

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

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

Таковы наши встречи с невидимыми лучами в повседневной жизни.

ДЕЙСТВИЕ РАДИАЦИИ БОЛЬШИХ ЭНЕРГИЙ НА ЖИВЫЕ ОРГАНИЗМЫ

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

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

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

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

цедур, улучшена конструкция аппаратов. Дозы облучения, получаемые врачами-рентгенологами, резко уменьшились. Статистическое обследование, проведенное в Англии в 60-х годах, не смогло установить повышенного процента смертности среди врачей-радиологов по сравнению с врачами всех других специальностей.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

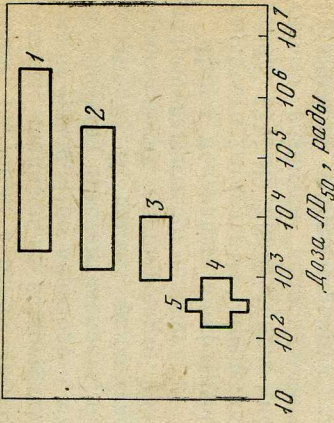
Чем объясняется чувствительность живого организма к действию ионизирующей радиации? Почему, казалось бы, ничтожно малые количества энергии, привнесенные этим видом излучения, способны резко изменить ход жизненных процессов вплоть до гибели организма? Ответить на этот вопрос не легко. Он еще более усложняется,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

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

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

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

Рис. 4. Радиочувствительность различных организмов



часть животных погибнет, часть выживет. Если увеличить дозу облучения до 600 рад, погибнет около 50% всей популяции, а 50% выживет. Доза в 700 рад будет смертельной уже для 70—80% популяции. При дозе в 1000 рад погибнут все животные. Этот пример ясно показывает, что радиационный эффект (в данном случае гибель) — явление вероятностное. Вероятность его наступления возрастает с увеличением дозы. Обычно для характеристики радиочувствительности пользуются той дозой, которая вызывает гибель половины популяции — LD₅₀ (летальная доза для 50% популяции). Для млекопитающих пользуются величиной LD₅₀, т. е. летальной дозой, при которой гибнет 50% популяции за 30 дней.

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

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

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

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

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

Таблица 12

Сравнительная радиочувствительность некоторых микроорганизмов

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

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

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

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

Таблица 13
Радиочувствительность семян растений

Вид растения	Дозы, вызывающие 100%-ную гибель растений, град.	Вид растения	Дозы, вызывающие 100%-ную гибель растений, град.
Бобы конские	10	Люпин синий	50
Кукуруза Днепровская	45	Овес Победа	50
Пшеница	45	Клевер красный	100
Конюшня Черкасская	25	Клеверина Ново-Кубанская	100
Гречиха Красноуфимская	25	Редис розовый	300
		Горчица белая	400

Таблица 14

Радиочувствительность различных представителей животного мира

Вид животного	Дозы, вызывающие 100%-ную гибель животных, град.	Вид животного	Дозы, вызывающие 100%-ную гибель животных, град.
Морская свинка	300	Лягушка	1000
Собака	400	Черепаша	1500
Свинья	430	Змея	8 000—
Обезьяна	500		20 000
Мышь	550	Моллюск	12 000
Крыса	600	Насекомое (взрослое)	10 000—
Кролик	800		400 000
Золотистый хомяк	900		

идет постоянное деление клеток, поставляющих смену наследственным клеткам крови (в первую очередь лимфоцитов), и кишечного эпителия. Прекращение деления и размножения этих клеток приводит организм к гибели. Клетки мышечной ткани с невысоким митотическим индексом¹ относительно устойчивы и могут перенести значительную дозу облучения без утраты своих функций.

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

¹ Митотический индекс — процент клеток, находящихся в стадии деления.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Из всего сказанного следует, что, отвечая на вопрос о том, почему одни клетки устойчивы, а другие чувствительны к действию радиации, нельзя указать какую-либо одну причину, определяющую радиочувствительность клетки. В истории радиобиологии попытки свести радиочувствительность только к одному фактору, например к интенсивности деления, объему генома², интенсивности

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

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

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

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

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

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

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

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

С другой стороны, организм мобилизует все свои защитные механизмы. В ответ на массовую гибель кровяных клеток начинается усиленная выработка эритроцитов³ типа эритропоэтина, под влиянием которых начинается размножение покоящихся стволовых клеток, их дифференциация и замена, возмещение погибших клеток. Выделительная система организма очищает его от радиотоксинов и токсических веществ, распадающихся, пораженных радиацией клеток. Усиливается липидный обмен, ускоряется замена поврежденных липидов мембран нормальными, восстанавливаются свойства мембран. Включаются резервные энергопроизводящие системы, ликвидирующие недостаток макроэргов⁴, необходимых для репаративных процессов.

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

³ Эффекторы — вещества, вызывающие в клетках синтезы новых соединений, переводящие клетки из одной стадии развития в другую.

⁴ Макроэрги — вещества, несущие в своей структуре запасы энергии.

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

В этой главе автор попытался дать общее представление о том, чем угрожают организму ионизирующие излучения в сублетальных и летальных дозах. При уменьшении дозы облучения⁵ будут ослабевать процессы, усиливающие радиационное повреждение организма, начнут преобладать защитные восстанавливающие силы организма.

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

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

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

ЧТО ИЗВЕСТНО О БИОЛОГИЧЕСКОМ ДЕЙСТВИИ РАДИАЦИИ В МАЛЫХ ДОЗАХ?

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

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

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

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

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

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

Второй, не менее интересный вывод: чем больше времени проходит после облучения, тем выше процент заболевших животных, а чем ниже доза облучения, тем длительнее период времени, в течение которого нет проявлений его blastomогенного действия¹.

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

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

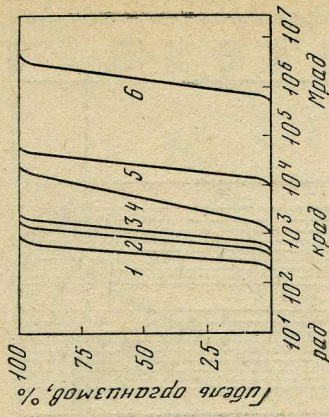
¹ Blastomогенез — образование опухолей.

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

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

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

Рис. 5. Зависимость смертности организмов от дозы облучения



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

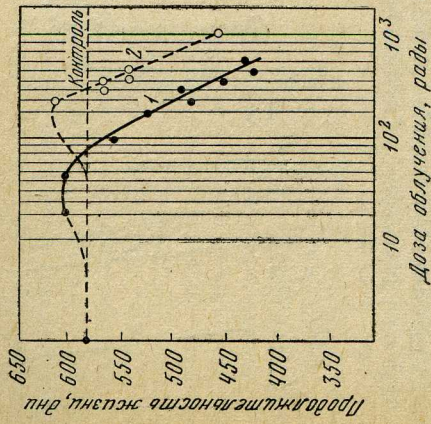
Переходя к рассмотрению отдаленных последствий облучения, остановимся прежде всего на преждевременном старении облученного организма и, как следствие, на сокращении сроков жизни.

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

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

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

Рис. 6. Продолжительность жизни мышей после облучения



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

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

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

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

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

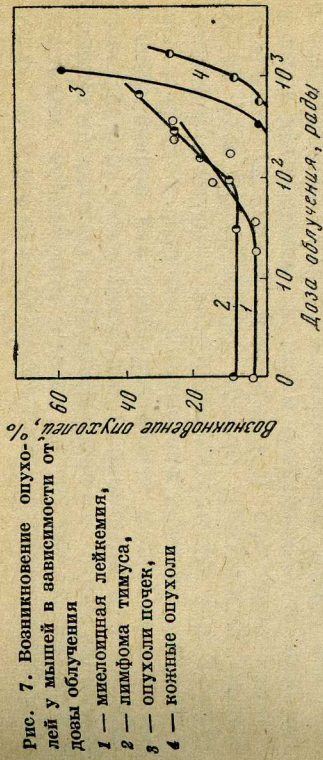


Рис. 7. Возникновение опухолей у мышей в зависимости от дозы облучения

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

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

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

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

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

Однако образование злокачественной клетки совершенно не означает появления злокачественной опухоли.

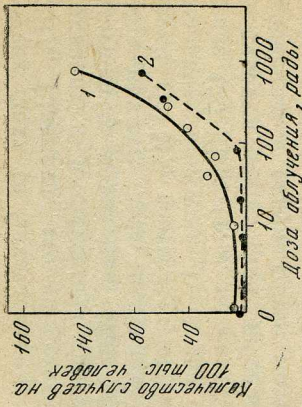
Сейчас есть все основания полагать, что единичные перерождения нормальной клетки в злокачественную постоянно происходят в организме животного под влиянием естественного фона радиации и благодаря присутствию в окружающей нас среде различных канцерогенных веществ. Однако организм животного и человека в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

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ДЕЙСТВУЕТ ЛИ НА БИОСФЕРУ ЕСТЕСТВЕННЫЙ ФОН РАДИАЦИИ?

Итак, поражающее действие ионизирующей радиации, ее способность нести гибель, лучевую болезнь, снижать иммунную защищенность, вызывать отдаленные последствия — все эти свойства начинают проявляться и могут быть обнаружены только после некоторой дозы облучения. В зависимости от радиочувствительности организма и выбранного критерия действия радиации этот порог вредного действия по своей величине варьирует в широких пределах. Для более радиоустойчивых растительных организмов он достигает десятков тысяч рад, в то время как для гораздо более радиочувствительных млекопитающих и человека лежит в диапазоне 25—400 рад острого облучения или 100—300 рад при хроническом длительном облучении малой мощности. Эти величины облучения в сотни, тысячи раз превосходят естественный фон радиации.

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

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

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

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

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

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

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

Стимулирующее действие малых доз радиации обнаружено и на живом организме.

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

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

Для решения вопроса о том, можно ли говорить о благоприятном действии малых доз радиации на животный организм, исключительный интерес имеют исследования по продолжительности жизни различных животных при хроническом γ -облучении в очень малых дозах. Впервые в 1950—1955 гг. американский ученый Е. Лоренц опубликовал свои наблюдения об увеличении средней продолжительности жизни у мышей и морских свинок при ежедневном облучении, начиная с одного месяца и до конца жизни в дозах 0,4 рад. Если у мышей (самцов) средняя продолжительность жизни составляла 683 дня, то в опытной группе она равнялась 783 дням, т. е. на 100 дней больше.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Большое внимание с этих позиций привлекал калий. Как известно, калий обязательно входит в состав живых организмов. Без него не могут существовать ни растения, ни животные. Калий не может быть заменен никаким другим элементом. Между тем природный калий состоит из трех изотопов: K^{39} , K^{40} и K^{41} , из которых K^{40} радиоактивен. Он имеет большой период полураспада (1,3·10⁹ лет) и является β- и γ-излучателем. Правда, его содержание в естественной изотопной смеси очень невелико (около 0,01%), но возможно это-то и необходимо для поддержания жизненных процессов.

В 50-х годах нашего столетия академик А. П. Виноградов поставил, казалось бы, решающие эксперименты, чтобы ответить на эти вопросы. Он получил калий, обогащенный радиоактивным изотопом (содержание последнего было повышено с 0,019 до 1,34%), и калий, содержащий в 50 раз меньше K^{40} (вместо 0,0119% всего лишь 0,0002%). Приготовили три питательные среды для роста простейшего грибка *Aspergillus niger*, одна из которых содержала обычный калий, другая — обогащенный и третья — обедненный. На эти среды выселили грибок и в течение четырех суток визуально определяли рост грибка, а по прошествии четырех суток устанавливали вес сухой массы и количество щавелевой кислоты, выделенной грибком в окружающую среду.

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

Эти определения приведены в табл. 15.

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

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

Таблица 15

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

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

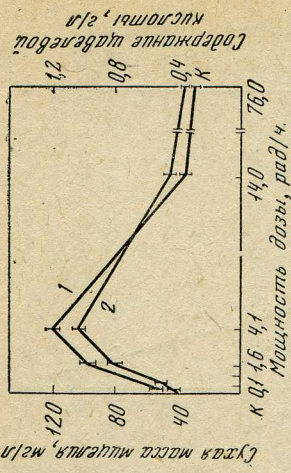
блюдению за развитием и образованием органических кислот грибом *Aspergillus niger*, растущим при повышенной мощности дозы от 0,1 до 76 рад/ч. Данные о сухой массе культуры и продукции щавелевой кислоты на седьмые сутки представлены на рис. 9, из которого видно, что если облучение при мощности дозы 0,1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

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

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

рис. 9. Влияние мощности дозы γ -облучения на равновесие *Aspergillus niger*

1 — сухая масса, щавелевой кислоты
2 — продукция щавелевой кислоты

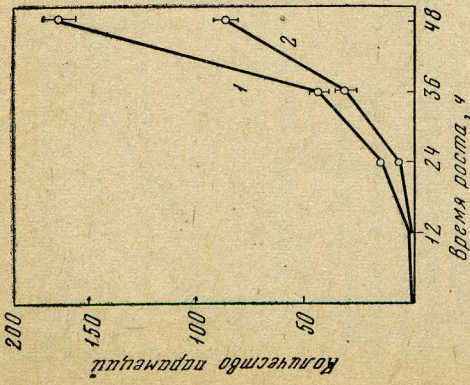


он впервые сообщил о своих экспериментах по наблюдению за темпом размножения простейшего организма парамеции (*Paramecium caudatum*) при экранировании от естественного фона радиации. Для экранирования он применил свинец толщиной в 5 и 10 см. Измерение активности γ -лучей сцинтилляционным счетчиком в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

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

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

Рис. 10. Рост культуры *Ragadesium aurelia*
 1 — в надземной лаборатории без защиты,
 2 — в подземной лаборатории со свинцовой (5 см) защитой



сравнению с лабораторными условиями на поверхности Земли.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Из работ Ю. Розена, К. Юнга и других ученых следует, что в тропических широтах Земли мощные потоки нагретого воздуха уносят в стратосферу значительные количества микроорганизмов, бактерий, спор. Они достигают высоты 15—20 км. Именно на этой высоте образуются слои с максимальным содержанием микрочастиц (аэронов), достигающих 10 частиц на 1 см³. На этой же высоте в годы активного солнца под влиянием солнечных вспышек микроорганизмы будут подвергаться облучению (к действию высокоэнергетичных протонов прибавится и действие короткого ультрафиолета) в дозах, достаточных, чтобы вызвать впоследствии стимуляцию их размножения.

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

сфере и их последующей миграцией на поверхность Земли.

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

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

Для человека дозы порядка 100 рад и выше уже представляют серьезную опасность. По мере снижения дозы облучения уменьшается вероятность проявления вредных радиобиологических эффектов. Для млекопитающих и человека, как мы видели выше, нет строго научных данных о вреде облучения в дозах ниже 20—40 рад. Можно с уверенностью утверждать, что дозы в пределах колебаний естественного радиационного фона (а тем более составляющие доли такого фона) не несут прямой опасности для живых организмов, включая и человека. Более того, очень низкие дозы ионизирующей радиации могут стимулировать деление клеток, ускорять рост и развитие, повышать иммунную сопротивляемость организма к неблагоприятным факторам внешней среды, усиливать восстановительные процессы, тем самым они могут быть полезными в ряде случаев и для человека.

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

НЕВИДИМЫЕ ЛУЧИ УПРАВЛЯЮТ ЖИЗНЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ

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

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

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

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

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

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

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

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

Радиотерапия в медицине

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

Таблица 16
Практическое использование ионизирующей радиации

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

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

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

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

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

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

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

Прежде всего необходимо подчеркнуть, что речь идет о влиянии на естественные регуляторные процессы. Малые дозы радиации ничего не разрушают и ничего не создают — они только способствуют проявлению имеющихся возможностей у организма, т. е. играют роль спускового устройства, триггера-эфлятора¹, как бы запускающего в действие ту систему, которая до этого находилась в нерабочем или малоактивном состоянии.

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

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

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

¹ Триггер-эфлятор — вещество, возбуждающее в организме те или иные процессы. Все гормоны действуют как триггер-эфлоторы.

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

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

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

Предпосевное γ -облучение семян сельскохозяйственных культур

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Чем же объясняется подобное свойство ионизирующей радиации?

γ -кванты, кванты ультрафиолетового излучения Солнца и, наконец, кванты видимого света — это только

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Образование триггера → Деблокирование, депрессия генов → Синтез и-РНК → Синтез ферментов → Новая стадия метаболизма

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Использование малых доз γ -радиации в птицеводстве

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

124

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

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

В главе 7 уже сообщался результаты облучения яиц в процессе инкубации и перед закладкой в инкубатор. Несмотря на близость результатов всех трех приемов облучения, для внедрения в практику следует рекомендовать прединкубационное облучение яиц в дозе 4 рад как наиболее легко осуществимое в производственных условиях.

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

Использование малых доз γ -радиации в рыбной промышленности

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

125

УВЕЛИЧЕНИЕ СРОКОВ ХРАНЕНИЯ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ ПУТЕМ γ -ОБЛУЧЕНИЯ

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

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

По данным Всемирной продовольственной и сельскохозяйственной организации при ООН, более 45% добытых пищевых ресурсов погибает при хранении, а в тропических странах эта цифра возрастает до 30—35%. Часто портятся и не доходят до потребителя морские уловы, ягоды, плоды и фрукты. Прорастает и теряет пищевую ценность картофель в весенне-летние месяцы хранения. Насекомые-вредители портят при хранении зерно, крупу, муку, сухофрукты. Мясные продукты имеют весьма ограниченный срок хранения.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

действие облучения и прогрева было продемонстрировано на многих рыбных продуктах.

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

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

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

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

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

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

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

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

Значительно более сложным оказался вопрос о вредности пищевых продуктов после лучевой обработки. Первоначально проведенные исследования как у нас в стране, так и в США, Канаде и ФРГ имели целью проследить, не выявятся ли токсические свойства у облученных пищевых продуктов при длительном скормливания подопытным животным. В опыте использовались облученные мясо, рыба, зерно. Обычно более 50% общего радионагрузки подопытных животных состояло из облученных продуктов. Исследования были проведены на крысах, собаках, птице, обезьянах. Длительность эксперимента от 4,5 до 5 лет (в ряде работ охватывалась до 5 поколений крысы). Исследовались дозы облучения продуктов питания от 500—600 крад до 5 мрад. В процессе экспериментов учитывались общее состояние и поведение животных, их вес, продолжительность жизни, заболеваемость, морфология крови, фагоцитарная активность, биохимические показатели обмена, патолого-анатомические показатели, воспроизводительные функции. Все эти исследования не позволили выявить каких-либо токсических свойств у облученных продуктов. На их основании органы санитарно-гигиенического контроля ряда стран выдали разрешения на выпуск опытных партий облученных продуктов для употребления человеком.

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

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

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

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

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

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

В Японии в промышленном масштабе облучают и выкупают на рынок картофель. Население покупает его охотнее, так как он лучше сохраняется в жаркое время. Решение ряда технологических и экономических проблем позволит лучевому методу занять прочное место в пищевой промышленности.

ЛЮДИ, БУДЬТЕ БДИТЕЛЬНЫ!

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

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

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

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

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

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

О возможных последствиях ядерной войны не раз писали специалисты. Сейчас, когда намечались пути смирения международной напряженности, сделаны первые шаги разрядки, идеи мирного сосуществования завоевывают умы человечества, нельзя ни на минуту забывать, к чему может привести нагнетание напряженности, пропаганда новой мировой войны. Группа экспертов Организации Объединенных Наций в докладе, представленном Генеральной Ассамблее ООН 10 октября 1967 г., подробно проанализировала последствия попадания мегаатонной термоядерной бомбы в современный город площадью 250 км² с населением 1160 тыс. жителей. При наземном взрыве около трети домов будет полностью разрушена, а вторая треть будет сильно повреждена. Только одна треть будет разрушена частично, т. е. дома потеряют двери, крыши, окна. Взрывная волна разрушит водоснабжение, канализационную систему, подачу газа и электричества; будут разрушены дороги и все средства сообщения.

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

¹ Шаскельская М. Жолио-Кюри. М.: Молодая гвардия, 1959, с. 180.

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

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

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

Чтобы полностью представить последствия использова- ния ядерного оружия, мало иметь представление о разру- шающем действии одной бомбы. Надо знать, о каком ко- личестве таких бомб может идти речь в случае возникно- вения ядерной войны. Хотя размеры ядерных запасов никогда не публиковались, однако американский иссле- дователь Р. Лэпп еще в 1962 г. в выпущенной им книге представил эти цифры на основании опубликованных данных о промышленном потенциале основных произ- водств по созданию ядерного оружия. По его подсчетам, США к 1967 г. будут иметь запасы ядерного оружия, оцениваемые миллиардами тонн тринитротолуола (ТНТ).

Дж. Кеннеди еще в 1960 г. заявил, что запасы ядер- ного оружия во всем мире эквивалентны 30 млрд. т. ТНТ. По минимальным оценкам в 1970 г. эта цифра увеличи- лась в два раза. Это означает, что в арсеналах мира хра- нится, вернее находится в состоянии боевой готовности,

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

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

Трудно вообразить всю мощь и потенциал разруши- тельного действия, скрытый за этими цифрами. Запасы ядерного оружия достаточны, чтобы несколько раз унич- тожить цивилизацию и культуру на нашей планете.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

За время испытаний (1955—1974 гг.) были взорваны ядерные бомбы, эквивалентные приблизительно 130 Мт тротила. Как мы видели выше, минимальные запасы ядерного оружия оцениваются в 60 млрд. т тротила. Допустим, что только половина всех запасов будет использована в ядерной войне. Это значит, что за короткий промежуток времени в атмосферу будет выброшено примерно в 300 раз больше радиоактивных веществ, чем за весь период испытаний. Средняя облученность от проведенных испытаний была 0,4 рад. Для того же полушария, где были проведены взрывы, она будет в три раза выше, т. е. 1,2 рад. В триста раз больший выброс даст величины порядка 360 рад. Эта доза благодаря массивному единовременному выбросу реализуется в более короткие сроки, вероятно за 10—15 лет.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Не менее интересна в теоретическом и практическом

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Крайне интересны радиоэкологические исследования

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ОГЛАВЛЕНИЕ

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

Александр Михайлович Кузин

НЕВИДИМЫЕ ЛУЧИ ВОКРУГ НАС

Утверждено к печати

редакцией серии научно-популярных изданий АН СССР

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

ИБ № 15306

Сдано в набор 17.07.79. Подписано к печати 21.01.80. Т-02517. Формат 84×108¹/₃₂.
Бумага типографская № 3. Гарнитура обыкновенная. Печать высокая.
Усл. печ. л. 7,98. Уч.-изд. л. 8,2. Тираж 50 000. Тип. зак. 529. Цена 20 коп.

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