

## INCIDENCE PROBABILITY OF DELAYED HEALTH CONSEQUENCES OF THE CHERNOBYL ACCIDENT

## ВЕРОЯТНОСТЬ РАЗВИТИЯ ОТДАЛЕННЫХ МЕДИЦИНСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ КАТАСТРОФЫ

A.H. Abdel-Ghani, A.M. El-Naggar, A.A. El-Kadi

National Center for Nuclear Safety and Radiation Control Atomic Energy Authority, Cairo, Egypt  
101 Kasr El-Aini Str., Cairo, Egypt tel.: (202) 3461885; fax: (202) 3540982

А.Х. Абдель-Гани, А.М. Эль-Наггар, А.А. Эль-Кади

Национальный центр радиационной безопасности и радиационного контроля  
Управление атомной энергетики, Каир, Египет

### Abstract

During the 1<sup>st</sup> International Conference “Mental Health Consequences of the Chernobyl Disaster: Current State and Future Prospects” (Kyiv, 1995) and also during the International Conference “One decade after Chernobyl: Summing-up the Consequences of the Accident” (Vienna: IAEA, 1996), the data regarding the delayed health consequences were mainly related to thyroid cancer, hereditary disorders, general morbidity, mortality and psychological disturbances. Contrary to expectations, the incidences of leukemia and soft tissue tumors were similar to the spontaneous incidence before the accident. The expected delayed effects, however, among the accident survivors, liquidators and populations resident in contaminated areas would show higher incidence probability to leukemia. These population groups have been continuously exposed to low level radiation both externally and internally. Application of the new International Commission for Radiological Protection concept of radiation-induced detriment, and the nominal probability coefficient for cancer and hereditary effects for both workers and populations are used as the rationale to calculate the incidence probability of occurrence of delayed health effects of the Chernobyl accident.

**Keywords:** Chernobyl accident, delayed health effects, multiplicative risk projection model.

### INTRODUCTION

The population groups exposed following the Chernobyl accident can be divided into the following four categories: reactor staff and firemen, workers who participated in the post-accident recovery operations (known as liquidators), residents evacuated from Pripjat and the 30-km exclusion zone and inhabitants of contaminated areas in Belarus, the Russian Federation and Ukraine.

### CONCEPT OF DETRIMENT

To measure the total harm eventually experienced by an exposed group and its descendants as a result of radiation exposure, the International Commission for Radiological Protection (ICRP) Publication 60 recommended a multiplicative risk projection model and adopted an aggregate representation of detriment which includes four components which are, the probability of attributable fatal-cancer, the weighed probability of attributable non-fatal cancer, the weighted probability of severe hereditary effects and the length of life lost if the harm occurs.

This model is a convenient description of the manner in which the probability of an attributable can-

### ВВЕДЕНИЕ

Пострадавшие вследствие Чернобыльской катастрофы могут быть распределены на четыре категории: персонал энергоблока и пожарные; лица, принимавшие участие в восстановительных работах после аварии, — ликвидаторы, население, эвакуированное из г. Припять и 30-километровой зоны отчуждения; жители радиоактивно загрязненных районов Беларуси, Российской Федерации и Украины.

### КОНЦЕПЦИЯ УЩЕРБА

Для определения общего ухудшения состояния здоровья конкретной группы населения и его потомков вследствие воздействия ионизирующих излучений Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ), Публикация 60, рекомендована модель прогноза мультипликативного риска и принято суммарное выражение ущерба, включающее четыре компонента, а именно: вероятность атрибутивных фатальных форм рака, взвешенная вероятность атрибутивных нефатальных форм рака, взвешенная вероятность тяжелых наследственных эффектов и величина уменьшения продолжительности жизни.

Данная модель иллюстрирует, каким образом варьирует во времени вероятность развития атрибутивно-

cer varies with time. The distribution of the aggregate detriment among organs and tissues is assessed by considering the probability of fatal-cancer in each tissue or organ, multiplying by an appropriate factor for non-fatal cancer which is determined by the lethality factor for that cancer, adding the probability of severe hereditary effects and adjusting the probability, severity and time expression of the harm.

The distribution of aggregate detriment among organs is represented after appropriate rounding by the tissue weighting factor.

### NOMINAL PROBABILITY COEFFICIENTS FOR STOCHASTIC EFFECTS

The average value for several calculations using the multiplicative risk projection model was taken as  $10 \cdot 10^{-2} \cdot \text{Sv}^{-1}$ . This value is issued as the nominal risk for acute high dose exposure. Applying the dose and dose rate effectiveness factor (DDREF) of 2 adopted by the ICRP for the probability of induced-fatal cancer in a population of all ages at low dose and low dose rate exposures, yields a nominal value of  $5 \cdot 10^{-2} \cdot \text{Sv}^{-1}$ . For a working group of age from 20 to 65 years another value  $4 \cdot 10^{-2} \cdot \text{Sv}^{-1}$  was obtained (table 1).

го рака. Оценку распределения суммарного ущерба осуществляют путем учета вероятности развития фатальных форм рака в различных тканях или органах, умножения ее на величину соответствующего фактора для нефатальных форм рака, определяемого как фактор летальности для данной нозологии, и прибавления вероятности развития тяжелых наследственных эффектов, учитывается также вероятность, тяжесть и время проявления ущерба.

Распределение суммарного ущерба среди органов определяется с учетом взвешивающего коэффициента ткани.

### НОМИНАЛЬНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ВЕРОЯТНОСТИ ДЛЯ СТОХАСТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ

В ряде расчетов с использованием модели прогноза мультипликативного риска среднее значение принимали равным  $10 \cdot 10^{-2} \cdot \text{Зв}^{-1}$ . Эту величину используют как номинальное значение риска при остром облучении в больших дозах. Применение коэффициента влияния мощности дозы (DDREF), равного 2, принятого МКРЗ для вероятности индуцированных фатальных форм рака среди населения всех возрастов при малых дозах и низких мощностях дозы, позволяет определить номинальное значение риска —  $5 \cdot 10^{-2} \cdot \text{Зв}^{-1}$ . Для населения трудоспособного возраста (20–65 лет) была получена иная величина —  $4 \cdot 10^{-2} \cdot \text{Зв}^{-1}$  (таблица 1).

TABLE 1  
NOMINAL PROBABILITY COEFFICIENTS FOR STOCHASTIC EFFECTS DETRIMENT,  $\bullet 10^{-2} \cdot \text{Sv}^{-1}$

ТАБЛИЦА 1  
НОМИНАЛЬНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ВЕРОЯТНОСТИ ДЛЯ СТОХАСТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ (УЩЕРБА СОСТОЯНИЮ ЗДОРОВЬЯ),  $\bullet 10^{-2} \cdot \text{Sv}^{-1}$

Exposed population	Fatal cancer	Non-fatal cancer	Severe hereditary effects	Total
Adult workers	4	0.8	0.8	5.6
Whole population	5	1	1.3	7.3

NOMINAL PROBABILITY COEFFICIENTS FOR THE THYROID

НОМИНАЛЬНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ВЕРОЯТНОСТИ ДЛЯ ПАТОЛОГИИ ЩИТОВИДНОЙ ЖЕЛЕЗЫ

Probability of fatal cancer ( $\bullet 10^{-2} \cdot \text{Sv}^{-1}$ )		Aggregate detriment ( $\bullet 10^{-2} \cdot \text{Sv}^{-1}$ )	
Whole population	Workers	Whole population	Workers
0.08	0.06	0.15	0.12

Note. Reference: ICRP Publication 60 (1990).

Примечание. Приведено по: Публикация 60 МКРЗ (1990).

### METHODOLOGY AND ESTIMATION OF DETRIMENT

Estimation of detriment was carried out using the estimated exposure doses for each exposed category and applying to these doses the nominal probability coefficients for stochastic effects and for the thyroid, recommended by the ICRP Publication 60. The estimated exposure doses for each exposed population were extracted from the Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference “Mental Health Consequences of the Chernobyl Disaster: Current State and Future Prospects” (Kyiv, 1995) and the International Conference “One decade after Chernobyl: Summing up the Consequences of the Accident” (Vienna: IAEA, 1996) and the International Atomic Energy Agency (IAEA) Bulletin (1996). The

### МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОЦЕНКА УЩЕРБА СОСТОЯНИЮ ЗДОРОВЬЯ

Оценку величины ущерба состоянию здоровья осуществляли с использованием результатов оценок величин доз облучения для каждой из категорий пострадавших и номинальных коэффициентов вероятности для стохастических эффектов и патологии щитовидной железы, рекомендованных Публикацией 60 МКРЗ. Величины доз облучения пострадавших каждой группы были взяты из материалов 1-й Международной конференции “Актуальные и прогнозируемые нарушения психического здоровья после ядерной катастрофы в Чернобыле” (Киев, 1995), Международной конференции “Десятилетие после Чернобыля: подведение итогов последствий аварии” (Вена, 1996) и Бюллетеня МАГАТЭ (1996). На основании граничных зна-

doses were recorded with an upper and a lower value and consequently the detriment is calculated with an upper and lower value.

The total value resulting from the calculations of detriment using the nominal probability coefficients for workers or for populations indicates the incidence probability of delayed stochastic effects in that particular group.

## REACTOR STAFF AND FIREMEN

A total of 400 persons were acutely exposed to substantial doses from external  $\gamma$ - and  $\beta$ -radiation and from inhalation of radioactive particles. They were hospitalized for observation and triage. From these only 237 were suffering from acute radiation sickness and 134 were verified to the diagnosis (108 in Moscow and 26 in Kyiv). The remaining 103 cases did not require special medical care and were placed in regional hospitals. 21 persons had received doses from 6 to 16 Gy, 20 of them died and 7 persons also died in the group that received doses from 4 to 6 Gy (tables 2, 3).

чений величины дозы облучения были получены граничные показатели величины ущерба состоянию здоровья.

Конечное значение, полученное в ходе расчетов ущерба с использованием номинальных коэффициентов вероятности для ликвидаторов и населения, представляет собой вероятность частоты возникновения отдаленных стохастических эффектов в конкретной группе пострадавших.

## ПЕРСОНАЛ ЭНЕРГОБЛОКА И ПОЖАРНЫЕ

Острому воздействию значительных доз внешнего  $\gamma$ - и  $\beta$ -облучения, а также внутреннего облучения вследствие ингаляционного поступления радиоактивных частиц подверглись 400 человек. Все они были госпитализированы для наблюдения. Только у 237 из них диагностировали острую лучевую болезнь, но диагноз верифицировали у 134 (у 108 — в Москве и 26 — в Киеве); 103 пострадавшим специализированная медицинская помощь не требовалась и они были переведены в региональные клиники. Из 21 человека, получившего дозы от 6 до 16 Гр, 20 умерли. В группе лиц, получивших дозу от 4 до 6 Гр, умерли 7 (таблицы 2, 3).

ESTIMATED DOSES AND DETRIMENT CALCULATION ( $\bullet 10^{-2}$ ) FOR STOCHASTIC EFFECTS RESULTING FROM WHOLE BODY EXTERNAL IRRADIATION

TABLE 2

ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ И РАСЧЕТ ВЕЛИЧИНЫ УЩЕРБА СОСТОЯНИЮ ЗДОРОВЬЯ ( $\bullet 10^{-2}$ ) ДЛЯ СТОХАСТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ ВСЛЕДСТВИЕ ОБЩЕГО ВНЕШНЕГО ОБЛУЧЕНИЯ

ТАБЛИЦА 2

Number of persons	Estimated doses (Gy)	Fatal cancer	Non-fatal cancer	Hereditary effects	Total
103	>1	>4	>0.8	>0.8	>5.6
37	1–2	4–8	0.8–1.6	0.8–1.6	5.6–11.2
55*	2–4	8–16	1.6–3.2	1.6–3.2	11.2–22.4
21**	4–6	16–24	3.2–4.8	3.2–4.8	22.4–33.6

Note. \* — one person died; \*\* — 7 persons died. Dose reference: UNSCEAR (1988).

Примечание. \* — умер 1; \*\* — умерли 7. Величины доз приведены по: НКДАР ООН (1988).

ESTIMATED DOSES AND DETRIMENT CALCULATION ( $\bullet 10^{-2}$ ) FOR THE THYROID DOSE DUE TO INHALATION

TABLE 3

ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ И РАСЧЕТ ВЕЛИЧИНЫ УЩЕРБА СОСТОЯНИЮ ЗДОРОВЬЯ ( $\bullet 10^{-2}$ ) ВСЛЕДСТВИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ЩИТОВИДНОЙ ЖЕЛЕЗЫ ПРИ ИНГАЛЯЦИОННОМ ПОСТУПЛЕНИИ РАДИОАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ

ТАБЛИЦА 3

Number of persons	Estimated dose (Sv)	Fatal cancer	Aggregate detriment
137	1.5	0.09	0.15
5	11	0.66	1.32

Note. Dose reference: UNSCEAR (1988).

Примечание. Величины доз приведены по: НКДАР ООН (1988).

## LIQUIDATORS

These are workers who were involved in post-accident recovery operations, decontamination, transport, first aid, construction workers, military servicemen and others. They were working at the destroyed reactor or within the 30-km zone. The total number of these liquidators was estimated to be 600,000 to 800,000 during 1986–1990. For the calculation of detriment these will be considered as workers.

## ЛИКВИДАТОРЫ

К категории ликвидаторов относят лиц, принимавших участие в восстановительных работах после аварии, мероприятиях по деконтаминации, в транспортировке, оказании пострадавшим первой помощи и пр. Все они участвовали в работах на разрушенном реакторе или же в пределах 30-километровой зоны. Общее количество ликвидаторов в 1986–1990 гг. составило от 600 000 до 800 000 человек. При расчетах величины ущерба состоянию здоровья данную группу рассматривают в целом как работающих в 30-километровой зоне.

Soon after the accident the All-Union Dose Registry (AUDR) was set up by the Soviet Government in 1986 to record medical and dosimetric data on population groups most exposed. In 1991 the AUDR contained data on 659,292 persons. Starting from 1992 the National Registers of Belarus, the Russian Federation and Ukraine replaced the AUDR (table 4).

После аварии в 1986 г. Советское правительство учредило Всесоюзный дозиметрический регистр (ВДР) для учета медицинских и дозиметрических данных о наиболее тяжело пострадавших группах населения. В 1991 г. ВДР содержал данные о 659 292 лицах. С 1992 г. ВДР заменили Национальные регистры Беларуси, Российской Федерации и Украины (таблица 4).

ESTIMATED DOSES AND DETRIMENT CALCULATION ( $\bullet 10^{-2}$ ) FOR STOCHASTIC EFFECTS FROM DOSES RECEIVED BY THE LIQUIDATORS

TABLE 4

ТАБЛИЦА 4

ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ И РАСЧЕТ ВЕЛИЧИНЫ УЩЕРБА СОСТОЯНИЮ ЗДОРОВЬЯ ( $\bullet 10^{-2}$ ) ДЛЯ СТОХАСТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ  
ВСЛЕДСТВИЕ ОБЛУЧЕНИЯ У ЛИКВИДАТОРОВ

Year	Estimated dose (mSv)	Fatal cancer	Non-fatal cancer	Hereditary effects	Total
1986	150–250	0.6–1.0	0.12–0.2	0.12–0.2	0.48–1.4
1987	130	0.52	0.104	0.104	0.728
1988	30	0.12	0.024	0.024	0.168
1989	15	0.06	0.012	0.012	0.084

Note. Dose reference: AUDR (1991).

Примечание. Величины доз приведены по: ВДР (1991).

### EVACUEES FROM PRIPYAT AND 30-km ZONE

Prior to evacuation these people were exposed to external  $\gamma$ -irradiation from  $^{132}\text{Te}$ ,  $^{132}\text{I}$ ,  $^{134,137}\text{Cs}$ ,  $^{103}\text{Ru}$ ,  $^{140}\text{Ba}$ ,  $^{140}\text{La}$ , present in the cloud and deposited on ground. The relative contribution to the internal irradiation from inhalation and ingestion from iodine was present resulting in thyroid doses and subsequently from  $^{134,137}\text{Cs}$  and to some extent from  $^{90}\text{Sr}$ . Most people received an average dose of 15 to 25 mSv. 10% received more than 50 mSv and 5% received an average dose of 100–300 mSv (tables 5, 6).

### INHABITANTS OF CONTAMINATED AREAS

These people were exposed to external irradiation from deposited radionuclides and internal exposure by radionuclide incorporation into the body from contaminated food. The Institute of Biophysics in Moscow studied the distribution of external and total whole body doses during the four years (1986–1989) to inhabitants of contaminated areas ( $^{137}\text{Cs}$  deposition density over 550 kBq $\cdot\text{m}^{-2}$ ) (table 7). The average 4-years total effective dose was 35 mSv.

### НАСЕЛЕНИЕ, ЭВАКУИРОВАННОЕ ИЗ г. ПРИПЯТЬ И 30-КИЛОМЕТРОВОЙ ЗОНЫ

В период, предшествовавший эвакуации, население данной категории подверглось внешнему  $\gamma$ -облучению  $^{132}\text{Te}$ ,  $^{132}\text{I}$ ,  $^{134,137}\text{Cs}$ ,  $^{103}\text{Ru}$ ,  $^{140}\text{Ba}$ ,  $^{140}\text{La}$ , имеющимися в атмосферных выбросах и выпадениях на почву. Внутреннее облучение происходило за счет ингаляционного и перорального поступления радиоактивного йода (формируя дозы облучения щитовидной железы), а в дальнейшем — за счет  $^{134,137}\text{Cs}$  и, в некоторой мере, —  $^{90}\text{Sr}$ . Средние дозы облучения у большей части этого населения составили от 15 до 25 мЗв, у 10% — свыше 50 мЗв, у 5% — 100–300 мЗв (таблицы 5, 6).

### ЖИТЕЛИ РАДИОАКТИВНО ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Население данной категории подверглось внешнему облучению выпавшими радионуклидами и внутреннему за счет инкорпорированных радионуклидов, поступивших энтерально. В Институте биофизики (Москва) изучили распределение величин доз внешнего и комбинированного облучения на протяжении 1986–1989 гг. среди жителей загрязненных регионов (плотность загрязнения почвы  $^{137}\text{Cs}$  более 550 kBq $\cdot\text{m}^{-2}$ ) (таблица 7). В среднем эффективная доза за 4 года составила 35 мЗв.

ESTIMATED DOSES AND DETRIMENT CALCULATION ( $\bullet 10^{-2}$ ) FOR STOCHASTIC EFFECTS DUE TO DOSES RECEIVED BY EVACUEES FROM PRIPYAT AND THE 30-km ZONE

TABLE 5

ТАБЛИЦА 5

ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ И РАСЧЕТ ВЕЛИЧИНЫ УЩЕРБА СОСТОЯНИЮ ЗДОРОВЬЯ ( $\bullet 10^{-2}$ ) ДЛЯ СТОХАСТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ  
ВСЛЕДСТВИЕ ОБЛУЧЕНИЯ У НАСЕЛЕНИЯ, ЭВАКУИРОВАННОГО ИЗ г. ПРИПЯТЬ И 30-КИЛОМЕТРОВОЙ ЗОНЫ

Number of persons	Estimated dose (mSv)	Fatal cancer	Non-fatal cancer	Hereditary effects	Total
6,750	100–300	0.5–1.5	0.1–0.3	0.13–0.39	0.75–2.19
13,500	50	0.25	0.05	0.665	0.365
114,750	15–25	0.075–0.125	0.015–0.025	0.02–0.03	0.11–0.2

Note. Dose Reference: 1<sup>st</sup> International Conference "Mental Health Consequences of the Chernobyl Disaster: Current State and Future Prospects" (Kyiv, 1995).

Примечание. Величины доз приведены по: 1-я Международная конференция "Актуальные и прогнозируемые нарушения психического здоровья после ядерной катастрофы в Чернобыле" (Киев, 1995).

TABLE 6

AVERAGE ESTIMATED DOSE AND DETRIMENT CALCULATION ( $\bullet 10^{-2}$ ) FOR THE THYROID DUE TO INHALATION FOR PRIPYAT AND 30-km ZONE EVACUEES

ТАБЛИЦА 6

СРЕДНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ И РАСЧЕТ ВЕЛИЧИНЫ УЩЕРБА СОСТОЯНИЮ ЗДОРОВЬЯ ( $\bullet 10^{-2}$ ) ВСЛЕДСТВИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ЩИТОВИДНОЙ ЖЕЛЕЗЫ ПРИ ИНГАЛЯЦИОННОМ ПОСТУПЛЕНИИ РАДИОНУКЛИДОВ У ЭВАКУИРОВАННЫХ ИЗ г. ПРИПЯТЬ И 30-КИЛОМЕТРОВОЙ ЗОНЫ

Age (years)	Number of persons	Average dose (mSv)	Fatal cancer	Aggregate detriment
for Pripyat evacuees				
Months–5	2,400	1,400	0.112	0.12
5–15	8,100	300	0.024	0.045
Above 15	38,900	70	0.0056	0.0105
for 30-km zone evacuees				
5–15	—	1,000	0.08	0.15
Above 15	—	700	0.056	0.105

Note. Dose Ref.: Gulko G.M. et al., submitted for publication Radiat. Environ. Biophysics (1995).

Примечание. Величины доз приведены по: Гулько Г.М. и соавторы, предоставлено к публикации Radiat. Environ. Biophysics (1995).

TABLE 7

ESTIMATED DOSES AND DETRIMENT CALCULATION ( $\bullet 10^{-2}$ ) FOR STOCHASTIC EFFECTS DUE TO TOTAL EXPOSURE OF INHABITANTS OF CONTAMINATED AREAS

ТАБЛИЦА 7

ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ И РАСЧЕТ ВЕЛИЧИНЫ УЩЕРБА СОСТОЯНИЮ ЗДОРОВЬЯ ( $\bullet 10^{-2}$ ) ДЛЯ СТОХАСТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ ВСЛЕДСТВИЕ КОМБИНИРОВАННОГО ОБЛУЧЕНИЯ У ЖИТЕЛЕЙ ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Number of persons	Average dose (mSv)	Fatal cancer	Non-fatal cancer	Hereditary effects	Total
88,000	13.6	0.068	0.0136	0.0177	0.0993
132,000	31.8	0.159	0.0318	0.0413	0.2321
44,000	68.2	0.341	0.0682	0.0887	0.4980
6,900	119	0.595	0.119	0.155	0.869
1,500	167	0.835	0.167	0.217	1.219
670	239	1.195	0.239	0.311	1.745

Note. Dose Ref.: Barkhudarov R.M. et al., Institute of Biophysics, Moscow (1994).

Примечание. Величины доз приведены по: Бархударов Р.М. и соавторы, Институт биофизики, Москва (1994).

## THYROID DOSE IN BELARUS

The total number of individuals from both Gomel and Mogilev districts (Belarus) for whom the Institute of Biophysics in Moscow had estimated the thyroid dose was 466,600 of whom 46,660 were children 0–7 years (table 8) and 419,940 were above 7 years.

## THYROID DOSE IN RUSSIAN FEDERATION

The thyroid dose was estimated for a total population of more than 5 million inhabitants with a mean thyroid dose of 26 mGy. In a controlled area in Bryansk district a population of 112,000 was sub-

## ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ ЩИТОВИДНОЙ ЖЕЛЕЗЫ У ЖИТЕЛЕЙ БЕЛАРУСИ

В Институте биофизики (Москва) были выполнены оценки величин доз облучения щитовидной железы для 466 600 жителей Гомельской и Могилевской областей Беларуси, из них 46 660 — дети в возрасте от 0 до 7 лет (таблица 8), 419 940 — старше 7 лет.

## ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ ЩИТОВИДНОЙ ЖЕЛЕЗЫ У ЖИТЕЛЕЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Дозы облучения щитовидной железы рассчитаны для более 5 млн жителей при средней величине дозы 26 мГр. В районах радиационного контроля Брянской области оценки доз облучения щитовидной железы

TABLE 8

ESTIMATED DOSES AND DETRIMENT CALCULATION ( $\bullet 10^{-2}$ ) FOR THE THYROID DOSE IN BELARUS FOR CHILDREN 0–7 YEARS

ТАБЛИЦА 8

ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ И РАСЧЕТ ВЕЛИЧИНЫ УЩЕРБА СОСТОЯНИЮ ЗДОРОВЬЯ ( $\bullet 10^{-2}$ ) ВСЛЕДСТВИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ЩИТОВИДНОЙ ЖЕЛЕЗЫ У ДЕТСКОГО НАСЕЛЕНИЯ БЕЛАРУСИ В ВОЗРАСТЕ 0–7 ЛЕТ

Absorbed dose (Gy)	Total number of children	Percentage of the total number	Fatal cancer	Aggregate detriment
0–0.3	24,765	53	0–0.024	0–0.045
0.3–2	18,195	39	0.024–0.16	0.045–0.3
2–5	2,679	5.7	0.16–0.4	0.3–0.75
5–10	721	1.6	0.4–0.8	0.75–1.5
10–20	278	0.6	0.8–1.6	1.5–3
20–40	22	0.044	1.6–3.2	3–6

Note. Dose Ref.: Barkhudarov R.M. et al., Institute of Biophysics, Moscow (1994).

Примечание. Величины доз приведены по: Бархударов Р.М. и соавторы, Институт биофизики, Москва (1994).

jected to thyroid dose estimates. This was considered the area with highest thyroid dose, and therefore the highest risk (table 9).

были выполнены у 112 000 населения. Отмечены наибольшие дозы облучения щитовидной железы и риски ущерба состоянию здоровья (таблица 9).

ESTIMATED DOSES AND DETRIMENT CALCULATION ( $\bullet 10^{-2}$ ) FOR THE THYROID DOSE IN RUSSIAN FEDERATION

TABLE 9

ТАБЛИЦА 9

ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ И РАСЧЕТ ВЕЛИЧИНЫ УЩЕРБА СОСТОЯНИЮ ЗДОРОВЬЯ ( $\bullet 10^{-2}$ )  
ВСЛЕДСТВИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ЩИТОВИДНОЙ ЖЕЛЕЗЫ У ЖИТЕЛЕЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Age group (years)	Number of population	Mean thyroid dose (mGy)	Fatal cancer	Aggregate detriment
<1	1,600	750	0.06	0.113
1–2	3,100	680	0.054	0.102
3–6	6,600	500	0.04	0.075
7–11	8,300	350	0.028	0.053
12–17	10,800	230	0.018	0.035
>18	81,600	130	0.01	0.02

Note. Dose Ref.: The Chernobyl Papers, vol. 1 (Eds. Merwin and Balonov), Research Enterprise Inc. (1993).

Примечание. Величины доз приведены по: The Chernobyl Papers, vol. 1 (Eds. Merwin and Balonov), Research Enterprise Inc. (1993).

## THYROID DOSE IN UKRAINE

I.A. Likhtarev et al. (1993) studied the distribution of absorbed doses to the thyroid and the collective thyroid doses of Ukrainian population. The results indicated that the highest absorbed doses (1.5–2.7 Gy) was received by children of Zhitomir and Pripjat. Children of 7–15 years received lower doses by factor of 2.5 and the adults received lower doses by a factor of 2–8. Table 10 shows the dose distribution and the corresponding detriment.

## ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ ЩИТОВИДНОЙ ЖЕЛЕЗЫ У ЖИТЕЛЕЙ УКРАИНЫ

И.А. Лихтарев и соавторы (1993) исследовали распределение величин поглощенных и коллективных доз облучения щитовидной железы среди населения Украины. Наибольшие поглощенные дозы (1,5–2,7 Гр) получило детское население Житомирской области и г. Припять. Величины доз облучения у детей в возрасте 7–15 лет были ниже в 2,5 раза, у взрослых — в 2–8 раз. В таблице 10 представлено распределение значений величин доз облучения и соответствующего ущерба состоянию здоровья.

ESTIMATED DOSES AND DETRIMENT CALCULATION ( $\bullet 10^{-2}$ ) FOR THE THYROID DOSE IN UKRAINE

TABLE 10

ТАБЛИЦА 10

ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ И РАСЧЕТ ВЕЛИЧИНЫ УЩЕРБА СОСТОЯНИЮ ЗДОРОВЬЯ ( $\bullet 10^{-2}$ )  
ВСЛЕДСТВИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ЩИТОВИДНОЙ ЖЕЛЕЗЫ У ЖИТЕЛЕЙ УКРАИНЫ

Number of persons	Mean thyroid dose (mGy)	Fatal cancer	Aggregated detriment
7,325,000	5	0.0004	0.00075
3,400,000	30	0.0024	0.0045
1,312,000	75	0.006	0.01125
228,000	200	0.016	0.03
131,000	400	0.032	0.06
26,000	750	0.06	0.1125
28,000	1169.4	0.094	0.175

Note. Ref.: Likhtarev I.A. et al., Health Physics, 64 (6), 1993.

Примечание. Приведено по: Likhtarev I.A. et al., Health Physics, 64 (6), 1993.

## RESULTS

The incidence probability of occurrence of delayed health effects of the Chernobyl accident is represented by the estimated Detriment calculated.

Detriment calculation of the various exposed groups shows that the highest incidence probability of occurrence of delayed health effects is among the reactor staff and firemen who were exposed to high doses (ranging from 1 to 16 Gy) which results in 28 fatalities, consequently this group gives high detriment values ( $5.6$  to  $43.8 \bullet 10^{-2}$ ) as shown in table 2. Table 3 presents

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Вероятность развития отдаленных медицинских последствий аварии представлена в виде рассчитанного показателя ущерба состоянию здоровья.

Расчеты величины ущерба для различных групп пострадавших показали, что вероятность развития отдаленных медицинских последствий наиболее высока у персонала энергоблока и пожарных, дозы облучения которых — от 1 до 16 Гр; 28 из них умерли. Соответственно, отмечены и наиболее высокие величины ущерба:  $5,6$ – $43,8 \bullet 10^{-2}$  (см. таблицу 2). В таблице 3 приведены результаты оценки доз облучения щито-

the thyroid estimate dose due to inhalation of  $^{131}\text{I}$  and the corresponding detriment values for this group.

Concerning the liquidators the maximum estimated dose in 1986 was 20 mSv. This estimated dose decreased with time and reached 15 mSv in 1989, the corresponding incidence probability ranges from 1.4 to  $0.1 \cdot 10^{-2}$  as indicated in table 4.

Most of the evacuees from Pripyat and the 30-km zone received an average dose of 15–25 mSv which gives rise to detriment values ranging from 0.08 to  $0.14 \cdot 10^{-2}$ , only 5% of this population received much higher doses up to 300 mSv which leads to a detriment value of  $2.19 \cdot 10^{-2}$ , the results are summarized in table 5.

The evacuees of Pripyat were also subjected to thyroid doses due to inhalation. The doses were estimated in several age groups. The highest doses (1.4 Sv) was received by children from a few months to 5 years, the corresponding detriment value is  $0.21 \cdot 10^{-2}$ . The majority of this population received an average dose of 70 mSv which yields a detriment value of  $0.01 \cdot 10^{-2}$ .

The evacuees from the 30-km zone received an average dose of 0.1 Sv (age group 5–15 years) and 70 mSv (age group above 15 years). The corresponding detriment values are  $0.15 \cdot 10^{-2}$  and  $0.1 \cdot 10^{-2}$  respectively as seen in table 6.

Detriment calculation results for the inhabitants of contaminated areas shows that the average effective dose was 35 mSv and the majority of this population received a dose of the order of 32 mSv, the corresponding detriment value is  $0.2 \cdot 10^{-2}$ . A small part of this population received a much higher dose — 239 mSv, which yields a higher detriment value of  $1.7 \cdot 10^{-2}$  (table 7).

The thyroid dose was estimated in Belarus, the Russian Federation and Ukraine. The highest thyroid dose was estimated among the Russian Federation population primarily due to intake of  $^{131}\text{I}$  with milk and food ( $^{137}\text{Cs}$  deposition density  $>555 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-2}$ ).

In Belarus estimates of thyroid doses were carried out for children (0–7 years). 53% of this population received doses up to 0–0.3 Gy corresponding to a detriment value of  $0.045 \cdot 10^{-2}$ , 39% received doses between 0.3 to 2 Gy giving up a detriment value between 0.045 and  $0.3 \cdot 10^{-2}$  (table 8).

The thyroid dose for the inhabitants of districts of the Russian Federation was estimated for a total population of more than 5 million inhabitants, with a mean thyroid dose of 26 mGy. Table 9 presents the age distribution of the mean thyroid dose for a population of 112,000 in Bryansk — the district of the

видной железы вследствие ингаляционного поступления  $^{131}\text{I}$  и соответствующие величины суммарного ущерба состоянию здоровья для данной группы.

У ликвидаторов наибольшая оцениваемая доза облучения в 1986 г. составила 20 мЗв; она уменьшилась со временем и составила в 1989 г. 15 мЗв. Соответствующие значения величины вероятности развития отдаленных последствий были в пределах  $1,4-0,1 \cdot 10^{-2}$  (таблица 4).

Большинство эвакуированных из г. Припять и 30-километровой зоны получили дозы облучения в среднем 15–25 мЗв, что обусловило возрастание величины ущерба до  $0,08-0,14 \cdot 10^{-2}$ ; 5% населения данной категории получили существенно большие дозы (до 300 мЗв), величина ущерба составила  $2,19 \cdot 10^{-2}$  (таблица 5).

У эвакуированных из г. Припяти также формировались дозы облучения щитовидной железы вследствие ингаляционного поступления радионуклидов. Оценка доз была выполнена в возрастных группах. Наибольшие дозы (1,4 Зв) получили дети в возрасте до 5 лет, величина ущерба составила  $0,21 \cdot 10^{-2}$ . Большая часть населения данной категории получили в среднем дозу 70 мЗв, в результате отмечена величина ущерба состоянию здоровья  $0,01 \cdot 10^{-2}$ .

Средние значения доз облучения у эвакуированных из 30-километровой зоны в возрасте 5–15 лет составляют 0,1 Зв, старше 15 лет — 70 мЗв; соответственно значения величин ущерба состоянию здоровья —  $0,15 \cdot 10^{-2}$  и  $0,1 \cdot 10^{-2}$  (таблица 6).

Средняя эффективная доза облучения у жителей загрязненных территорий составляет 35 мЗв, у большинства — 32 мЗв; соответственно величина ущерба состоянию здоровья —  $0,2 \cdot 10^{-2}$ . Небольшая часть населения получила значительно большую дозу — 239 мЗв, что обусловило возрастание величины ущерба состоянию здоровья до  $1,7 \cdot 10^{-2}$  (таблица 7).

Оценка доз облучения щитовидной железы проведена у жителей Беларуси, Российской Федерации и Украины. Наиболее высокие показатели получены для населения Российской Федерации, в основном за счет поступления  $^{131}\text{I}$  с молоком и пищей (при плотности загрязнения почвы  $^{137}\text{Cs}$  более  $555 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-2}$ ).

В Беларуси оценка величин доз облучения щитовидной железы была выполнена для детского населения (0–7 лет): 53% детей получили дозы 0–0,3 Гр, 39% — от 0,3 до 2 Гр; величина ущерба состоянию здоровья составила соответственно  $0,045 \cdot 10^{-2}$  и  $0,045-0,3 \cdot 10^{-2}$  (таблица 8).

В ряде районов Российской Федерации были оценены дозы облучения щитовидной железы у более 5 млн человек: средняя доза равна 26 мГр. В таблице 9 представлены средние значения доз облучения щитовидной железы у 112 000 жителей Брянской области. Брянская область расценивается как регион с наиболее высоки-

Russian Federation which is considered the area with highest thyroid dose and therefore the highest risk.

In Ukraine the average thyroid dose is 31.3 mGy, the highest dose was 1.5 Gy and the lowest was 5 mGy. The corresponding detriment values are  $0.175 \cdot 10^{-2}$  and  $0.75 \cdot 10^{-2}$ . Data are represented in table 10.

## DISCUSSIONS AND CONCLUSIONS

The multiplicative risk projection model is used to provide assessment of the lifetime risk for cancer induction. This model postulates that the excess of incidence after a latent period is given by a factor applied to the age-dependent incidence of natural cancer in the population. This factor may be constant or varying in time. The multiplicative risk projection model does not necessarily imply multiplicative biological processes. It describes the manner in which the probability of attributable cancer varies with time.

The multiplicative model was used for high dose and high dose rate exposures to indicate the form of the dose response relation for low dose and low dose rate which was found to be linear quadratic for low linear energy transfer (LET) radiation. The linear coefficient for low doses and low dose rate was obtained from high dose and high dose rate estimates by dividing by the DDREF.

Based on this data, the ICRP estimated the nominal probability coefficients for stochastic effects (cancer and hereditary effects) for working groups and the general population of all ages.

The application of the nominal probability coefficient to evaluate the future detriment after internal and external exposure resulting from the Chernobyl disaster have been calculated for the various exposure groups. The aim is to provide foresight for the occurrence of stochastic effects during the coming decades among the various exposure groups. The incidence probability for stochastic effects obtained by the calculation carried out should only be considered as an indication of the incidence probability of the delayed stochastic effects.

The values obtained as indicated in the calculations undertaken include all types of delayed effects in particular induction of either fatal or non-fatal cancer.

The incidence probability of the occurrence of hereditary effects in these groups is included in the calculations and appears in the total estimates and in the estimate of hereditary effects. However, it should be pointed out that the multiple variables involved in the occurrence of hereditary effects (specially in human populations) makes the values

ми дозами облучения щитовидной железы и, следовательно, наиболее высокой величиной риска ущерба состоянию здоровья.

В Украине средняя величина дозы облучения щитовидной железы составила 31,3 мГр, наибольшая — 1,5 Гр, наименьшая — 5 мГр; величина ущерба состоянию здоровья —  $0,175 \cdot 10^{-2}$  и  $0,75 \cdot 10^{-2}$  (таблица 10).

## ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Модель прогноза мультипликативного риска была использована для оценки риска индукции рака на протяжении жизни. Модель предполагает, что избыток заболеваемости по истечении латентного периода представлен фактором, связанным с возрастзависимой заболеваемостью злокачественными новообразованиями в данной популяции. Этот фактор может быть величиной постоянной, или же варьировать во времени. Модель не обязательно предполагает прогрессирующий биологический процесс. Она описывает, каким образом вероятность вызванной онкологической заболеваемости изменяется на протяжении времени.

Модель была использована для случаев воздействия больших доз и высоких мощностей дозы в целях установления дозовой зависимости в отношении малых доз и низких мощностей дозы. Получена линейно-квадратичная зависимость для излучений с низкой линейной передачей энергии (ЛПЭ). Линейный коэффициент для малых доз и низких мощностей дозы был рассчитан по данным оценок, выполненных для больших доз и высоких мощностей дозы, путем деления на DDREF.

На основании этих данных МКРЗ оценивает номинальные коэффициенты вероятности для стохастических эффектов (рак и наследственные эффекты) для работающих лиц и населения всех возрастных категорий.

С помощью номинального коэффициента вероятности будущий ущерб состоянию здоровья вследствие внутреннего и внешнего облучения в результате Чернобыльской катастрофы был рассчитан для различных групп пострадавших. Конечной целью является прогнозирование возникновения стохастических эффектов в дальнейшем в различных группах населения, подвергшегося воздействию ионизирующих излучений. Вероятность развития стохастических эффектов должна рассматриваться исключительно как показатель вероятности возникновения отдаленных стохастических эффектов.

Полученные величины касаются всех типов отдаленных эффектов, в частности — индукции как фатальных, так и нефатальных форм опухолей.

Вероятность развития наследственных эффектов у пострадавших названных групп включена в расчеты и фигурирует в интегральных оценках и оценках наследственных эффектов. В то же время следует отметить, что широкая вариабельность параметров относительно возникновения наследственных эффектов (особенно в популяции человека) обуславливает не-

calculated for hereditary effects subject to some uncertainty.

The incidence probability of fatal and non-fatal cancer varies greatly between sanguineous tumors (blood), soft tissue tumors and solid tumors. The former two are expected to appear in substantial case numbers during the coming few years. However, solid tumors are expected to appear after a longer latent period.

It is important to carry out monitoring programs for all exposure groups to register all types of cancer occurrences, as related to age, sex and radiation dose, types of exposure and living conditions.

которую неопределенность величин, рассчитанных для эффектов такого рода.

Величина вероятности развития фатальных и нефатальных форм рака значительно варьирует в зависимости от нозологии. Значительное увеличение частоты возникновения гемобластозов и опухолей мягких тканей предполагают в ближайшие годы, солидных опухолей — по окончании более продолжительного латентного периода.

Целесообразно осуществление мониторинга во всех группах населения в целях регистрации типов онкологической патологии с учетом возраста, пола, условий жизни пострадавших, а также дозы облучения и типа радиационного воздействия.

## REFERENCES

*“Mental health consequences of the Chernobyl disaster: current state and future prospects”*: Proceedings of the International Conference / Ed. by A.I. Nyagu. — Kyiv, 1995. — 319 p.

*All-Union Dose Registry (AUDR)*, 1991.

*Balonov M.I.* “Overview of Doses to the Soviet population from the Chernobyl Accident, and the Protective Actions Applied”, *The Chernobyl Papers*, 1: Ed.: Merwin S.E., Balonov M.I., Research Enterprises, Richland, WA, 1993.

*Barkhudarov R.M. et al.* “Characterization of irradiation levels of the population in the controlled areas within the first four years after the Chernobyl NPP accident”, Institute of Biophysics, Moscow, 1994.

*Goulko G.M. et al.* “Estimation of the Thyroid doses for the evacuees from Pripjat”, sublimited for publication *Radiat. Environ. Biophys.*, 1995.

*IAEA-Bulletin*, 1996, Vol. 38, No. 3.

*ICRP Publication 60*. Radiation protection 1990: Recommendations of the International Commission for Radiological Protection (ICRP). Pergamon Press, New York, 1991, 197 p.

*International conference “One decade after Chernobyl: Summing-up the Consequences of the Accident”*. Book of extended synopsis. IAEA, Vienna, 1996. — 601 p.

*Likhtarev I.A., Sbandala N.K., Gulko G.M., Kairo I.A., Chepurny N.I.* Ukrainian thyroid doses after the Chernobyl accident. *Health Phys.*, 1993, 64(6): 594–599.

*UNSCEAR*. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. UN, New York, 1988.