

GENERAL STRUCTURE OF CHERNOBYL EXPOSURE SOURCES AND DOSES OF UKRAINIAN POPULATION

ОБЩАЯ СТРУКТУРА ЧЕРНОБЫЛЬСКОГО ИСТОЧНИКА И ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ НАСЕЛЕНИЯ УКРАИНЫ

I.A. Likhtarev, L.N. Kovgan

Scientific Centre for Radiation Medicine, Academy of Medical Sciences of Ukraine,
WHO Collaborating Centre for Radiation Accidents Management
53 Melnikov Street, Kiev, 254050, Ukraine

И.А. Лихтарев, Л.Н. Ковган

Научный центр радиационной медицины АМН Украины,
Сотрудничающий центр ВОЗ по крупномасштабным радиационным авариям
254050, Украина, Киев, ул. Мельникова, 53

Abstract

The Chernobyl accident is characterised by the very complex spatial-time structure of the exposure source and a variety of exposed contingents. In the article the classification of sources and exposed contingents, that is the basis of large-scale dosimetric passportization of the Ukrainian territory is presented. The doses of irradiation for 2,370,000 people living on the radioactively contaminated areas as a result of the Chernobyl fallout were estimated both from the point of view of a time evolution of the source of internal and external irradiation, as well as concerning individual-group mode of behaviour and feeding, and local radioecological peculiarities of a separate place of residence. All the results were formalised and approved as the National instructive-methodical documents and Booklets, which contain the dose assessments for the decision making as well as the collective doses that were accumulated by these nearly 2.37 million people over 12 years. The total collective dose is 22,100 menSv. The population exposed to averaged accumulated doses less than 10 mSv for 12 years received near 20% of the total collective dose. Approximately 3,000 persons (0.1%) accumulated averaged doses more than 70 mSv, however their contribution into the total dose is around 2% of the total collective dose of this period. As a whole for the considered contingent an expected number of radiation-induced cancer of all localisation were estimated as 751 cases or approximately 0.8% of a total number of all expected (including spontaneous) oncological disease (around 95,000).

Keywords: Chernobyl exposure source, doses of Ukrainian population, collective dose, risk assessment.

INTRODUCTION

The Chernobyl disaster can be considered as the largest communal trans-border radiation accident in the history of humanity because of two factors:

large-scaling: the territories of Ukraine, Belarus, Russia and many others countries with high density and large population have been involved in the sphere of influence of accidental radioactive sources;

complicated, *multifactor structure* of accidental exposure of affected population.

The following items are under consideration in this report:

description of structure both the Chernobyl accidental sources and affected Ukrainian population groups;

characteristic of National Program of large-scale *dosimetric passportization* of the settlements located at the contaminated territories of Ukraine and main results of passportization;

ВВЕДЕНИЕ

Двумя основными факторами, позволяющими считать Чернобыльскую катастрофу крупнейшей коммунальной трансграничной радиационной аварией в истории человечества, являются:

широкомасштабность — в сферу действия аварийного радиоактивного источника были вовлечены территории Украины, Беларуси, России и ряда других стран с высокой плотностью и большой численностью проживающего на этих территориях населения;

многокомпонентная структура аварийного облучения населения.

В настоящем сообщении рассмотрено следующее:

анализ структуры чернобыльского источника облучения и вовлеченных в сферу его радиационного воздействия групп населения Украины;

описание Национальной программы широко-масштабной *дозиметрической паспортизации*;

time-variation of external and internal exposure of population;
collective dose estimations for affected population;
general risk assessments.

STRUCTURE OF CHERNOBYL EXPOSURE SOURCES

The general structure scheme of Chernobyl source of population exposure is given in figure 1. Main components forming the doses of affected population are:

- external γ -exposure from radioactive deposit on the ground;
- internal exposure as the result of consumption of food contaminated by *radiocaesium* and *radiostrontium*;
- radioiodine *thyroid* exposure;
- exposure from *trans-uranium* elements.

Taking this into account, if the exposure from radioiodine continued for one—two months, the external γ -exposure and ingestion exposure from ra-

обсуждение временной эволюции доз внешнего и внутреннего облучения населения;
оценки коллективных доз, полученных населением;
обобщенные рискованные оценки.

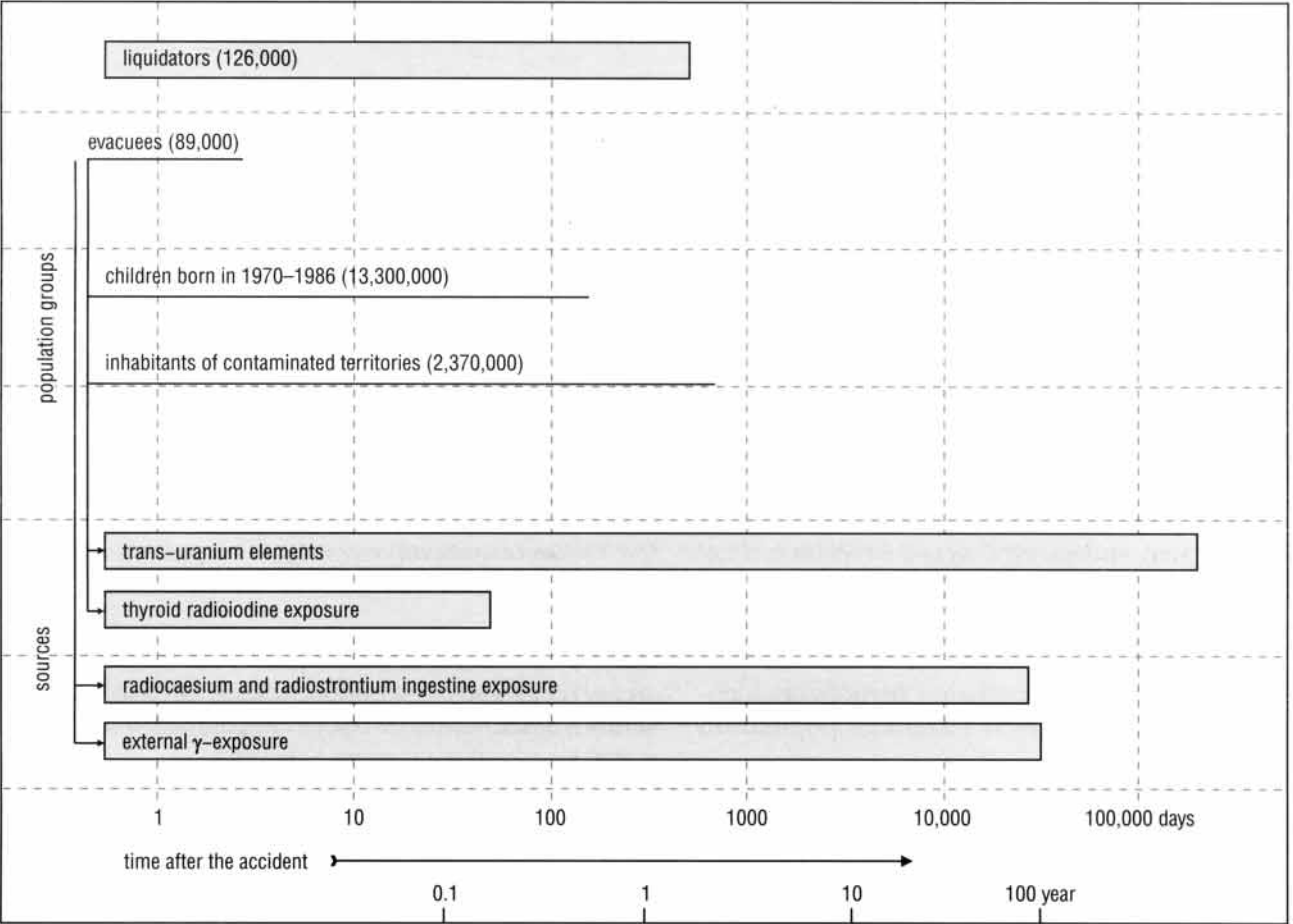
СТРУКТУРА ЧЕРНОБЫЛЬСКОГО АВАРИЙНОГО ИСТОЧНИКА

Общая структурная схема Чернобыльского источника представлена на рисунке 1. Основными компонентами облучения вовлеченного в аварию населения являются:

- внешнее γ -облучение от радиоактивных выпадений на почву;
- внутреннее облучение вследствие потребления продуктов питания, загрязненных радиоизотопами *цезия* и *стронция*;
- облучение щитовидной железы радиоизотопами йода;
- облучение трансурановыми элементами.

При этом, если облучение радиоизотопами йода продолжалось 1–2 мес после аварии, то внешнее и внутреннее облучение изотопами *цезия* и *стронция* было

FIGURE 1. STRUCTURE OF CHERNOBYL EXPOSURE SOURCE AND AFFECTED POPULATION
РИСУНОК 1. СТРУКТУРА ЧЕРНОБЫЛЬСКОГО ИСТОЧНИКА ОБЛУЧЕНИЯ И ОБЛУЧЕННЫХ ГРУПП НАСЕЛЕНИЯ



diocaesium and radiostrontium were significant in the past and will be important in some future decades. The duration of exposure from trans-uranium elements is one hundred years.

It is also possible to single out some main sub-populations among the affected population which differ both by type and duration of accidental exposure:

- “liquidators” or clean-up workers;
- “evacuees” — evacuated inhabitants of Pripjat town and the 30-km zone;
- children which were born in 1970–1986, with high probability of thyroid gland exposure;
- inhabitants of radioactively contaminated territories.

Further, just the last in the above list (but the largest population group) will be considered. Because of the problems of thyroid gland exposure, exposure of evacuees and liquidators are very deep and wide and deserve to be considered in independent reports.

COMPLEX DOSIMETRIC PASSPORTIZATION OF UKRAINIAN SETTLEMENTS

In Ukraine the most affected areas (highest contamination by caesium, strontium and plutonium) are located in the North-West (so-called *West track*) and in South of the Chernobyl NPP (*South track*).

The National Program of Complex Dosimetric Passportization was initiated in 1991. Exactly for these territories the main goals of this program were:

- providing radioecological monitoring of environment and foods;
- passport (“Methodology–96”) and reference (“Methodology–97”) dose estimations for the settlements.

According to Ukrainian legislation the area of settlement is considered as *radioactively contaminated* if ^{137}Cs soil deposition exceeds or equals $37 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-2}$ and passport annual dose exceeds $0.5 \text{ mSv} \cdot \text{year}^{-1}$. Based on these two principles the whole radioactively contaminated territory (and settlements) is divided into *four zones*:

- *1st zone* — settlements which were relocated in 1986;
- *2nd zone* — passport annual dose exceeds $5 \text{ mSv} \cdot \text{year}^{-1}$;
- *3rd zone* — passport annual dose is in the range $1\text{--}5 \text{ mSv} \cdot \text{year}^{-1}$;

существенным на протяжении всего прошедшего времени и будет иметь значение в последующие десятилетия. Длительность облучения трансурановыми элементами исчисляется сотнями лет.

Среди вовлеченного в аварию населения выделяют группы, различающиеся как типом и длительностью облучения, так и характеристиками его источника:

- ликвидаторы последствий аварии на Чернобыльской атомной электростанции (ЧАЭС);
- жители, эвакуированные из г. Припяти и 30-километровой зоны;
- дети 1970–1986 гг. рождения с возможным облучением щитовидной железы;
- жители территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению.

Далее будет рассмотрена лишь эта последняя, наибольшая по численности, группа пострадавшего населения, поскольку проблема облучения щитовидной железы, а также эвакуированного населения и ликвидаторов слишком глубока и обширна, заслуживая тем самым самостоятельного рассмотрения.

КОМПЛЕКСНАЯ ДОЗИМЕТРИЧЕСКАЯ ПАСПОРТИЗАЦИЯ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ УКРАИНЫ

В Украине населенные пункты с повышенными уровнями чернобыльских выпадений (радиоактивные цезий, стронций, трансурановые элементы) расположены в северо-западной части (так называемый *западный след*) и в южном направлении (*южный след*) от ЧАЭС.

Именно на этих территориях с 1991 г. была начата *комплексная дозиметрическая паспортизация населенных пунктов Украины*. Ее задачи:

- проведение радиоэкологического мониторинга окружающей среды и продуктов питания;
- оценка паспортных (“Методика–96”) и референтных (“Методика–97”) доз облучения населения.

В соответствии с Украинским законодательством территория считается *радиоактивно загрязненной*, если плотность выпадений ^{137}Cs на почву равна $37 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-2}$ и более и паспортная среднегодовая доза выше $0,5 \text{ мЗв} \cdot \text{год}^{-1}$. На основании этих двух критериев вся радиоактивно загрязненная территория (и расположенные на ней населенные пункты) разделяют на *четыре зоны*:

- *1-я зона* — населенные пункты, жители которых были отселены в 1986 г.;
- *2-я зона* — паспортная доза превышает $5 \text{ мЗв} \cdot \text{год}^{-1}$;
- *3-я зона* — паспортная доза находится в диапазоне $1\text{--}5 \text{ мЗв} \cdot \text{год}^{-1}$;

• 4th zone — passport annual dose is in the range 0.5–1 mSv•year⁻¹.

Further, on the basis of the aforementioned division, Government and administrations made decisions concerning countermeasures, monetary compensation and social privileges for the affected population.

Moreover, the results of the dosimetric passportization should be used as the dosimetric basis for radioepidemiological investigations (including a determination of the size of population groups with different levels of radioepidemiological attention and an estimation of statistical capacity of these investigations).

Every year (since 1992) the results of dosimetric passportization are published in the "Collection (or Booklet) of Dosimetric Passportization" (Booklets 5–7). In these Booklets for each settlement the results of radioecological monitoring as well as the values of components and total passport dose are given.

Calculation of annual passport dose is made based on the official methodology developed under the leadership of I.A. Likhtarev (Scientific Centre for Radiation Medicine, Kiev) and adopted by the Ministry of Health and the National Committee on Radiation Protection.

Passport dose includes the following components (figure 2):

• 4-я зона – паспортная доза находится в диапазоне 0,5–1 мЗв•год⁻¹.

На основании такого деления в дальнейшем регулирующие органы и правительство принимали решения о проведении защитных мероприятий, выплате денежных компенсаций и предоставлении населению различных льгот.

Кроме того, именно результаты дозиметрической паспортизации должны быть использованы в качестве дозиметрической основы для радиоэпидемиологических исследований (включая определение численности групп населения с различным уровнем радиоэпидемиологического внимания, а также оценку статистической мощности этих исследований).

Результирующим документом таких паспортизаций стали издаваемые с 1992 г. "Сборники общедозиметрической паспортизации" ("Сборник 5"; "Збірка 6"; "Збірка 7"), в которых для каждого населенного пункта приведены результаты радиоэкологического мониторинга окружающей среды и продуктов питания, а также значения паспортной дозы и ее компонент.

Расчет паспортной дозы проводили на основании официальных, утвержденных Министерством здравоохранения Украины и Национальной комиссией по радиационной защите методик. Последняя версия подобной методики по расчету среднегодовых паспортных доз была разработана под руководством И.А. Лихтарева в 1997 г.

Паспортная доза включает следующие компоненты (рисунок 2):

FIGURE 2. CALCULATIVE PROCEDURE FOR ESTIMATION OF PASSPORT (ANNUAL) DOSE OF UKRAINIAN SETTLEMENTS

РИСУНОК 2. РАССЧЕТНЫЕ ПРОЦЕДУРЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПАСПОРТНОЙ (СРЕДНЕГОВОЙ) ДОЗЫ НАСЕЛЕННОГО ПУНКТА, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В УКРАИНЕ

$$D^{passp} = D^{ext} + D^{int} + D^{ind}$$

D^{ext} — external exposure, $\mu\text{Sv}\cdot\text{year}^{-1}$

D^{int} — internal ingestion exposure, $\mu\text{Sv}\cdot\text{year}^{-1}$

D^{ind} — industrial component, $\mu\text{Sv}\cdot\text{year}^{-1}$

D^{passp} — passport (annual) dose, $\mu\text{Sv}\cdot\text{year}^{-1}$

$$D^{ext} = (0.9-1.9) \cdot \sigma_{Cs}$$

$$D^{int} = D_{Cs}^{int} + D_{Sr}^{int} + D_{Pu}^{int}$$

$$D_{Cs}^{int} = 7.04 \cdot c_{milk}^{Cs} + 1.61 \cdot c_{pot}^{Cs}$$

$$D_{Sr}^{int} = 16 \cdot c_{milk}^{Sr}$$

$$D_{Pu}^{int} = 3.87 \cdot \sigma_{Pu}$$

σ_{Cs}, σ_{Pu} — reference ^{137}Cs and ^{239}Pu soil contamination, $\text{kBq}\cdot\text{m}^{-2}$

$c_{milk}^{Cs}, c_{milk}^{Sr}$ — $^{137,134}\text{Cs}$ and ^{90}Sr contamination of milk, $\text{Bq}\cdot\text{L}^{-1}$

c_{pot}^{Cs} — $^{137,134}\text{Cs}$ contamination of potatoes, $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$

$$D^{passp} = D^{ext} + D^{int} + D^{ind}$$

D^{ext} — доза внешнего облучения, (мкЗв•год⁻¹)

D^{int} — доза внутреннего облучения, (мкЗв•год⁻¹)

D^{ind} — компонента индустриального облучения, (мкЗв•год⁻¹)

D^{passp} — паспортная (среднегодовая) доза, (мкЗв•год⁻¹)

$$D^{ext} = (0.9-1.9) \cdot \sigma_{Cs}$$

$$D^{int} = D_{Cs}^{int} + D_{Sr}^{int} + D_{Pu}^{int}$$

$$D_{Cs}^{int} = 7.04 \cdot c_{milk}^{Cs} + 1.61 \cdot c_{pot}^{Cs}$$

$$D_{Sr}^{int} = 16 \cdot c_{milk}^{Sr}$$

$$D_{Pu}^{int} = 3.87 \cdot \sigma_{Pu}$$

σ_{Cs}, σ_{Pu} — "референтная" плотность выпадений на почву ^{137}Cs и ^{239}Pu , $\text{кБк}\cdot\text{м}^{-2}$

$c_{milk}^{Cs}, c_{milk}^{Sr}$ — загрязнение молока $^{137,134}\text{Cs}$ and ^{90}Sr , $\text{Бк}\cdot\text{л}^{-1}$

c_{pot}^{Cs} — $^{137,134}\text{Cs}$ загрязнение картофеля, $\text{Бк}\cdot\text{кг}^{-1}$

$$D^{ind} = \begin{cases} 80 \mu\text{Sv}\cdot\text{year}^{-1} \text{ for distance less 30 km from NPP} \\ 25 \mu\text{Sv}\cdot\text{year}^{-1} \text{ for distance less 30 km from NPP} \end{cases}$$

$$D^{ind} = \begin{cases} 80 \text{ мкЗв}\cdot\text{год}^{-1} \text{ для расстояний менее 30 км от АЭС} \\ 25 \text{ мкЗв}\cdot\text{год}^{-1} \text{ для расстояний менее 30–60 км от АЭС} \end{cases}$$

- external γ -exposure from radioactive depositions on the ground;
- ingestion exposure from radioisotopes of caesium, strontium and trans-uranium elements;
- industrial exposure.

Dose calculation was carried out according to relations given in figure 2. In figure 3 the format of dosimetric results presentation in Booklets of the years 1991–1994 are shown. In the main Table of Booklets the information on ^{137}Cs soil deposition and radiocaesium contamination of milk and potatoes as well as the estimated values for all components of passport doses for every settlement are published, which present some *radiological passport* of settlement.

- внешнее γ -облучение радиоактивными выпадениями на почву;
- внутреннее облучение радионуклидами цезия, стронция и трансураниевыми элементами;
- индустриальная компонента.

В результате реализации расчетно-методической базы (рисунок 2) формировали основной табличный формат результатов дозиметрической паспортизации 1991–1996 гг. (рисунок 3). В паспортизационной таблице содержатся все характеристики территорий, образующие в совокупности некоторый *радиологический паспорт* населенного пункта (плотность выпадений радионуклидов цезия, уровни радиоактивного загрязнения молока и картофеля местного производства, дозы внешнего, внутреннего облучения, суммарная паспортная доза).

FIGURE 3. FORMAT OF THE MAIN TABLE OF DOSIMETRIC PASSPORTIZATION BOOKLETS IN YEARS 1991–1996 (BOOKLETS 1–6)

РИСУНОК 3. ФОРМАТ ОСНОВНОЙ ТАБЛИЦЫ СБОРНИКОВ ДОЗИМЕТРИЧЕСКОЙ ПАСПОРТИЗАЦИИ 1991–1996 гг. (СБОРНИКИ 1–6)

Населені пункти - НП (Settlement)				Середні по НП рівні ^{137}Cs в об'єктах моніторингу (^{137}Cs in objects of monitoring)			Паспортна доза опромінення, мЗв·рік ⁻¹ (Passport dose, mSv·year ⁻¹)		
№	Квадрат на карті	Тип (Type)	Назва (Name)	грунт (σ_{Cs}) кБк·м ⁻²	молоко (c_m) Бк·л ⁻¹	картопля (c_p) Бк·кг ⁻¹	зовнішня (D_e)	внутрішня (D_{int})	сумарна (D_p)
				soil, kBq·m ⁻²	milk, kBq·l ⁻¹	potato, Bq·kg ⁻¹	external	internal	total
Волинська область. Камінь-Каширський район									
8*	B2	село	Винішок	8	211	12.8	0.02	1.54	1.55
11	B2	село	Воєгоща***	59	186.2 133.7	14.4	0.11	1.34 0.97	1.45 1.08
12*	B2	село	Городок	18	193.4	13.8	0.04	1.41	1.45
13	B1	село	Грудки***	7	224.1 283.3	15.3	0.02	1.61 2.03	1.62 2.03
14*	B2	село	Гута-Боровенська	44	212.3 182.2	21.4	0.08	1.57	1.65
15	B2	село	Гута-Камінська***	6	182.2 162.5	17	0.01	1.32 1.18	1.33 1.19
18*	B2	село	Іваномисль***	35	216.0 139.1	21.0	0.07	1.59 1.05	1.66 1.12
19*	B2	село	Житнівка	38	241.8	24.2	0.07	1.78	1.85
20	B1	село	Залісся	31	220.4	15.9	0.06	1.58	1.64
23	B1	МІСТО	Камінь-Каширський***	12	188.3 102.6	12.9	0.02	0.68 0.38	0.694 0.393
24*	B2	село	Карасин***	11	195.5 74.9	17.1	0.02	1.43 0.59	1.46 0.61
25*	B2	село	Карпелівка	22	189.0	18.5	0.04	1.39	1.44
31*	B2	село	Малі Голоби***	22	214.5 182.7	18.9	0.04	1.57 1.35	1.61 1.39
32*	B2	село	Малий Обзир	15	244.3	24.4	0.03	1.79	1.82
33	B1	село	Мельники-Мостище	13	205.4	15.7	0.03	1.48	1.50

* – НП, до паспортної дози яких включена індустріальна компонента (D_{ind}).

*** – НП, у яких Укрдержкомгідрометом виконані контрольні вимірювання.

REFERENCE AND RETROSPECTIVE-PROSPECTIVE DOSE

In 1997 in the Department of Dosimetry and Radiation Hygiene of Scientific Centre for Radiation Medicine a principally new "Methodology–97" for *procedures of retrospective and prospective dose estimation* was developed under the leadership of I.A. Likhtarev. This methodology was approved at governmental level and generalised the 12-years experience stored after the accident. According to

РЕФЕРЕНТНЫЕ РЕТРОСПЕКТИВНО-ПРОСПЕКТИВНЫЕ ДОЗЫ

В 1997 г. как результат обобщения всего накопленного за 12 лет опыта в отделе дозиметрии Научного центра радиационной медицины АМН Украины под руководством И.А. Лихтарева была разработана и утверждена на правительственном уровне принципиально новая *методика определения процедуры оценки ретроспективных и прогнозных доз облучения населения на радиоактивно загрязненных территориях* ("Методика–97"). В соответ-

this “Methodology–97” retrospective doses for 1986–1997 and prospective accumulated doses for different intervals of time after the accident (including “life-time doses”) were calculated for each settlement and published in “Booklet 7”. The format of the main table of “Booklet 7” is shown in figure 4.

ствии с этой методикой для каждого населенного пункта в последнем “Сборнике 7” приведены ретроспективно восстановленные дозы облучения с 1986 по 1997 г., а также накопленные и прогнозные дозы облучения в различные периоды после аварии, включая оценку так называемой дозы за жизнь. Табличный формат этого последнего “Сборника 7” показан на рисунке 4.

FIGURE 4. FORMAT OF THE MAIN TABLE IN BOOKLET-7 WITH ESTIMATIONS OF RETROSPECTIVE, PROSPECTIVE AND PASSPORT DOSES FOR SETTLEMENTS OF UKRAINE

РИСУНОК 4. ФОРМАТ ОСНОВНОЙ ТАБЛИЦЫ СБОРНИКА 7 С ОЦЕНКОЙ РЕТРОСПЕКТИВНО-ПРОСПЕКТИВНЫХ И ПАСПОРТНЫХ ДОЗ В НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТАХ УКРАИНЫ

Населений пункт (Settlement)			¹³⁷ Cs у ґрунті кБк•м ⁻² (¹³⁷ Cs soil, kBq•m ⁻²)	Дози опромінення (Doses)																		
				ретроспективні, мЗв (retrospective mSv•year ⁻¹)													накопичені, мЗв (accumulated, mSv)					мЗв•рік ⁻¹ mSv•year ⁻¹
№	Тип (Type)	Назва (Name)		1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1986–1997	1998–2003	2004–2013	2014–2033	2034–2055	за 70 років	1997
Житомирська область. Лугинський район																						
1	село	Буда	53	2.1	3.3	2.4	1.9	1.4	1.2	0.94	0.78	0.66	0.56	0.49	0.42	17	1.8	1.5	1.2	0.49	22	1.2
2	село	Запилля	177	7.1	6.3	4.6	3.6	2.8	2.2	1.9	1.6	1.4	1.2	1.0	0.89	35	3.8	3.4	2.7	1.0	47	1.3
Житомирська область. Народницький район																						
1	село	Лозниця	757	31	14	9.6	7.5	5.9	4.8	4.0	3.4	3.0	2.6	2.4	2.1	84	9.2	8.5	6.9	2.3	111	2.5
2	село	Розсохівське	608	24	13	9.3	7.3	5.7	4.6	3.8	3.2	2.8	2.4	2.2	1.9	78	8.3	7.6	6.1	2.2	102	2.2
Житомирська область. Овруцький район																						
2	село	Делета	173	6.8	18	13	10	7.8	6.2	5.0	4.1	3.4	2.9	2.5	2.1	91	8.7	7.4	6.0	2.6	117	6.0
3	село	Млини	180	7.7	15	11	8.4	6.5	5.1	4.2	3.5	2.9	2.5	2.2	1.9	77	7.9	6.7	5.4	2.2	99	0.66

Special attention has to be paid to the analysis of the contribution of different radionuclides to external exposure in different periods following the accident (figure 5). In spite of that, now the main contributor to external exposure is radiocaesium, at the initial phase of the accident the situation was significantly different. As follows from the diagram in figure 5 at least 19 radionuclides with different activities contributed to the forming of γ-exposure in the first years. In 1986 ¹³⁷Cs covered about 10% of total external doses, the main role played by radioisotopes of niobium, zirconium, iodine, lanthanum, barium. Even in terms of 10-year accumulated dose the relative contribution of radioisotopes of caesium is not higher 70% and the role of radioisotopes of niobium, zirconium, iodine, lanthanum and ruthenium also was very important.

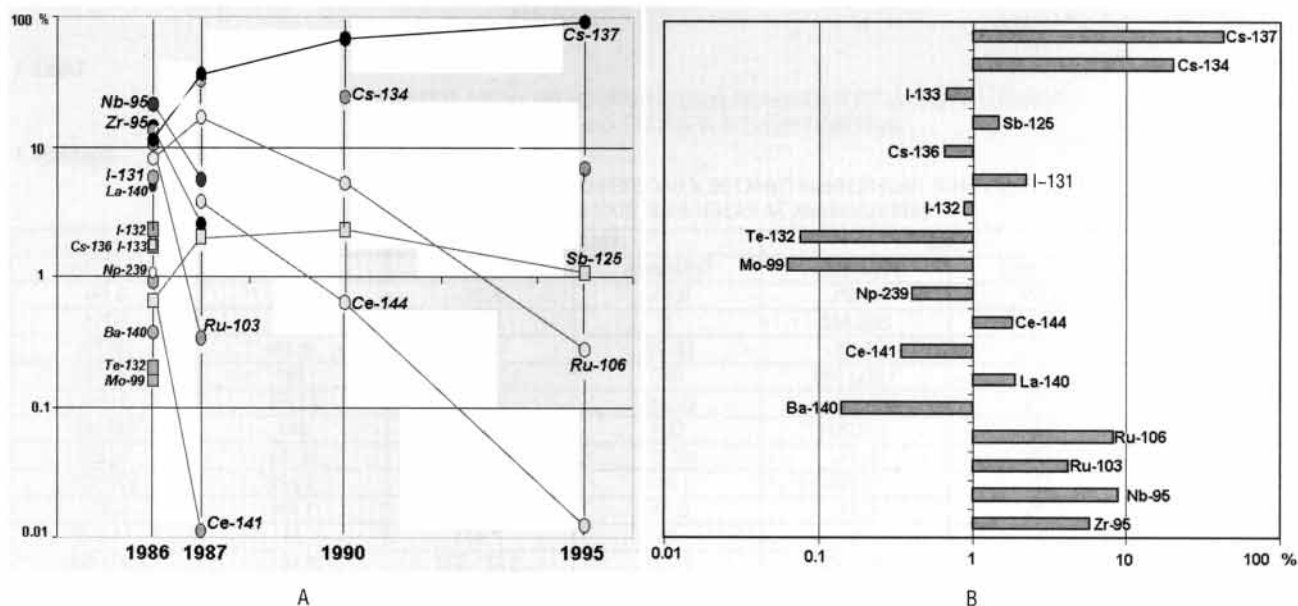
During the whole time after the accident the main role in ingestion exposure was played by radioisotopes of caesium. The dose rate and accumulated doses provided by radioisotopes of strontium during

Заслуживает специального внимания анализ вкладов различных γ-излучателей чернобыльского происхождения в дозу внешнего облучения в различные периоды после аварии (рисунок 5). Из диаграмм (см. рисунок 5) видно, что если в настоящее время вклад в дозу внешнего γ-облучения дают лишь радиоизотопы цезия, то в начальный период после аварии картина существенно отличалась. Формирование внешней γ-компоненты происходило за счет не менее чем 19 радионуклидов, различающихся как своей активностью, так и физическим периодом полураспада. В 1986 г. вклад в дозу ¹³⁷Cs составлял около 10%, основную же роль играли радиоизотопы ниобия, циркония, йода, лантана, бария. Соответственно, если оценить относительный вклад в накопленную за 10 лет после аварии дозу, то, хотя радиоизотопы цезия дали около 70%, важную роль все же сыграли изотопы ниобия, циркония, рутения, а также лантана и йода.

Внутреннее облучение на всем протяжении действия аварийного источника в основном обусловлено радиоизотопами цезия. Облучение радиоизотопами стронция в течение первого постчернобыльского де-

FIGURE 5. RELATIVE CONTRIBUTIONS OF DIFFERENT RADIONUCLIDES FROM "REFERENCE" COMPOSITION TO ANNUAL (A) AND ACCUMULATED FOR 12 YEARS (B) EXTERNAL DOSES OF γ -RADIATION

РИСУНОК 5. ОТНОСИТЕЛЬНЫЙ (%) ВКЛАД РАЗЛИЧНЫХ РАДИОНУКЛИДОВ ЧЕРНОБЫЛЬСКОГО ВЫБРОСА В СРЕДНЕГОДОВУЮ (А) И НАКОПЛЕННУЮ ЗА 12 ЛЕТ (1986–1997 гг.) (Б) ДОЗУ ВНЕШНЕГО γ -ИЗЛУЧЕНИЯ



the first 10 years after the accident is 7–10 times lower and exposure from *trans-uranium elements* is ten times lower than from caesium. All these results were taken into account in the new methodology.

In figure 4 the format of data presentation in "Booklet 7" is shown. This format is principally different from that given in previous Booklets (figure 3). In the new format the results of dose retrospection for 2161 settlements of Ukraine (with population more than 2,300,000 people in 1986–1997) as well as the prospective dose estimation for different time-intervals, including "life-time dose" (70 years) and passport dose for 1997, are presented. An interrelationship between the Booklets was achieved by an introduction of a new column with the *passport dose estimation for the current year*.

During the first 12 years after the accident a territorial zone with settlements for which 12-year doses exceed 10 and even 50 mSv was formed. Additional doses accumulated during the next decade are relatively low (5–10 and very often less than 1 mSv). Lastly, distribution of total life-time doses just slightly differ from that estimated for the first 12 years. Only this result already shows the senselessness of relocation and resettlement if these extremely expensive and socially uncomfortable actions are taken within 12 years after the Chernobyl accident.

Both the investigations performed and Methodologies developed allowed us to make relatively accurate estimations of the distribution of population on the intervals of doses accumulated during different time-periods. In table 1 it was shown that for the main part of population the average 12 year

decade in 7–10 раз ниже, а *трансурановыми элементами* — в десятки раз меньше, чем радиоизотопами цезия как по мощности среднегодовой дозы, так и по накопленной за различные временные периоды дозы. Все эти результаты учтены в новой методологии.

В конечном счете (см. рисунок 4), табличная структура паспортизационного "Сборника 7" существенно отличается от структуры предыдущих буклетов (см. рисунок 3). В таблице (см. рисунок 4) представлены результаты ретроспективного восстановления среднегодовых доз для каждого из 2161 населенных пунктов Украины (население более 2,9 млн человек в 1986–1997 гг.). Кроме того, приведены оценки прогнозируемых доз за разные периоды времени, включая дозу за жизнь (70 лет). Преемственность с предыдущими официальными Сборниками сохраняется введением колонки, где показана оценка среднегодовой паспортной дозы для текущего года.

В течение первых 12 после аварии лет на территории Украины сформировалась зона населенных пунктов, где дозы облучения превышают 10 и даже 50 мЗв. За последующие десятилетия добавка к этой дозе оказывается незначительной — 5–10 мЗв, а во многих случаях и менее 1 мЗв. Распределение населенных пунктов по величине дозы за 70 лет мало чем отличается от такового по дозам за первое 12-летие. Отсюда очевидна вся бессмысленность отселения и переселения — этих чрезвычайно дорогих и социально крайне дискомфортных акций — через 12 лет после Чернобыльской катастрофы.

Выполненные исследования и разработанные методики позволили достаточно четко оценить распределение населения по спектру доз, накопленных в разные периоды времени. Из таблицы 1 видно, что основная доля населения получили средние дозы за 12 лет менее 10 мЗв.

dose is less then 10 mSv. Accumulated 12-year doses above 70 mSv were estimated for less than 2,900 (0.1%) inhabitants. Accumulated 70-year dose can exceed 70 mSv for 14.2 thousand persons living in 31 settlements of Ukraine.

Дозы более 70 мЗв, накопленные за 12 лет, получили менее 2900 (0,1%) жителей, а за 70 лет эта величина может быть превышена у 14,2 тыс. человек, проживающих в 31 населенном пункте Украины.

DISTRIBUTION OF SETTLEMENTS AND POPULATIONS ON THE DOSES ACCUMULATED DURING DIFFERENT PERIODS AFTER THE CHERNOBYL ACCIDENT

ТАБЛИЦА 1

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ И НАСЕЛЕНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЕЛИЧИНЫ ДОЗ, НАКОПЛЕННЫХ ЗА РАЗЛИЧНЫЕ ПОСТАВАРИЙНЫЕ ПЕРИОДЫ

Dose intervals	1986		1986-1997		1986-2055	
	Settlments	Population	Settlments	Population	Settlments	Population
<1mSv	19.9%	15.5%	0.4%	0.2%	0.1%	0.1%
	431	368,800	8	3,770	2	1,215
1-5 mSv	67.7%	77.2%	28.6%	46.5%	18.4%	26.7%
	1463	1,830,290	617	1,103,015	397	634,350
5-10 mSv	9.7%	6.8%	23.3%	24.0%	23.2%	33.0%
	210	160,290	504	568,290	502	782,600
10-70 mSv	2.6%	0.5%	47.1%	29.3%	56.9%	39.6%
	57	12,420	1,017	693,845	1,229	939,420
>70mSv	0.0%	0.0%	0.7%	0.1%	1.4%	0.6%
	0	0	15	2,880	31	14,215
Total	2,161	2,371,800	2,161	2,371,800	2,161	2,371,800

COLLECTIVE DOSE AND RISKS

The results of estimations of the collective doses accumulated during the first year, up to 12 years after the accident and prospective collective doses which could be accumulated up to 2055 (70 years after the accident) for Ukraine populations living in radioactively contaminated territories are shown in figure 6. The ranges 1–50 mSv (dose per capita) gets maximum collective radiation impact. For the first year (1986) this maximum moved to the dose interval 1–5 mSv (71% of the whole collective dose), for the 12-year period it lies in the region of dose per capita 10–50 mSv and in terms of life-time dose per capita maximum of collective radiation impact is located at an interval of 5–50 mSv. Absolute and relative risk assessment can be done based on the results of figure 6. In table 2 the estimations of radiation induced cancer risk for affected population of Ukraine are given.

The latest results of international expert group work on project COSYMA (Probabilistic Accident Consequence Uncertainty Analysis, 1997) were used for values of reference risk coefficients. The dose and dose rate effectiveness factor was given based on recommendations (DDREF=3) (ICRP Publication 60; NCRP, Report No 80).

The average spontaneous level of fatal cancers for Ukraine is 2 thousand cases per 1 million per year (Statistical Reference Book, 1998). The absolute spontaneous level of cancers up to the last 12 years for affected Ukrainian subpopulation is estimated as 94.5 thousand cases. The Chernobyl factor itself adds about 0.8%

КОЛЛЕКТИВНЫЕ ДОЗЫ И РИСКИ

На рисунке 6 показаны оценки коллективных доз облучения населения Украины за первый год и за первые 12 лет после аварии, а также прогнозируемые коллективные дозы до 2055 г. (70 лет после аварии). Максимум коллективного лучевого воздействия приходится на диапазон доз от 1 до 50 мЗв на душу населения. Для первого года максимум смещен в область от 1 до 5 мЗв (71% всей коллективной дозы), для 12-летнего периода этот максимум находится в области 10–50 мЗв, и, наконец, при оценке дозы за жизнь коллективная доза практически полностью формируется за счет средних на душу населения нагрузок 5–50 мЗв. Используя представленные на рисунке 6 данные, можно оценить абсолютный и относительный риск возникновения радиоиндуцированных опухолей у населения, вовлеченного в Чернобыльскую аварию. Эти оценки обобщены в таблице 2.

При построении таблицы 2 в качестве референтных коэффициентов рисков использовали последние оценки международной группы экспертов, работавших в проекте COSYMA (Probabilistic Accident Consequence Uncertainty Analysis, 1997), а для редуцирующих факторов низкой мощности дозы и пролонгированности облучения так называемый фактор DDREF был принят равным 3 (ICRP Publication 60; NCRP, Report №80).

При среднем для Украины спонтанном уровне летальных раков 2 тыс. в год на 1 млн населения (Статистичний довідник, 1998) в рассматриваемой облученной украинской субпопуляции (2,37 млн человек) абсолютный спонтанный уровень за последние 12 после-чернобыльских лет оценивают величиной 94,8 тыс. случаев. Чернобыльский фактор добавляет к спонтан-

FIGURE 6. DISTRIBUTION OF COLLECTIVE DOSES OF AFFECTED POPULATION OF UKRAINE ACCUMULATED FOR FIRST, UP TO 12 AND 70 YEARS AFTER THE CHERNOBYL ACCIDENT ON THE INTERVALS OF DOSE PER CAPITA

РИСУНОК 6. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛЛЕКТИВНЫХ ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ (тыс. челЗв, ВТОРАЯ КОЛОНКА ТАБЛИЦЫ), НАКОПЛЕННЫХ ЗА 1-Й (1986) ГОД, 12 (1986–1997) И 70 (1986–2055) ЛЕТ ПОСЛЕ АВАРИИ НАСЕЛЕНИЕМ РАДИОАКТИВНО-ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ УКРАИНЫ ПО ДИАПАЗОНАМ СРЕДНИХ НА ДУШУ НАСЕЛЕНИЯ ДОЗ (mSv PER CAPITA)

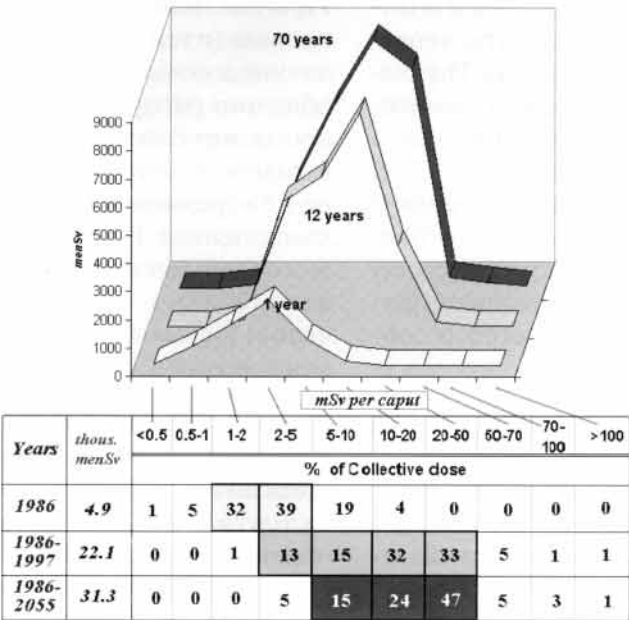


Table 2
ABSOLUTE AND RELATIVE RADIATION RISK ASSESSMENTS FOR POPULATION OF RADIOACTIVE CONTAMINATED TERRITORY OF UKRAINE FOR 12 YEARS AFTER ACCIDENT

Таблица 2
ОЦЕНКА АБСОЛЮТНОГО И ОТНОСИТЕЛЬНОГО РАДИАЦИОННОГО РИСКА, СВЯЗАННОГО С ЧЕРНОБЫЛЬСКИМ ОБЛУЧЕНИЕМ ДЛЯ НАСЕЛЕНИЯ РАДИОАКТИВНО-ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ УКРАИНЫ ЗА 12 ЛЕТ ПОСЛЕ АВАРИИ

mSv per capita		<0.5	0.5-1	1-2	2-5	5-10	10-20	20-50	50-70	70-100	>100	Total
Population	thous. person	1.2	2.6	94.8	1008.2	568.3	465.0	209.6	19.3	1.6	1.2	2371.8
	%	0.05	0.11	4.0	42.5	24.0	19.6	8.8	0.81	0.07	0.05	100
Absolute risk (cases)		0.02	0.07	4.4	96.8	115.7	237.1	249.4	38.1	4.5	4.6	751
Spontaneous level (cases)		47	104	3792	40329	22732	18599	8383	772	66	50	94874
Relative risk (*10 ⁻³)		0.33	0.69	1.2	2.4	5.1	12.8	29.8	49.3	68.0	93.5	7.9
% "Chernobyl" cancers		0.03	0.07	0.12	0.24	0.51	1.26	2.89	4.70	6.37	8.55	0.79

Reference risk coefficient: 0.102 cancer cases per 1 manSv, [“COSYMA” (1997)]
Reference reduction factor (DDREF): 3 [ICRP-60 (1990), NCRP-80]
Reference Ukraine cancer spontaneous level: 2000 per year per 1 mln persons.
Референтный коэффициент риска 0.102 случая на 1 челЗв [“COSYMA” (1997)]
Референтный фактор снижения риска (фактор DDREF) – 3 [ICRP-60 (1990), NCRP-80]
Референтный спонтанный уровень для Украины: 2000 в год на 1 млн жителей

(751 cases) to this spontaneous level. Although for the whole population under consideration such an increase of cancers has no statistical confidence (unobserved), for some sub-groups with average doses above 20 and even above 100 mSv up to 12 years the “local” increase can reach 10%. In terms of absolute risk, about 99% of cases (751) predicted for population with average 12-years doses is in interval 2–70 mSv.

ному уровню около 0,8% (751 случай). Хотя для рассматриваемого контингента прирост “чернобыльских” раков статистически не наблюдаем, для тех подгрупп, которые попадают в область индивидуальных дозовых нагрузок от 20 до 100 мЗв и более за 12 лет, “локальный” прирост может достигать 10%. Если же обратиться к значениям абсолютного риска, то из общего числа прогнозируемых радиоиндуцированных раков (751) почти 99% приходится на диапазон от 2 до 70 мЗв накопленной за 12 лет средней дозы.

INSTEAD OF A CONCLUSION

ВМЕСТО ЗАКЛЮЧЕНИЯ

Now the work in the framework of the National Program of Dosimetric Passportization continues, and, possibly,

Работы в рамках Национальной программы дозиметрической паспортизации продолжаются, и, возмож-

tinues. Possibly in future the dose and risk assessments will be changed and made more precise. However, the authors are absolutely sure that time-spatial distribution of radioactive contamination of Ukrainian territory would not be substantially changed. Therefore it is difficult to expect some significant (and sensation) corrections in dose estimations. The distribution of current, accumulated and prospective doses described in this publication have a conservative level, which is estimated as 1.5 on average but for some dose components it reaches factor 2. Future corrections, most likely, will lead to some decrease in exposure level estimations. It means that risk assessments given in this article have to be considered as conservative.

Taking into account the above remarks it can be confirmed that any, even the most expensive, long-term large-scale epidemiological investigations can hardly give positive information on the contribution of "chernobyl" cancers in observed spontaneous level of cancers. The statistical capacity is absolutely insufficient for such epidemiological investigations.

REFERENCES

Збірка 6. Загальнодозиметрична паспортизація населених пунктів України, які зазнали радіоактивного забруднення після Чорнобильської аварії. МОЗ України, Київ, 1997, 103 с.

[*Booklet 6.* Complex Dosimetric Passportization of Ukrainian Radioactively Contaminated Area as a result of the Chernobyl Accident. Ministry of Public Health of Ukraine, Kyiv, 1997, 103 p.]

Збірка 7. Ретроспективно-прогностичні дози опромінення населення та загальнодозиметрична паспортизація 1997 р. населених пунктів України, що зазнали радіоактивного забруднення внаслідок Чорнобильської аварії. МОЗ України, Київ, 1998, 155 с.

[*Booklet 7.* Retrospective-prognostic Irradiation Doses of Population and Complex Dosimetric Passportization in 1997 of Ukrainian Radioactively Contaminated Area as a result of the Chernobyl Accident. Ministry of Public Health of Ukraine, Kyiv, 1998, 155 p.]

Методика–96. Инструктивно-методические указания "Радиационно-дозиметрическая паспортизация населенных пунктов территории Украины, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате аварии на ЧАЭС, включая тиреодозиметрическую паспортизацию". Киев, 1996.

[*Methodology–96.* Instructive-methodical Documents "Radiation-dosimetric Passportization of Ukrainian Radioactively Contaminated Area as a result of the Chernobyl Accident, including the Thyroid Passportization" Kiev, 1996]

Методика–97. Инструктивно-методические указания "Реконструкция и прогноз доз облуче-

но, в будущем дозиметрические и рискованные оценки будут уточнены. Однако авторы абсолютно убеждены в том, что будущее не внесет каких-либо существенных коррекций в картину пространственно-временного поля радиоактивного загрязнения территории Украины. Поэтому трудно ожидать каких-либо значительных (и тем более сенсационных) изменений в величине дозовых оценок. Показанные в настоящем сообщении распределения текущих, накопленных и прогнозируемых доз содержат определенную консервативность, которая оценивается авторами на уровне 1,5 в среднем, но не более 2 по отдельным дозовым компонентам. Поэтому будущие коррекции скорее всего приведут к некоторому снижению величин доз, а это означает, что приведенные в настоящем сообщении рискованные оценки следует рассматривать как консервативные.

В целом, с учетом приведенных выше замечаний, можно утверждать, что любые, даже самые дорогостоящие крупномасштабные эпидемиологические исследования вряд ли дадут какую-либо позитивную информацию о фактическом вкладе "чернобильских" раков в наблюдаемый спонтанный уровень онкологических заболеваний. Для подобных эпидемиологических исследований совершенно недостаточно их статистической мощности.

ния населения, проживающего на территориях Украины, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате аварии на ЧАЭС". Киев, 1998, 76 с.

[*Methodology–97.* Instructive-methodical Documents "Reconstruction and Prognosis of the Irradiation Doses of Population Residing on the Ukrainian Radioactively Contaminated Area as a result of the Chernobyl Accident". Kiev, 1998, 76 p.]

Сборник 5. Дозиметрическая паспортизация населенных пунктов Украины, подвергшихся радиоактивному загрязнению после Чернобильской аварии. МЗ Украины, Киев, 1995, 312 с.

[*Booklet 5.* Complex Dosimetric Passportization of Ukrainian Radioactively Contaminated Area as a result of the Chernobyl Accident. Ministry of Public Health of Ukraine, Kiev, 1995, 312 p.]

Статистичний довідник. Медико-демографічні паспорти територій України, контрольованих у зв'язку з Чорнобильською катастрофою (1981–1995 рр.). Частина 1, 2. Чорнобильінтерінформ, Київ, 1998. 266 с., 370 с.

[*Statistical Book Reference.* Medical and Demographic Passports of the Ukrainian Areas, which are under Control following the Chernobyl Accident (1981–1995). Parts 1,2. Chornobylinterinform, Kyiv, 1998. 266 p., 370 p.]

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

NCRP, Report № 80. Induction of thyroid cancer by ionizing radiation. NCRP, Bethesda, MD, 1985.

Probabilistic Accident Consequence Uncertainty Analysis. Late Health Effects Uncertainty assessment. Main Report. 1997, Vol. 1.