

# ПРИРОДА

№ 4, 2001 г.

*Чернобыль и проблемы радиобиологии*

Василенко И.Я.

## **Радиация: источники, нормирование облучения**

© “Природа”

Использование и распространение этого материала  
в коммерческих целях  
возможно лишь с разрешения редакции



Сетевая образовательная библиотека “VIVOS VOCO!”  
(грант РФФИ 00-07-90172)

[vivovoco.nns.ru](http://vivovoco.nns.ru)  
[vivovoco.rsl.ru](http://vivovoco.rsl.ru)  
[www.ibmh.msk.su/vivovoco](http://www.ibmh.msk.su/vivovoco)

# ЧЕРНОБЫЛЬ И ПРОБЛЕМЫ РАДИОБИОЛОГИИ

Прошло 15 лет после Чернобыльской аварии — крупнейшей техногенной катастрофы нашего времени. Огромная территория (более 100 тыс. км<sup>2</sup>), на которой проживают миллионы людей, оказалась загрязненной долгоживущими радиоизотопами. Чернобыль не только обострил проблемы, касающиеся влияния ионизирующего излучения на человека и окружающую среду, но и стал своего рода долгосрочным научным полигоном для изучения самых разных радиобиологических эффектов. (См., напр.: Следы Чернобыля в природной среде // Природа. 1991. №5. С.41—70.)

Сегодня, вспоминая это трагическое событие, мы попытаемся осветить некоторые вопросы, связанные с радиационным воздействием: каковы современные представления о радиационном фоне Земли? Каково влияние малых доз? Как сегодня оценивается для человека генетический риск от облучения? Какова роль природных экосистем при радиоактивном загрязнении?

## Радиация. Источники, нормирование облучения



**Иван Яковлевич Василенко**, доктор медицинских наук, профессор, лауреат Государственной премии СССР (1969), ведущий научный сотрудник Государственного научного центра РФ — Института биофизики. Участник

ликвидации

сов — токси-

И.Я.Василенко

последствий аварии на Чернобыльской АЭС 1986 г. Область научных интере-

кология продуктов ядерного деления, радиэкология, радиационная гигиена.

**Р**адиационный фон Земли формируют природные и антропогенные ионизирующие излучения, которые испускают не только космические, но и разнообразные земные источники — ядерные взрывы, выбросы предприятий атомной энергетики, отработанное ядерное топливо и др.

Население нашей планеты постоянно подвергается внешнему и внутреннему облучению. Дозы этого облучения в зависимости от уровней космического излучения и содержания естественных и антропогенных радионуклидов в литосфере, гидросфере, атмосфере и биосфере различаются в широком диапазоне. Современный подход к оценке влияния ионизирующих излучений на здоровье человека основывается на рекомендациях Научного комитета по действию атомной радиации при ООН (НКДАР) [1,2], Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ), а также национальных комиссий.

## Естественный радиационный фон

Космическое пространство пронизано заряженными частицами разного происхождения: галакти-

ческим излучением, корпускулярным излучением Солнца и захваченными частицами, удерживаемыми на околоземных орбитах магнитным полем Земли. Галактическое излучение состоит главным образом из протонов с небольшим количеством ионов гелия и более тяжелых металлов, а также электронов, фотонов, нейтронов. Энергетический спектр космических лучей простирается до огромных энергий — свыше  $10^{20}$  эВ/нуклон. Корпускулярное излучение Солнца по составу близко к галактическому, но имеет заметный временной ход и ограничено более низкими энергиями частиц — до  $5 \cdot 10^{10}$  эВ/нуклон. Эмиссия излучения протекает непрерывно и отражает 11-летний цикл солнечной активности.

Первичные космические лучи в результате процессов ионизации и ядерных взаимодействий быстро теряют свою энергию и практически исчезают на высоте около 20 км. Образуется вторичное излучение, интенсивность которого падает по мере снижения в атмосфере. Мощность дозы, поглощаемой воздухом на уровне моря в средних широтах, составляет всего 32 нГр/ч (с высотой она удваивается через каждые 1.5 тыс. м); для людей это соответствует средней мощности эквивалентной дозы 355 мкЗв/ч (для всего населения Земли —  $1.9 \cdot 10^6$  чел-

Таблица 1  
Радионуклиды земной коры

Радионуклид	$T_{1/2}$ , лет	Содержание в 1 т земной коры	
		г	Бк
$^{40}\text{K}$	$1.3 \cdot 10^6$	3.1	$7.8 \cdot 10^5$
$^{48}\text{Ca}$	$2.0 \cdot 10^{18}$	66	$4.9 \cdot 10^2$
$^{87}\text{Rb}$	$6.2 \cdot 10^{10}$	84	$2.1 \cdot 10^5$
$^{96}\text{Zr}$	$5.0 \cdot 10^{17}$	7.8	$1.8 \cdot 10^{-2}$
$^{115}\text{In}$	$6.0 \cdot 10^{14}$	0.1	$1.9 \cdot 10^{-1}$
$^{130}\text{Te}$	$1.0 \cdot 10^{21}$	0.003	$2.4 \cdot 10^{-7}$
$^{138}\text{La}$	$2.0 \cdot 10^{11}$	0.016	$1.4 \cdot 10^3$
$^{144}\text{Nd}$	$1.5 \cdot 10^{15}$	4.8	$2.6 \cdot 10^1$
$^{147}\text{Sm}$	$1.3 \cdot 10^{11}$	1.2	$7.7 \cdot 10^2$
$^{176}\text{Lu}$	$2.4 \cdot 10^{10}$	0.03	$9.7 \cdot 10^1$
$^{187}\text{Re}$	$> 1 \cdot 10^{10}$	0.0006	$1.0 \cdot 10^7$
$^{232}\text{Th}$	$1.4 \cdot 10^{10}$	8	$3.2 \cdot 10^4$
$^{235}\text{U}$	$7.13 \cdot 10^8$	0.022	$1.8 \cdot 10^3$
$^{238}\text{U}$	$4.5 \cdot 10^9$	3.0	$3.7 \cdot 10^4$

\* Напомним: эквивалентная доза  $H$  (Зв) ионизирующего излучения определяется как  $H = Dk$ , где  $D$  — поглощенная доза (Гр),  $k$  — коэффициент качества излучения. Грей (Гр) — поглощенная доза, при которой веществу массой 1 кг передается энергия 1 Дж. Зиверт (Зв) — доза, при которой произведение поглощенной дозы в биологической ткани стандартного состава на коэффициент качества равно 1 Гр. Коэффициент качества для рентгеновского и  $\gamma$ -излучения принят за единицу.

Таблица 2  
Основные составляющие естественного радиационного фона

Источник облучения мкЗв/чел:	Годовая эквивалентная доза облучен		
	внешнего	внутреннего	всего
<b>Космические лучи:</b>			
ионизирующие частицы;	300		300
нейтроны	55		55
Космогенные радионуклиды		15	15
<b>Земные радионуклиды:</b>			
$^{40}\text{K}$	150	180	330
$^{87}\text{Rb}$		6	6
<b>Уран-радиевый ряд*</b>			
$^{238}\text{U} \rightarrow ^{234}\text{U}$		5	5
распад $^{230}\text{Th}$		7	7
распад $^{226}\text{Ra}$	100	7	107
$^{222}\text{Rn} \rightarrow ^{214}\text{Po}$		1100	1100
$^{210}\text{Pb} \rightarrow ^{210}\text{Po}$		120	120
<b>Ториевый ряд</b>			
распад $^{232}\text{Th}$		3	3
$^{228}\text{Ra} \rightarrow ^{224}\text{Ra}$	160	13	173
$^{220}\text{Rn} \rightarrow ^{208}\text{Tl}$		160	160
<b>Всего</b>	<b>800</b>	<b>1600</b>	<b>2400</b>

\*В радиоактивных рядах указаны этапы распадов, вносящих основные вклады в формирование доз.

В суммарных дозах учтены вклады от остальных радионуклидов, не указанных в таблице.

Зв/ч)\*.

В атмосфере, литосфере, биосфере под воздействием космических лучей (как первичных, так и вторичных) протекают ядерные реакции, в которых образуются нейтроны, протоны, пионы, каоны, а также радионуклиды:  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{22}\text{Na}$  и др. Из 20 космогенных радионуклидов наиболее значим  $^{14}\text{C}$  ( $T_{1/2} = 5730$  лет) как изотоп основного биогенного элемента.

Земная радиация обусловлена естественными радионуклидами, которые содержатся в ее коре. Из не распавшихся к настоящему времени сохранились 23 радиоизотопа. Они получили название примордиальных (табл.1), сроки их жизни сопоставимы с возрастом Земли. В трех семействах — урана, тория и актиния — по мере их распада образуются еще 40 радиоизотопов.

Радионуклиды постоянно присутствуют во всех компонентах окружающей среды: воздухе, почве, воде, растительных и жи-

вотных организмах, включая человека. Основной источник их поступления в биосферу — горные породы, образующие толщу земной коры. Благодаря деструктивным процессам метеорологического, гидрологического, геохимического и вулканического характера радионуклиды широко рассеиваются в окружающей среде. Важную роль в этих процессах играет вода как универсальный растворитель. Концентрация радионуклидов в почве определяется содержанием их в материнской породе, а в природных водах — условиями их образования. В воздухе присутствуют радионуклиды как космогенного, так и земного происхождения. Особое значение имеет поступление из верхних слоев почвы радиоактивных газов: радона ( $^{222}\text{Rn}$ ), торона ( $^{220}\text{Tn}$ ), актинона ( $^{219}\text{An}$ ) и продуктов их распада.

Радионуклиды, находясь в смеси со стабильными элементами, поступают с пищей, водой

и воздухом в организм человека и становятся источником постоянного облучения. С течением времени благодаря обменным процессам в организме устанавливается равновесное содержание радионуклидов, уровень которого зависит еще от концентрации их в продуктах питания, воде и воздухе, а дозные нагрузки еще и от физико-химических свойств изотопов. Наибольшее значение в облучении имеют  $^{40}\text{K}$ ,  $\text{U}$ ,  $\text{Th}$  и продукты их распада. По оценкам НКДАР, за счет радона и торона формируется 3/4 годовой индивидуальной дозы получаемой от земных источников [3]. Радон по сравнению с тороном вносит в суммарную дозу значительно больший вклад, а дозы формируются в основном за счет дочерних продуктов распада этих изотопов.

Уровни радиации неодинаковы для разных мест земного шара и зависят от концентрации радионуклидов в земной коре. Мощность дозы варьирует от 15 до 160 нЗв/час. Эквивалентные дозы от естественных источников в регионах с нормальным радиационным фоном приведены в табл.2. На Земле есть районы с более высокими уровнями: Индия, Бразилия, Китай, Иран, горные районы России (Кавказ) и др.

## Изменение естественного радиационного фона

Естественный радиационный фон Земли постоянно растет, и этот процесс, к сожалению, ускоряется. Происходит это главным образом за счет того, что на поверхность Земли постоянно извлекаются огромные количества полезных ископаемых: руды черных и цветных металлов, строительные материалы, органические энергоносители, минеральные удобрения. Рассеивание радиоактивных веществ из этих ис-

\* Подробнее см.: Василенко И.Я. Горячие частицы // Природа. 1994. № 10. С. 25—31.

точников в биосфере и включение в биогеохимические циклы привело к повышению внешнего и внутреннего облучения всех растительных и животных организмов, включая человека. Повысились уровни ионизирующего излучения не только на поверхности Земли, но и в жилых и производственных помещениях. Для гражданского и промышленного строительства часто используют содержащие радионуклиды промышленные отходы (например, золу шлаков черной и цветной металлургии). В плохо вентилируемых помещениях концентрации радона могут в десятки—сотни раз превышать его среднее содержание в наружном воздухе (для которого фоновая активность около  $3 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$ ). Жители в таких условиях подвергаются интенсивному облучению, и в первую очередь у них поражаются органы дыхания. Ингаляционное поступление радона и его дочерних продуктов распада ведет к осаждению микроаэрозолей в верхних дыхательных путях\*. Особую опасность приобретает наличие радона и его продуктов распада в урановых рудниках. Впервые рак легкого (преимущественно бронхов) зарегистрирован в конце XIX в. у шахтеров, проработавших 13—35 лет на рудниках Шнееберга и Яхимова [4,5]. Кстати, было замечено, что возникновению рака у шахтеров способствовало курение.

Потенциальный источник радиации — весь комплекс предприятий атомной энергетики. Радионуклиды поступают во внешнюю среду не только при добыче урановой руды, но и при получении урановых концентратов и металлического урана, изготовлении ТВЭЛов, а также во время выбросов АЭС и др. Особую

опасность представляет плутоний (наиболее токсичный радионуклид), загрязняющий атмосферу в результате деятельности радиохимических предприятий. Ингаляционное облучение плутонием персонала приводит вначале к легочной патологии (развитию опухолей в легких), затем поражаются костные и другие ткани организма.

Кроме того, человек подвергается дополнительному облучению во время рентгенодиагностики или радиотерапии, а также полетов на современных самолетах. Облучение космонавтов обычно не превышает 5 мЗв, но при нахождении в космосе до полугода дозы достигают 55 мЗв. Дополнительным источником облучения населения становятся различные бытовые приборы.

Перечисленные факторы ведут к повышению концентрации радиоактивных веществ в окружающей среде и, как следствие, росту внешнего и внутреннего облучения населения. За истекшее историческое время дозные нагрузки на основную массу населения повысились незначительно, однако на тех, чья про-

фессиональная деятельность связана с атомной энергетикой, они значительны.

## Искусственный радиационный фон

Одним из основных источников техногенного повышения радиационного фона Земли стали испытания ядерного оружия Соединенными Штатами, Советским Союзом, Англией, Францией и Китаем. Взорвано свыше 2 тыс. зарядов различной мощности, в том числе свыше 500 в атмосфере. Мощность всех ядерных зарядов составила 545 Мт (в тротиловом эквиваленте) при суммарной мощности по делению 217 Мт (около 40%), что привело к выбросу в атмосферу изотопов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ , общие активности которых оценены в 26 и 20 МКи соответственно\*. Средняя плотность загрязнения в Северном полушарии составила по  $^{137}\text{Cs}$  140,  $^{90}\text{Sr}$  89 МКи/км<sup>2</sup> [2]. В результате ядерных взрывов в окружающую среду поступают продукты деления ядер урана и плутония. При этом образуется свыше 200 радиоизотопов средней части таблицы Менделеева (от цинка

\* Дозы до 2 мЗв принято считать малыми.

Таблица 3  
Среднегодовые эквивалентные дозы облучения населения в России  
(Кириллов В.Ф. и др., 1988)

Источник ионизирующего излучения	Вид облучения	Доза, мкЗв/чел	
Естественный радиоактивный фон	внешнее	650	
	внутреннее	1600	
	всего	2250	
Технологически измененный естественный радиационный фон: естественные радионуклиды, содержащиеся в стройматериалах и воздухе помещений	внешнее	100	
	внутреннее	1300	
	всего	1400	
минеральные удобрения	всего	0.15	
	угольные электростанции	всего	2
Искусственный радиационный фон: АЭС	глобальные выпадения, вследствие испытаний ядерного оружия	всего	0.17
		внешнее	10
		внутреннее	15
		всего	25
Рентгенодиагностика и радиоизотопная терапия	всего	1400	
Суммарная доза от всех источников		5077	

\* Напомним: в системе СИ единица радиоактивности — Бк (беккерель). Такую активность имеет источник, в котором происходит 1 радиоактивный распад за 1 с. Однако на практике чаще пользуются старой единицей активности — Ки (Кюри). В источнике с активностью 1 Ки происходит  $3.7 \cdot 10^{10}$  распадов в 1 с. Поэтому  $26 \text{ МКи} \approx 9.6 \cdot 10^{17} \text{ Бк}$ .

Таблица 4  
Допустимые дозы облучения персонала и населения

Год	Категория облучаемых лиц	Допустимая доза, Примечание	
		мЗв/год	
1946		600	Различий в допустимых дозах
1950		300	Различий в допустимых дозах персонала (участников испытаний ядерного оружия) и населения не делалось
1955		15	В случае аварии допускалось однократное облучение 250 мЗв, но не более 1000 мЗв за год
1957	Категория А*	150	то же
	Категория Б**	15	
	Все население	Не выше природного фона	
1961	Категория А*	50	то же
	Категория Б**	5	то же
	Все население	0.5	
1969	НРБ-69***		Впервые введено понятие «предел» для категории Б и всего населения
	Категория А	50	
	Категория Б	5	
	Все население	1.7	
1976	НРБ-76		
	Категория А	50	
	Категория Б	5	
1987	НРБ-76/87		
	Категория А	50	
	Категория Б	5	
1996	НРБ-96		Указанные допустимые пределы доз введены с 1 января 2000 г.
	Категория А	20	
	Категория Б	5	
	Население	1****	

\* Категория А — персонал.

\*\* Категория Б — ограниченная часть населения, не работающая непосредственно с источниками

до гадолия). Поэтому источником загрязнения стали продукты ядерного деления вместе с неразделившейся частью урана и плутония, а также радионуклиды наведенной активности [6].

По данным НКДАР при ООН, эквивалентная доза, полученная жителями Северного полушария в результате глобальных выпадений продуктов ядерного деления, составила 4.5 мЗв и Южного — 3.1 мЗв [1]. Эти дозы относятся к категории малых\*. Вклад внутреннего облучения за счет

перорального и ингаляционного поступления радионуклидов и внешнего облучения составил 71.5 и 24% соответственно. Основное значение в формировании доз имели  $^{14}\text{C}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{96}\text{Zr}$ . Ожидаемая коллективная доза при полном их распаде составит  $3 \cdot 10^7$  чел-Зв. В зонах ближних выпадений при ядерных взрывах дозы облучения были значительно выше, а в отдельных случаях они даже достигали поражающих. Особую опасность представляло поступление в ор-

ганизм детей с продуктами питания изотопа  $^{131}\text{I}$ . Облучение населения за счет выбросов предприятий атомной энергетики в режиме нормальной эксплуатации незначительно, однако в случае крупной аварии ситуация резко меняется. Примером могут служить аварии на Южном Урале, ЧАЭС и др.

## Малые дозы радиации

Изменение радиационного фона Земли затрагивает не только ограниченные группы профессиональных работников, но и население в целом (табл.3). Широкое использование ионизирующих источников в народном хозяйстве, медицине, науке, военном деле потребовало регламентации облучения для всего населения. В 1934 г. впервые Международной комиссией по защите от рентгеновского излучения и радия была рекомендована допустимая доза (200 мР/сут). В последующем, по мере выявления неблагоприятных последствий облучения, а также с накоплением знаний и опыта защиты, нормативы, к разработке которых подключилась и Национальная комиссия России, многократно пересматривались в сторону их снижения (табл.4).

Какова опасность малых доз радиации? До сих пор нет однозначного ответа на этот вопрос. Критерием опасности облучения считают учащение случаев онкологических заболеваний и генетических нарушений по отношению к спонтанному уровню. Дополнительный рост числа таких недугов становится значимым в экономическом плане. Возможный риск возникновения заболеваний не должен превышать риск их возникновения в благополучных отраслях производства.

Любая деятельность человека, как известно, связана с определенным риском. Человек и общество идут на риск ради получения материальной выгоды. При регламентации допустимого

облучения персонала и населения исходят из гипотезы беспороговой зависимости доза—эффект, считая, что при любой сколь угодно малой дозе, облучение может привести к возникновению злокачественных новообразований и генетических нарушений. Для оценки риска при малых дозах эффекты, наблюдаемые при средних и больших дозах, экстраполируют к величине 10 мЗв, принимая начальный участок дозовой зависимости линейным. Такой подход наиболее приемлем в обеспечении радиационной безопасности. Однако остается не ясным, будет ли ответная реакция организма на облучение при малых дозах такой же, как и при больших.

Согласно последним оценкам, среди 1 млн человек, облученных дозой 10 мЗв каждый, злокачественные новообразования могут быть спровоцированы у 480 человек, причем в 400 случаях — со смертельным исходом, в 80 — с серьезными генетическими нарушениями [7]. Эти величины составляют лишь незначительную часть спонтанной заболеваемости: среди 1 млн человек от онкологических заболеваний умирает около 200 тыс., и это число увеличивается ежегодно примерно на 2%.

Установить реальную величину риска от облучения малыми дозами в эксперименте и эпидемиологических наблюдениях невероятно сложно. Для статистически значимого установления зависимости доза—эффект на уровне облучения 0.1 и 0.01 Зв наблюдаемые группы и аналогичные контрольные должны насчитывать соответственно 100 тыс. и 10 млн человек. В экспериментах потребуется также огромное число подопытных животных. При этом необходимо исключить или учесть (что затруднительно) влияние других вредных факторов внешней среды, которое может быть более сильным, чем облучения в малых дозах. В условиях глобального загрязнения внешней среды раз-

личного рода физическими, химическими и биологическими агентами сделать это практически невозможно.

Решать проблему малых доз радиации необходимо комплексно — сочетая теоретические исследования с экспериментальными и эпидемиологическими. Кратко остановимся на особенностях биологического действия радиации. Поглощение энергии в организме происходит в чрезвычайно короткие промежутки времени, измеряемые ничтожно малыми долями секунд, и сопровождается ионизацией и возбуждением молекул и атомов с последующим образованием высокоактивных в химико-биологическом отношении радикалов. Эти первоначальные изменения, не имеющие порога, реализуются на уровне клетки, клеточных ассоциаций и тканей в биологические изменения, которые протекают с различной скоростью. Одновременно происходит и восстановление поврежденных на всех уровнях: клетка, ткань, орган и организм в целом. Считают, что 90% повреждений восстанавливается (при облучении в несмертельных дозах). Радиационные повреждения у непогибших клеток могут сохраняться в течение длительного времени, передаваясь при их делении. Остаточные повреждения служат основой формирования отдаленной патологии.

При остром внешнем облучении формирование доз происходит в короткие промежутки времени, а при поступлении радионуклидов в организм — в течение длительного времени, иногда в течение всей жизни человека (например, при поступлении плутония). Биологический эффект определяется не только величиной поглощенной дозы, но и пространственно-временным распределением ее в теле человека. Важное значение имеют морфофункциональные особенности тканевых структур (где поглощается энергия) определяющие как степень повреждения, так и интенсивность восстановительных

процессов.

По современным данным, облучение человека может привести к детерминированным и стохастическим последствиям. Первые проявляются после гибели критического числа клеток, потерю которых организм не может компенсировать размножением оставшихся жизнеспособных клеток. Клинически детерминированные эффекты выражаются в функциональных нарушениях отдельных органов и организма в целом после облучения и проявляются, когда доза превышает некоторый порог. С ростом дозы тяжесть поражения быстро нарастает. Величина порога для разных тканей неодинакова. Раньше других страдают «критические» органы с иерархической структурой тканей и максимальной скоростью клеточного обновления. Наиболее радиочувствительны — красный костный мозг, хрусталик глаза и органы размножения. Пороговая доза для кратковременного угнетения кроветворения при остром облучении — 0.5 Зв, для помутнения хрусталика — 0.5—2 Зв, временная стерильность у мужчин возникает при дозе 2.5—6 Зв. Для плода доза 0.2 Зв чревата серьезной умственной отсталостью ребенка после рождения.

В производственных условиях персонал (а в аварийных условиях и население на радиоактивно-загрязненной местности) подвергается хроническому облучению, как правило, в малых дозах и с низкой мощностью. Биологическая эффективность такого облучения существенно ниже острого, что связано с включением компенсаторных механизмов, которые в таких условиях могут в течение определенного времени обеспечивать нормальную жизнедеятельность организма. Для хронического облучения характерно медленное развитие нарушений. При длительном слабоминтенсивном облучении (1 мЗв в год) развитие хронической лучевой болезни становится возможным, когда накопление суммарной дозы достигает несколько

живертов и больше. В реакции организма можно выделить четыре фазы: отсутствие или слабая выраженность функциональных нарушений, напряжение или нарушение защитно-компенсаторных механизмов вплоть до структурных повреждений. О развитии хронической лучевой болезни свидетельствуют клинические проявления недостаточности компенсаторных механизмов. Длительность фаз и переход из одной в другую зависит от мощности и величины поглощенной дозы, действия других вредных факторов и условий жизни человека.

Стохастические эффекты (злонакачественные новообразования и генетические нарушения) обусловлены повреждением клеток на молекулярном уровне от случайного взаимодействия заряженной частицы излучения с молекулой ДНК. Такие последствия могут проявиться в отдаленные сроки при поражении даже одной клетки. Таким образом, вероятность возникновения нарушений в организме пропорциональна поглощенной дозе, а их тяжесть от величины дозы не зависит. Однако это всего лишь гипотеза, и многие исследователи с ней не согласны, так как, по данным эпидемиологических наблюдений и экспериментальных исследований, беспороговое действие радиации пока не подтверждено.

Широкомасштабные эпиде-

миологические наблюдения не выявили статистически значимых различий в состоянии здоровья населения между регионами с повышенным и «нормальным» уровнями естественной радиации. Оценивались частота злокачественных новообразований, состояние репродуктивной функции, продолжительность жизни, генетические нарушения и другие показатели.

Немало исследователей вообще отрицают вредное влияние естественной радиации и считают ее необходимым компонентом окружающей среды, в которой проходило и проходит развитие жизни на Земле. Биота в процессе эволюции адаптировалась к слабому облучению. В специальных опытах показано, что радиация — физиологически значимый фактор роста и развития всего живого [8]. Стимулирующее действие малых доз ионизирующих излучений на биологические процессы (явление радиационного гормезиса) выражается в повышении жизненной активности, сопровождающемся улучшением здоровья, плодовитости, продолжительности жизни, снижением числа онкологических заболеваний. Повреждающее действие радиации проявляется лишь с повышением дозы. Радиационный гормезис вписывается в общепризнанный закон Арндта—Шульца.

Более того, по мнению

А.М.Кузина [9], живая ткань после облучения в малых дозах сама становится источником некоего вторичного, биологического, излучения, оказывающего стимулирующее действие на живые организмы. Автор приходит к заключению о необходимости природной радиации для возникновения жизни на Земле.

Любопытные данные опубликовал американский исследователь Б.Коэн. В широкомасштабном эпидемиологическом исследовании, во время которого было обследовано 200 млн человек (80% населения США), изучалось влияние радона на смертность людей от рака легких. Содержание газообразного радонуклида в жилых помещениях варьировало в широких пределах, в единицах радиоактивности — от 20 до 250 Бк·м<sup>-3</sup>. Выяснилось, что в помещениях с меньшим содержанием радона смертность среди проживающих выше [10]. Выводы Коэна — своего рода подтверждение результатов исследований и других авторов [11]. Видимо, в процессе эволюции в организме выработалась система восстановления, регенерации и элиминации повреждений молекул и клеток. Малые дозы радиации стимулируют образование соответствующих ферментов репарации ДНК, поврежденных не только радиацией, но и другими агентами. С повышением дозы защитные механизмы уже не могут обеспечить гомеостаз организма.

## Литература

1. Ионизирующее излучение: источники и биологические эффекты. Доклад Научного комитета по действию атомной радиации при ООН. Нью-Йорк, 1982. Т.1.
2. Источники, эффекты и опасность ионизирующей радиации. Доклад на Генеральной Ассамблее ООН за 1988 г. М., 1992.
3. Радиация: дозы, эффекты, риск. М., 1988.
4. Холзиди Д.А., Рашинг Д.Е., Коулман Р.Д. и др. Проблемы радона в урановых рудниках. М., 1961.
5. Радиационная защита на урановых и других рудниках: Публикация Международной комиссии по радиологической защите №24. М., 1979.
6. Василенко И.Я. Биологическая опасность продуктов ядерного деления // Природа. 1995. №4. С.78—86.
7. Пределы годового поступления радионуклидов в организм работающих, основанные на рекомендациях Международной комиссии по радиологической защите 1990 года: Публикация № 61. М., 1994.
8. Кузин А.М. Стимулирующее действие ионизирующих излучений на биологические процессы. М., 1977.
9. Кузин А.М. Вторичное биологическое излучение — лучи жизни. Пущино, 1997.
10. Cohen B. // Health Phys. 1995. V.67. P.157—174.
11. Кеирим-Маркус И.Б. // Мед. радиология и радиационная безопасность. 1977. №2. С.18—24; Кириллов В.Ф., Книжников В.А., Коренков И.П. Радиационная гигиена. М., 1988.