степень этого вредного действия. Тем не менее, зная, что от этого зависит судьба будущего всего человечества, кто рискнет утверждать, что генетическое действие радиации можно не учитывать?

---

<sup>1</sup> Нужно, чтобы всякое облучение, не вызываемое необходимостью, было сведено к минимуму (особенно облучение половых органов), а там, где это возможно, совсем исключено. (Например, такое облучение, как от светящегося циферблата часов и различных приборов, светящихся вывесок, игрушек, окрашенных светящейся краской, рентгеновских аппаратов, применяемых при продаже обуви, телевизоров, которые испускают мягкие рентгеновские лучи, и пр.)

В связи с широким применением в медицине (иногда неразборчивых) рентгеновских исследований в целях диагностики сейчас возникла серьезная проблема облучения больших количеств людей. Эта проблема довольно подробно освещена в докладе Медицинского научно-исследовательского совета Соединенного Королевства «The Hazards to Man of Nuclear and Allied Radiation», H.M.S.O., June 1955. Подсчитано, что только в 1955 году в Англии было произведено 18 млн. просвечиваний рентгеновскими лучами. Имеющая значение в генетическом отношении доза радиации (то есть доза, получаемая половыми органами), отнесенная ко всему населению Англии, равна 0,02 *p* в год для каждого человека, что соответствует 22% дозы, получаемой от естественного радиоактивного фона. Кстати, укажем, что при прямом просвечивании грудной клетки рентгеновскими лучами доза, получаемая грудной клеткой, равна примерно 0,15 *p*, а доза, получаемая при этом половыми органами, равна 0,4 миллирентгена для мужчин и 0,1 миллирентгена для женщин (St a n f o r d R. W., et al., *British Journal of Radiology*, 28, 266, 1955).

## Глава VII

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

«Таким образом, мы ставим перед вами страшную, суровую и неизбежную проблему: уничтожим ли мы человечество или же человечество откажется от войны? Люди не хотят задуматься над этой альтернативой, ибо так трудно искоренить войну...

...Если мы примем такое решение, перед нами откроется безграничный простор для счастья, знания и мудрости. Должны ли мы избрать вместо этого смерть, потому что мы не можем забыть наши споры? Мы обращаемся как люди к людям: помните, что мы люди, и забудьте остальное. И, если вы сможете это сделать, откроется путь к новому раю, а если вы не сможете это сделать, возникнет опасность всеобщей гибели».

*Альберт Эйнштейн*<sup>1</sup>

В предыдущих главах мы попытались дать объяснение действия поражающих факторов ядерного взрыва. Мы рассмотрели действие ударной волны, светового излучения и радиологическое действие взрыва. Из всего сказанного особенно поражает поистине колоссальная разрушительная сила ядерного оружия большой мощности. По сравнению с разрушениями, вызываемыми действием обычных видов оружия, разрушения, вызываемые действием ядерных взрывов большой мощности, являются настолько огромными по своему масштабу, что оценка серьезности и опасности новой обстановки является очень трудным делом. При взрыве, например, бомбы большой мощности с тротильным эквивалентом 20 млн. *т* освобождается энергия примерно в таком же количестве, как при сильном землетрясении или урагане. Количество этой энергии

---

<sup>1</sup> Отрывок из заявления ряда известных ученых, опубликованного в июле 1955 года. Под заявлением поставили подписи: Альберт Эйнштейн, Перси Бриджман, Леопольд Инфельд, Герман Мюллер, Сесил Поуэлл, Джозеф Ротблат, Бертран Рассел, Хидеки Юкава и Фредерик Жолио-Кюри.



равно 2% общего количества электроэнергии, вырабатываемой за год во всем мире. Если бы создать бомбу такой же мощности из обычных взрывчатых веществ, то одна стоимость взрывчатых веществ равнялась бы примерно 1 млрд. ф. ст. С точки зрения разрушительной силы ядерное оружие можно считать самым дешевым видом оружия, какое только существовало в мире,—дешевле обычных видов оружия в сотни и даже тысячи раз. Наиболее подходящей целью для ядерного оружия является крупный город. Действия только одного поражающего фактора ядерного взрыва большой мощности, а именно ударной волны будет достаточно, чтобы полностью разрушить любой самый крупный город. Логика подсказывает, что бомба большой мощности и города не могут сосуществовать в течение длительного времени. Вся история говорит о том, что на размер политических единиц (городов) в большой степени оказывала влияние разрушительная сила оружия. Разрушительная сила ядерного оружия такова, что, как выразился Эйнштейн, должен быть «один мир или никакого». В настоящее время все считают, что в результате войны с применением ядерного оружия не будет победителей и побежденных, такая война может кончиться только гибелью всей цивилизации.

Мы пришли к вопросу об испытаниях ядерного оружия. Экспериментальные ядерные взрывы с целью испытания новых видов и конструкций ядерного оружия все еще продолжаются. В связи с этими взрывами мы довольно подробно рассмотрели следующие два момента:

1. Опасность внутреннего облучения организма, вызываемую попаданием в организм радиоактивных веществ, содержащихся в радиоактивной пыли, которая выпадает после ядерных взрывов (при этом наибольшую опасность представляет радиоактивный стронций).

2. Опасность генетического действия ионизирующей радиации на все население земного шара, связанную с глобальным выпадением радиоактивной пыли.

Все согласны, что ядерные взрывы оказывают вредное действие на здоровье людей. Однако нет единого мнения относительно величины этого вредного действия. Вопрос о действительной величине вреда, наносимого человеку вследствие проведения испытаний ядерного оружия, часто смешивают с другими вопросами, в частности с политическими. Научные знания в этой области на данном этапе

развития науки еще недостаточны для того, чтобы дать ясный и определенный ответ на этот вопрос. Предположения же о допустимых дозах радиации (как в отношении ее соматического, так и в отношении генетического действия), которые не окажут на «среднего» человека неблагоприятного действия, являются, как правило, слишком оптимистичными. Мы довольно подробно рассмотрели этот вопрос в гл. V и VI. (Отметим, например, что считающееся допустимым содержание в организме стронция 90 является явно завышенным.) Далее, говоря о глобальном выпадении радиоактивной пыли, при котором радиоактивная пыль распределяется равномерно по всей поверхности земного шара, мы можем утверждать, что ее вредное соматическое действие будет проявляться в первую очередь в густонаселенных районах со сравнительно низким уровнем питания и здоровья населения. То же самое можно сказать и в отношении генетического действия радиации. Имеющиеся в настоящее время научные знания по этому вопросу настолько еще не достоверны, что рекомендуемая величина допустимого облучения может намного отличаться от истинной (она может быть больше или меньше в 100 раз). Более того, необходимые научные знания, связанные с генетическим действием радиации, наверняка не будут получены и в ближайшем будущем, что объясняется сложностью вопроса. Поэтому очень важно, пока действительная величина опасности еще не установлена, соблюдать условия минимально возможного облучения, с тем чтобы не причинить непоправимого вреда самому ценному из того, чем обладает человечество,—генетическому наследству.

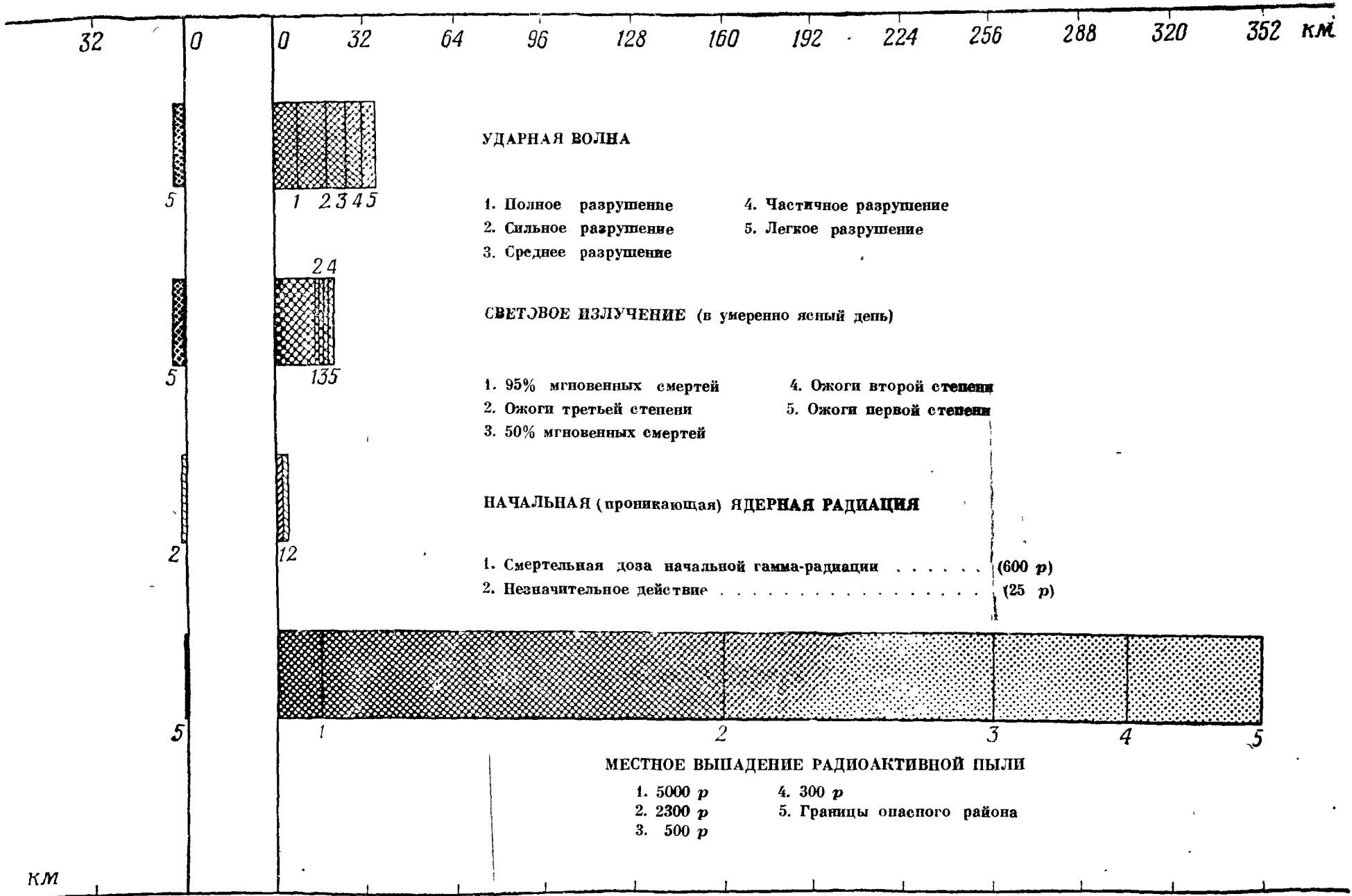
Все согласны, что война с применением ядерного оружия будет всеобщим бедствием. Однако имеются люди, которые считают вполне возможным и оправданным дальнейшее проведение ядерных испытаний на том основании, что в настоящее время еще твердо не установлена величина вредного действия радиации как в соматическом, так и в генетическом отношении (то есть действие радиации на самого человека и на его потомство). На практике такой взгляд означает продолжение проведения ядерных испытаний в течение длительного периода времени, пока *совершенно точно* не будет установлено, что они действительно наносят большой вред человеку. Такая аргументация является по меньшей мере странной. Утверждать, что

испытания следует прекратить только после того, как будет абсолютно точно установлено, что они приносят человечеству совершенно *определенный вред*,—это значит без всякого сожаления перечеркнуть 2500 лет прогресса человечества со времени Будды.

В то же время нет никакого сомнения в том, что для сохранения и прогресса цивилизации сейчас особенно необходимо, чтобы новая наука об атоме и атомной энергии была мобилизована не на создание оружия и не для ведения войны, а для целей мира и процветания.

НОМИНАЛЬНАЯ  
АТОМНАЯ  
БОМБА

НОМИНАЛЬНАЯ БОМБА БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ,  
ОСНОВАННАЯ НА ДЕЛЕНИИ



км

Сравнение радиусов поражающего действия для номинальной атомной бомбы и для номинальной бомбы большой мощности, основанной на делении. В случае ударной волны, светового излучения и начальной (проникающей) ядерной радиации район поражения имеет примерно форму круга; цифры на схеме показывают радиусы зон поражения.

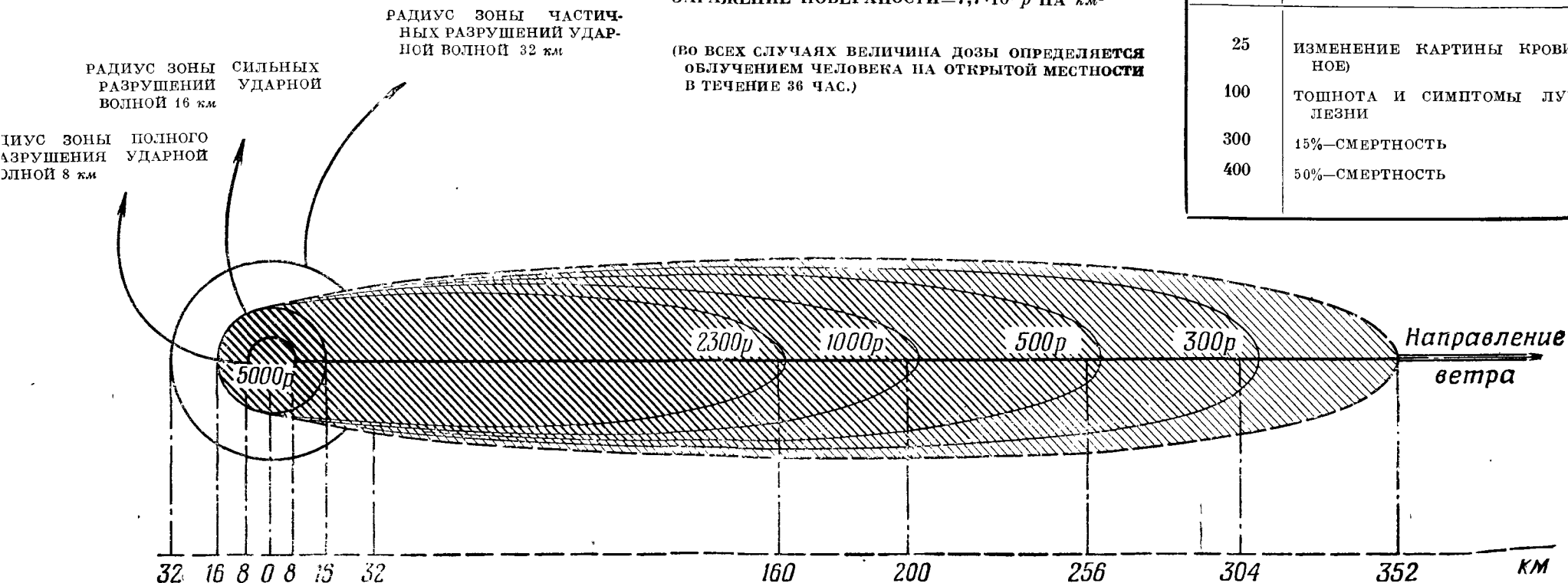
# ФОРМА РАЙОНА ВЫПАДЕНИЯ РАДИОАКТИВНОЙ ПЫЛИ ПОСЛЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА, ПРОИЗВЕДЕННОГО США 1 МАРТА 1954 ГОДА<sup>1</sup> (ТРОТИЛОВЫЙ ЭКВИВАЛЕНТ ОКОЛО 15 млн. т)

ПЛОЩАДЬ РАЙОНА ОПАСНОГО ЗАРАЖЕНИЯ=  
=18000 км<sup>2</sup>

ЗАРАЖЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ=7,7·10<sup>6</sup> р НА км<sup>2</sup>

(Во ВСЕХ случаях величина дозы определяется  
облучением человека на открытой местности  
в течение 36 час.)

ДОЗА, р	ДЕЙСТВИЕ ДОЗЫ РАДИАЦИИ НА ЛЮДЕЙ
25	ИЗМЕНЕНИЕ КАРТИНЫ КРОВИ (ВРЕМЕН- НОЕ)
100	ТОШНОТА И СИМПТОМЫ ЛУЧЕВОЙ БО- ЛЕЗНИ
300	15%—СМЕРТНОСТЬ
400	50%—СМЕРТНОСТЬ



ФОРМА РАЙОНА ЗАРАЖЕ-  
НИЯ ЗАВИСИТ ОТ СТРУК-  
ТУРЫ ВЕТРОВ В СЛОЕ  
ВОЗДУХА ДО ВЫСОТЫ  
24 км

ДИАМЕТР ОГНЕННОГО ШАРА—6,5 км

НА РАССТОЯНИИ 250 км ОТ ЭПИЦЕНТРА ВЗРЫВА ВЫПАДЕ-  
НИЕ РАДИОАКТИВНОЙ ПЫЛИ НАЧАЛОСЬ ЧЕРЕЗ 8 ЧАС.  
ПОСЛЕ ВЗРЫВА И ПРОДОЛЖАЛОСЬ В ТЕЧЕНИЕ НЕСКОЛЬ-  
КИХ ЧАСОВ

Схема составлена по дан-  
ным, содержащимся  
в отчете комиссии по  
атомной энергии США  
от 15 февраля 1955 года

РАЗМЕР ЧАСТИЦ РАДИОАКТИВНОЙ ПЫЛИ ОТ —0,025 ДО  
0,5 мм

<sup>1</sup> Район заражения радиоактивной пылью, выпадающей после взрыва, имеет овальную форму. Цифры на схеме показывают расстояние по длине овала. Ширина овала около 60 км; предполагаемая скорость ветра 30 км/час. Величины доз взяты для продолжительности облучения 36 час. и основаны на данных сообщения комиссии по атомной энергии США о взрыве, произведенном в Бикини в марте 1954 года.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

От Издательства . . . . .	5
Предисловие . . . . .	7
Предисловие авторов . . . . .	9
Глава I. Введение . . . . .	11
Глава II. Взрывы, основанные на делении и синтезе . . .	24
Глава III. Энергия, освобождающаяся при делении, и радиоактивность продуктов деления . . . . .	50
Глава IV. Поражающее действие атомного оружия . . . .	61
Глава V. Действие взрывов большой мощности . . . . .	84
Глава VI. Генетическое действие ядерных взрывов . . . .	169
Глава VII. Заключение . . . . .	192

## ЯДЕРНЫЕ ВЗРЫВЫ

Редактор В. С. ПАВЛОВ  
Художник Л. Д. Грибков  
Технический редактор Т. С. Соколова

Сдано в производство 24/IX 1957 г. Подписано к печати 26/XI 1957 г.  
Бумага  $84 \times 108 \frac{1}{32} = 3,3$ , бум. л. 10,6 печ. л. в т/ч вкл. 1 Уч.-изд. л. 10,7.  
Изд. № 18/3759. Цена 6 р. 40 к. Зак. 1447

---

ИЗДАТЕЛЬСТВО ИНОСТРАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

---

Москва, Ново-Алексеевская, 52.  
16-я типография Московского городского Совнархоза  
Москва, Трехпрудный пер., 9

# О П Е Ч А Т К И

Страница	Строка	Напечатано	Следует читать
74	14 снизу	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$
119	18 сверху	(стр. 121)	(см. вклейку)
119	18 снизу	(стр. 122)	(см. вклейку)

Зак. 1447