

ОЦЕНКА РАДИОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ ПЕРСОНАЛА ГРУППЫ «А» НОВОСИБИРСКОЙ ОБЛАСТИ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ РАЗЛИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В.П. Суслин

Управление Роспотребнадзора по Новосибирской области

В статье рассматриваются вопросы по оценке риска отдаленных последствий облучения малыми дозами ионизирующей радиации и по разработке концептуальных подходов к оптимизации системы мероприятий по радиационной защите и реабилитации персонала.

The article focuses on the problems of evaluation of long-term consequences of light ionizing radiation and on elaboration of brand new approaches to optimization of radioprotection system and personnel aftercare.

Актуальность проблемы

Проблема отдаленных последствий облучения населения низкими дозами ионизирующей радиации в современный период приобретает особенно актуальное значение. В первую очередь это связано с тем, что в XX в. за 50 лет ядерной эры на Земном шаре произошло более 400 аварий и инцидентов, включая испытания ядерных устройств в атмосфере в 1949—1962 гг., а также Кыштымскую и Чернобыльскую аварии. Имеющиеся данные не дают оснований для окончательного заключения о радиогенной природе рака и не позволяют рассчитать коэффициенты, необходимые для прогнозирования риска заболевания в течение последующей жизни. Статистика злокачественных новообразований в основном сводится к количественным показателям без объяснения причины заболеваемости населения.

Утверждается, что нет свидетельств серьезного воздействия облучения на общественное здоровье. Нет также научных свидетельств повышения общей заболеваемости раком или общей смертности от рака, которые соотносились бы с полученной лучевой нагрузкой. Все сказанное в значительной мере объясняет известную противоречивость научных публикаций на эту тему.

Радиационный риск при облучении в малых дозах, если допустить отсутствие порога, настолько мал, что его трудно выявить на фоне спонтанного бластомагенеза. По-прежнему сложной остается проблема оценки влияния на человека малых доз ионизирующей радиации, включая наличие или отсутствие порога действия ионизирующей радиации.

С учетом неопределенности и противоречий в оценке последствий облучения для пер-

сонала и населения, нами были определены следующие цель и задачи исследования.

Цель работы

Оценить риск отдаленных последствий облучения малыми дозами ионизирующей радиации и разработать концептуальные подходы к оптимизации системы мероприятий по радиационной защите и реабилитации персонала.

Задачи исследования

1. Оценить индивидуальные и коллективные эффективные дозы облучения персонала группы А.
2. Оценить риск индукции стохастических эффектов у персонала от различных видов источников ионизирующего излучения.
3. Дать прогноз риска стохастических эффектов до 2013 г.
4. Разработать концептуальные подходы по обеспечению радиационной безопасности персонала.

Исходными данными для расчетов радиационного риска являлись индивидуальные эффективные дозы облучения персонала из статистической отчетной формы № 1-ДОЗ и его численность на каждом предприятии, учреждении или организации, общая численность персонала группы А и Б в Новосибирской области, медико-демографические показатели за несколько лет. Кроме того, данные об индивидуальных и коллективных эффективных дозах медицинского и природного облучения.

Общей научно-методической основой для решения задач при оценке радиационного риска в области малых доз является вероятностная модель. МКРЗ и НКДАР ООН предложили две модели радиационного риска. Это аддитивная

(абсолютная) и мультипликативная (относительная) модели. В общей форме они записываются следующими математическими уравнениями:

1) аддитивная:

$$\mu(e, a, D) = \mu_0(e, a, D) + h a(e, a) \times f_0(D),$$

2) мультипликативная:

$$\mu(e, a, D) = \mu_0(e, a, D) \times (1 + g_m(e, a) \times f_m(D)),$$

где:

$\mu(e, a, D)$ — повозрастные коэффициенты смертности от злокачественных новообразований после облучения разовой дозой D в возрасте e ;

$\mu_0(a)$ — повозрастные коэффициенты смертности от спонтанных злокачественных новообразований;

$e(a)$ — возраст облучения;

g_m, h — набор параметров, зависящих от возраста наблюдения, возраста при облучении, пола;

$f_m(D)$ — функция, описывающая зависимость риска от дозы D .

Для рака щитовидной железы используется модель абсолютного риска, для остальных видов злокачественных новообразований модель относительного риска. Для лейкемии выбирается линейно-квадратичная, для остальных раков — линейная зависимость «доза-эффект».

Результаты исследования

По исходным данным центров индивидуального дозиметрического контроля был рассчитан пожизненный индивидуальный риск смерти от воздействия на персонал группы А различных источников ионизирующего излучения (рис. 1). Из рисунка видно, радиологический риск существенным образом зависит от возраста облучения мужчин и женщин: до 25 лет он выше у женщин, с 25 до 45 лет выше у мужчин, с 45 до 60 лет выше у женщин и практически одинаков в возрасте старше 60 лет. Малые эффективные дозы облучения у мужчин и женщин и их незначительное различие практически не влияют на общую возрастную закономерность индукции риска стохастических эффектов. За период профессиональной деятельности маловероятно развитие стохастических эффектов у персонала в пенсионном возрасте старше 70 лет (рис. 1).

Расчет индивидуального ущерба показал, что в области малых доз облучения персонала группы А Новосибирской области потерянные годы жизни являются функцией возраста: у женщин 18—30 лет этот показатель выше, после 30 лет и к возрасту 80 лет и старше он постепенно снижается до нуля, у мужчин до 30 лет — устойчивая тенденция к снижению ущерба, старше 30 — этот показатель выше, чем у женщин (рис. 2).

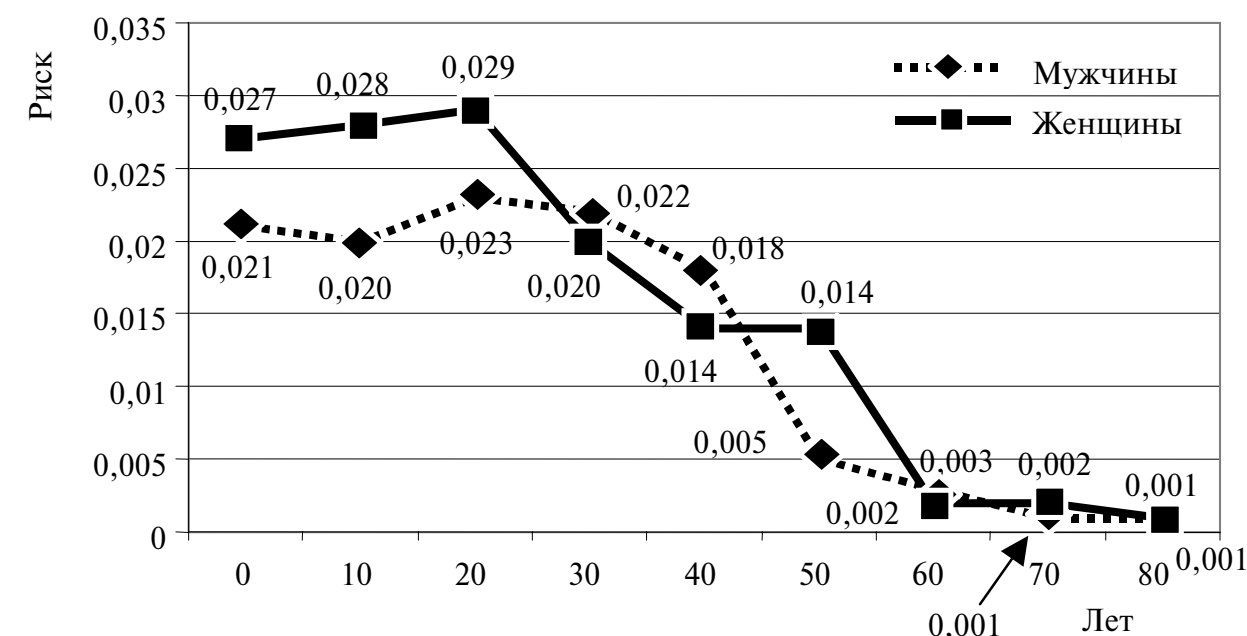


Рис. 1. Пожизненный индивидуальный риск R смерти от радиогенных злокачественных новообразований у персонала группы А в зависимости от возраста у мужчин и женщин ($E = 0,493$ мЗв у мужчин и $0,609$ мЗв у женщин, $r = 0,04$)

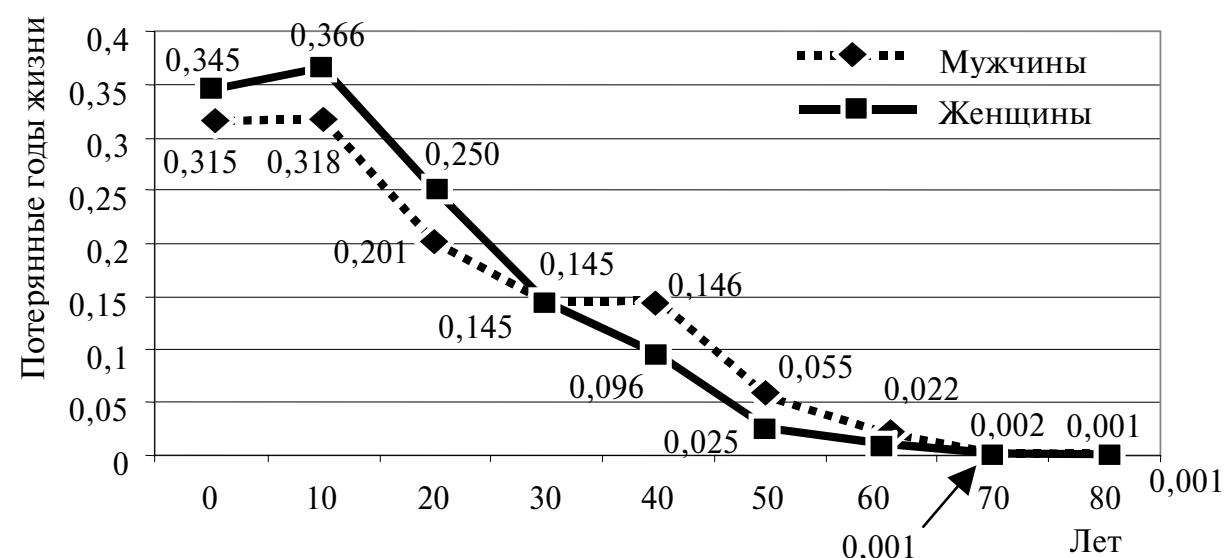


Рис. 2. Индивидуальный ущерб (потерянные годы жизни) в результате смерти персонала группы А от различных злокачественных новообразований в зависимости от возраста мужчин и женщин ($E = 0,493$ мЗв у мужчин и $0,609$ мЗв у женщин)

Одним из возможных маркеров радиационного воздействия является острый лейкоз. Было установлено, что возрастная структура острого лейкоза у населения г. Новосибирска имеет ряд особенностей. В возрасте от 0 до 14 лет он составляет 87,7 и 56,9 %, в последующие возрастные периоды характеризуется снижением доли острых лейкозов от 21,6 до 12,5 %. Таким образом, в трудоспособном возрасте 18–60 лет вероятность развития острого лейкоза у персонала минимальная (рис. 3).

При изучении особенностей заболеваемости гемобластозами выявлены значительные колебания ее уровня в зависимости от возраста. Наиболее высокий уровень заболеваемости приходится на возрастную группу 65–69 лет, что составляет 60,63 на 100 тыс. населения, в то время как в детской и подростковой группе – 5,18. Эти данные могут быть полезны при прогнозе радиологического риска развития гемобластозов у персонала.

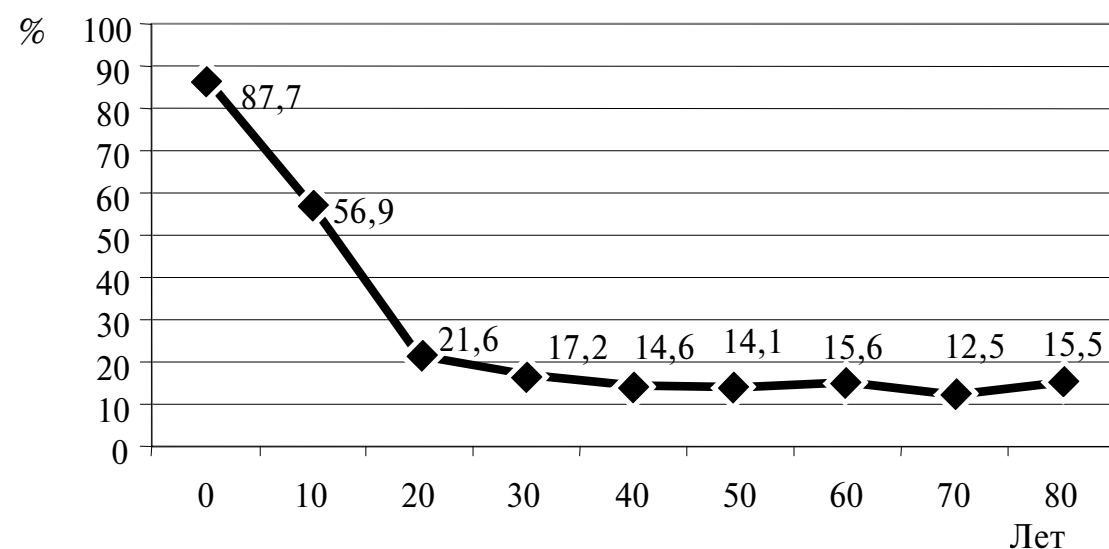


Рис. 3. Возрастная структура спонтанной заболеваемости острым лейкозом населения г. Новосибирска (1978–2000 гг.), в % (по Сосенко Е.В., 1999)

Таблица 1. Вероятность причинной обусловленности (ВПО) индукции злокачественных опухолей у облученных мужчин и женщин ($E = 0,054 - 0,099$ Зв)

Вид опухоли	Возраст на момент облучения, годы	Время после облучения, годы	ВПО, %	
			мужчины	женщины
Лейкоз	< 20	2–15	44,0	33,1
	> 20	2–20	6,7	7,3
Рак легкого	любой	10	2,4	5,1
Рак желудка	любой	10	1,3	2,3
Рак ободочной кишки	любой	10	1,3	3,5
Рак пищевода	любой	10	0,6	6,3
Рак мочевого пузыря	любой	10	2,9	3,6
Множественная миелома	любой	10	11,0	4,3
Рак молочной железы	любой	10	—	3,3
Прочие	любой	10	1,0	1,1

С целью уточнения степени взаимосвязей между заболеваемостью раком и имевшим место облучением была оценена вероятность причинной обусловленности (probability of causation) злокачественных опухолей у персонала в результате дополнительного облучения в период ядерных испытаний в атмосфере ($E = 0,054 - 0,099$ Зв). Результаты расчета с использованием мультипликативной модели приведены в табл. 1. Полученные результаты лишней раз подтверждают возможность появления отдаленных последствий от воздействия дополнительного облучения в малых дозах.

Для лейкозов, множественной миеломы, рака молочной железы и рака легкого у мужчин и женщин ВПО может достигать 2,4–44,0 %.

График на рис. 4 характеризует развитие лейкемии у населения, получившего суммарную эффективную дозу $0,058 - 0,103$ Зв вследствие испытания ядерных устройств в 1949–1962 гг., медицинского, природного и профессионального облучений. Максимум смертности от лейкемии приходится на возраст 10–20 лет и достигает минимума к 40 годам.

Прогноз риска воздействия всех радиационных факторов относительно благоприятный, ожидается его снижение на 46,5 %.

Следует отметить, что позиция МКРЗ заключается в том, что дозы ниже 5 мЗв, определенные по их системе, могут не иметь измеряемых последствий. На самом деле (ЕКРР-2003), факторы риска предсказывают, что для дозы в

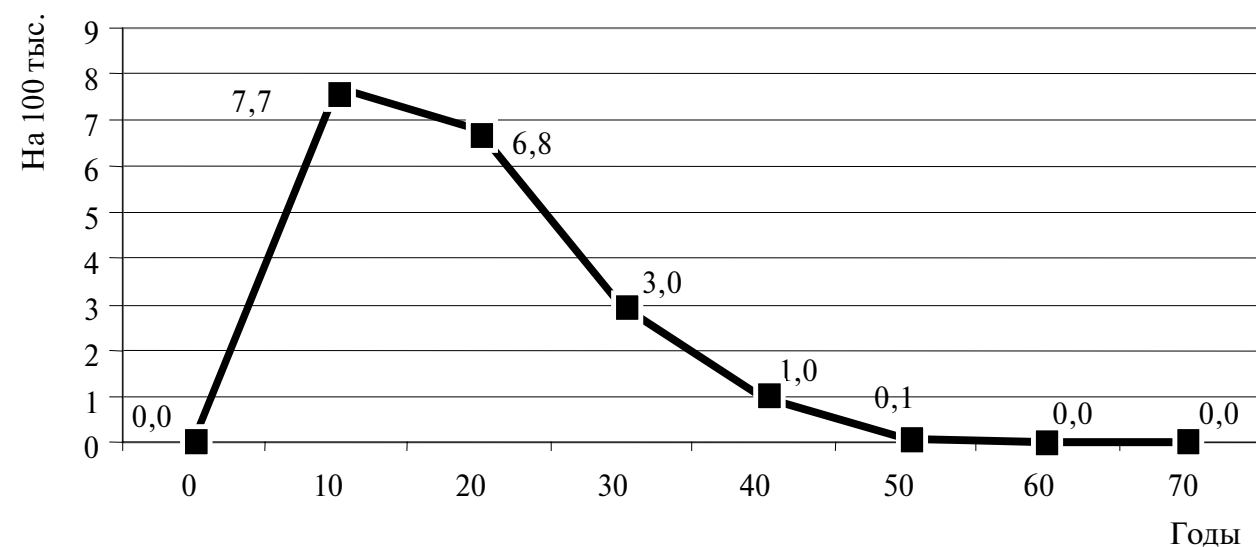


Рис. 4. Ежегодная смертность от радиогенной лейкемии ($E = 0,058 - 0,103$ Зв)

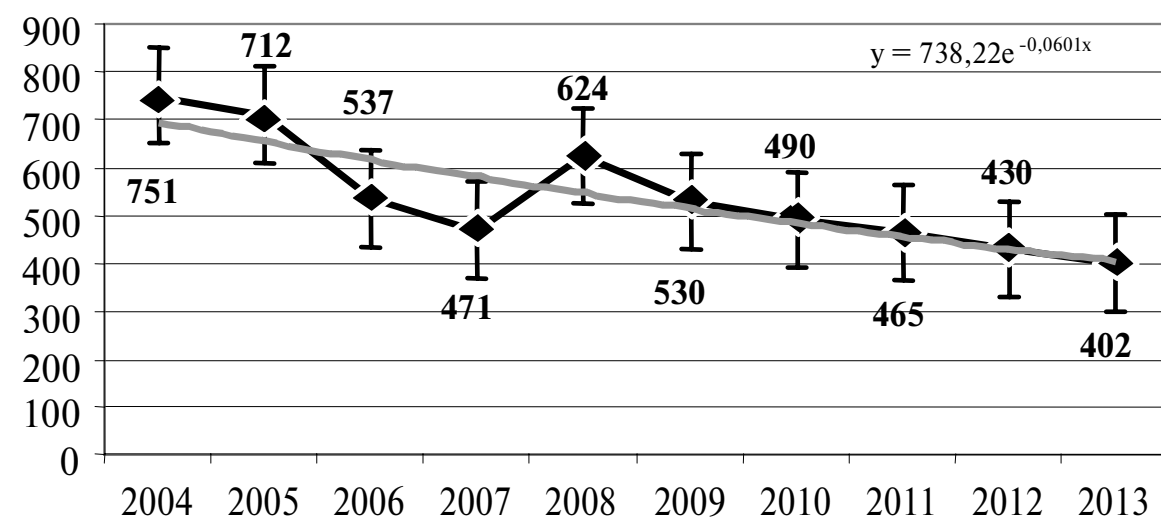


Рис. 5. Прогноз риска стохастических эффектов у населения г. Новосибирска до 2013 г. от воздействия природного, медицинского облучений и эксплуатации ИИИ

1 мЗв смертельный риск равен $5,0\text{E}-5$. Известно, что при внешнем гамма-рентгеновском облучении образуются треки. Свойство радиации вызывать ионизацию вдоль трека названо линейным переходом энергии (ЛПЭ). Радиация с низким ЛПЭ включает гамма-лучи, рентгеновские лучи и бета-частицы. Радиация с высоким ЛПЭ включает медленные нейтроны и высоко ионизирующие альфа-частицы. В табл. 2 приведены результаты подсчета числа треков проходящих через ядро клетки за год при разных дозах облучения человека.

Таким образом, в изучаемой популяции (население и персонал) возможна геномная нестабильность хромосом. Является ли это эффектом дозы или последствием эффекта трека пока не ясно.

При внешнем облучении всего тела человека индивидуальный риск максимальный

($37,0\text{E}-5$). По мере уменьшения риска различные органы и ткани можно распределить: желудок, легкие, прямая кишка, костный мозг и т. д. (табл. 4).

При оценке риска стохастических эффектов важно оценить поступление радионуклидов в организм человека с пищевыми продуктами и эффективные дозы внутреннего облучения. В 2008 г. такая работа была выполнена ФГУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Новосибирской области» (определение удельной активности и расчет доз внутреннего облучения) совместно с Управлением Роспотребнадзора по Новосибирской области (расчет треков на ядро клетки и риски). Результаты представлены в табл. 4.

Из табл. 4 видно, что геномная нестабильность хромосом маловероятна при употреблении данных пищевых продуктов, т. к. число тре-

Таблица 2. Типичные ежегодные дозы и среднее число треков в тканях населения и персонала Новосибирской области (расчет для диаметра клетки 8 мк)

Показатель	ЛПЭ	D, мГр	H, мЗв	Среднее число треков на ядро клетки в год
Население (все тело)	Низкий, γ	3,47	3,57	3,57
Легкие	Высокий, α	2,01	40,20	0,002
Костный мозг	Высокий, α	0,25	5,00	0,0005
Персонал (все тело)	Низкий, γ	< 3,72	< 3,82	< 3,82
	Высокий, α	—	—	0,014

Таблица 3. Индивидуальный риск R персонала группы А по различным тканям и органам от воздействия различных источников ионизирующего излучения ($E = 3,72$ мЗв/год, предел риска = $1,0\text{E}-3$)

№ п/п	Ткань, орган	Фактор риска	R, случаев
1	Мочевой пузырь	0,006	$2,2\text{E}-5$
2	Костный мозг	0,01	$3,7\text{E}-5$
3	Поверхность кости	0,001	$3,7\text{E}-6$
4	Молочная железа	0,004	$1,5\text{E}-5$
5	Прямая кишка	0,017	$6,3\text{E}-5$
6	Печень	0,003	$1,1\text{E}-5$
7	Легкие	0,017	$6,3\text{E}-5$
8	Пищевод	0,006	$2,2\text{E}-5$
9	Яичники	0,002	$0,7\text{E}-5$
10	Кожа	0,0004	$0,1\text{E}-5$
11	Желудок	0,022	$8,2\text{E}-5$
12	Щитовидная железа	0,0016	$5,9\text{E}-5$
13	Остальные	0,01	$3,7\text{E}-5$
14	Общий (на все тело)	0,1	$37,0\text{E}-5$

ков на ядро менее 3. Риск развития стохастических эффектов равен $10,9\text{E}-6$ при пределе риска, принятом НРБ-99 равным $1,0\text{E}-5$. Наибольший вклад в суммарную дозу внутреннего облучения дают хлеб, молоко, рыба и овощи.

Еще одной проблемой в оценке риска стохастических эффектов является дополнитель-

ное облучение населения при пользовании авиационным транспортом (рис. 6). Например, длительность полета по маршруту Новосибирск—Москва—Новосибирск — 8 ч на высоте 10 000 м. Тогда эффективная доза облучения составит: $E = 8 \text{ ч} \times 2,9 \text{ мкЗв/ч} = 23,2 \text{ мкЗв}$ или $0,0232$ мЗв. Индивидуальный риск составит:

Таблица 4. Годовое потребление пищевых продуктов, удельная активность, эффективные дозы внутреннего облучения, количество треков на ядро и риски стохастических эффектов ($r = 0,073$, предел риска = $1,0\text{E}-5$, приемлемый риск = $1,0\text{E}-6$)

№ п/п	Продукты питания	кг/год	^{137}Cs , мБк/кг	^{90}Sr , мБк/кг	E, мЗв/год	Треки/год	R, случаев
1	Хлеб	133,7	1 175	863	0,039	0,039	$2,8\text{E}-6$
2	Картофель	107,6	1 369	1 000	0,012	0,012	$0,9\text{E}-6$
3	Овощи	97,0	1 680	1 456	0,016	0,016	$1,2\text{E}-6$
4	Фрукты	23,0	1 344	990	0,001	0,001	$0,07\text{E}-6$
5	Молоко	238,2	1 135	793	0,034	0,034	$2,4\text{E}-6$
6	Мясо	37,2	1 204	898	0,007	0,007	$0,5\text{E}-6$
7	Рыба	16,0	1 404	893	0,029	0,029	$2,1\text{E}-6$
8	Яйца, шт	200,0	640	550	0,005	0,005	$0,4\text{E}-6$
9	Сахар	22,2	2 122	5 235	0,004	0,004	$0,3\text{E}-6$
10	Масло	13,8	1 767	4 850	0,002	0,002	$0,1\text{E}-6$
11	Всего	688,7	13 840	17 528	0,149	0,149	$10,9\text{E}-6$

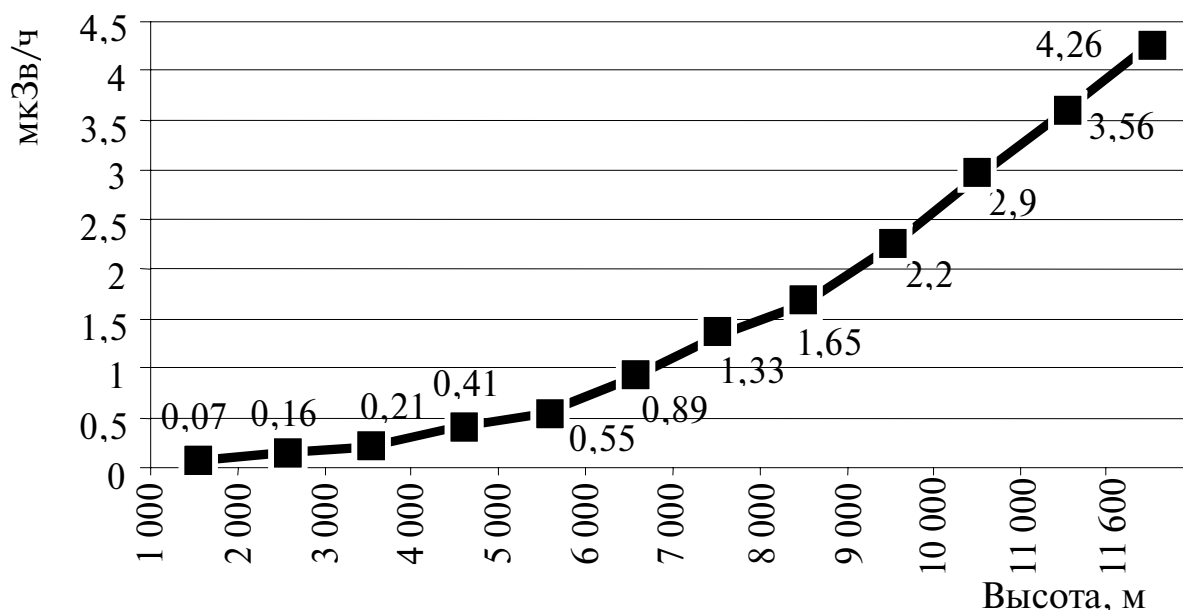


Рис. 6. Мощность дозы космического излучения на борту пассажирского самолета в зависимости от высоты полета (по Суслину В.П., 1992)

$0,0232 \text{ мЗв}/1\,000 \times 0,073 = 1,7\text{E}-6$ случаев при норме $1,0\text{E}-5$, т. е. предел риска не превышен.

Выводы

1. Потерянные годы жизни как у персонала, так и у населения являются функцией возраста.

2. У персонала старше 20 лет вероятность развития острых лейкозов возможна от 21,6 до 12,5 %.

3. Наиболее высокий уровень заболеваемости гемобластозами (ГМБ) приходится на возрастную группу 65—69 лет, поэтому вероятность развития ГМБ у персонала трудоспособного возраста (55—60 лет) ничтожно мала.

4. Дополнительный вклад в индивидуальный и коллективный риски персонала от природных и медицинских источников ионизирующего излучения соответственно равен $2,1\text{E}-4$ и $4,59\text{E}-1$ случаев.

5. Для лейкозов, множественной миеломы, рака молочной железы и рака легкого у мужчин и женщин вероятность причинной обусловленности от 2,4 до 44,0 %.

6. Максимум смертности от лейкемии приходится на возраст 20—40 лет.

7. Прогноз риска от воздействия всех радиационных факторов относительно благоприятный, ожидается его снижение на 46,5 %.

8. В изучаемой популяции (население и персонал) возможна геномная нестабильность хромосом. Является ли это эффектом дозы или последствием эффекта трека пока не ясно.

9. У 17,39 % персонала среднее число треков на ядро клетки и риск стохастических эффектов выше 3 треков в год и предела риска соответственно.

10. При внешнем гамма-рентгеновском облучении всего тела персонала индивидуальный риск максимальный. По мере уменьшения риска различные органы и ткани можно распределить: желудок, легкие, прямая кишка, костный мозг и т. д.

11. При употреблении пищевых продуктов риск увеличится на $10,9\text{E}-6$ случаев, геномная нестабильность хромосом у персонала мало вероятна, т. к. число треков на ядро менее 3, наибольший вклад в суммарную дозу внутреннего облучения дают хлеб, молоко, рыба и овощи.

12. Полет на высоте 10 км продолжительностью 8 ч приведет к повышению риска на $1,7\text{E}-6$ случаев у персонала от вторичного космического излучения.

13. В реальных условиях вопреки методологии риска используются лишь показатели — уровень профессиональной заболеваемости и травматизм у персонала.

Рекомендации по снижению риска

1. Организация и проведение углубленного медицинского осмотра лиц, получивших дозу облучения выше 1 мЗв/год и старше 40 лет.

2. Внедрение современных методов раннего выявления острого лейкоза, множественной миеломы, рака молочной железы и рака легкого у лиц старше 20 лет.

3. Учет дополнительного вклада в индивидуальный и коллективный риски персонала природных и медицинских источников ионизирующего излучения.

4. Организация цитогенетических исследований с целью выявления геномной нестабильности хромосом.

5. При анализе заболеваемости злокачественными новообразованиями, врожденными аномалиями развития, болезнями крови и кроветворных органов необходимо учитывать влияние значимых нерадиационных факторов (загрязнение атмосферного воздуха, поверхностных и подземных вод, токсических отходов и т. п.), уровни значимости и комбинации вредных факторов в окружающей среде.

6. Внедрить методологию оценки риска (ГОСТ Р ИСО 73-2001) в процедуру расследования профессиональной заболеваемости персонала.