

RETROSPECTIVE RECONSTRUCTION OF THE THYROID DOSES AFTER THE CHERNOBYL ACCIDENT

РЕТРОСПЕКТИВНАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ ЩИТОВИДНОЙ ЖЕЛЕЗЫ В РЕЗУЛЬТАТЕ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ КАТАСТРОФЫ

G. Goulko

GSF-National Research Center for Environment and Health
Institute for Radiation Protection, D-85764 Neuherberg, Germany

Г. Гулько

Национальный исследовательский центр GSF охраны окружающей среды и здравоохранения
Институт радиационной защиты, D-85764, Нюгерберг, Германия

INTRODUCTION

Thyroid cancer incidence in exposed children is increased in the most contaminated areas during last 5–8 years (Buglova E.E. et al., 1996; Ivannov V.K. et al., 1997; Goulko G. et al., 1998; Jacob P. et al., 1998). These results generally confirm first predictions about expected thyroid cancer rate made for the selected areas of Ukraine in 1991 (Likhtarev I.A. et al., 1993). During the time passed after the Chernobyl accident a lot of efforts were made in Ukraine, Belarus and Russia to improve thyroid dose estimates due to ^{131}I (Pitkevich V.A. et al., 1993; Zvonova I.A., Balonov M.I., 1993; Likhtarev I.A. et al., 1994–1996; Tsyb A.F. et al., 1994; Gavrillin Y. et al., 1996; Goulko G.M. et al., 1996, 1998; Drozdovitch V.V. et al., 1997). Increased interest to this problem initiated several epidemiological studies considering different groups of people exposed in childhood due to the Chernobyl accident.

AVAILABLE DATA

Information about concentration of ^{131}I and short-lived isotopes in the environmental media and human thyroids is very limited. This is the main difficulty in the thyroid dose assessment after the Chernobyl accident. Present estimations of thyroid doses are based on:

^{131}I activity measurements in thyroids;

^{131}I activity measurements in milk, air and water and radioecological models;

correlation of the thyroid doses with ^{137}Cs depositions and locations of settlements;

questionnaires;

atmospheric dispersion models;

different combinations of 1–5.

In addition, important information about meteorological conditions and beginning of the pasture

ВВЕДЕНИЕ

В последние 5–8 лет у облученных детей, проживающих в наиболее загрязненных областях, возросла заболеваемость раком щитовидной железы (ЩЖ) (Buglova E.E. et al., 1996; Ivannov V.K. et al., 1997; Goulko G.M. et al., 1998; Jacob P. et al., 1998). Эти результаты в целом подтверждают первые оценки ожидаемой частоты рака ЩЖ в отдельных областях Украины в 1991 г. (Likhtarev I.A. et al., 1993). На протяжении послеварийного периода в Украине, Беларуси и России были предприняты значительные усилия по совершенствованию оценки доз облучения ЩЖ ^{131}I (Pitkevich V.A. et al., 1993; Zvonova I.A., Balonov M.I., 1993; Likhtarev I.A. et al., 1994–1996; Tsyb A.F. et al., 1994; Gavrillin Y. et al., 1996; Goulko G.M. et al., 1996, 1998; Drozdovitch V.V. et al., 1997). Повышенный интерес к данной проблеме инициировал эпидемиологические исследования по изучению различных групп людей, облученных в детстве вследствие аварии на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС).

ИМЕЮЩИЕСЯ ДАННЫЕ

Информация о концентрации ^{131}I и короткоживущих изотопов в окружающей среде и ЩЖ человека очень ограничена. Это является основным затруднением для оценки доз облучения ЩЖ после аварии на ЧАЭС. Настоящие оценки доз облучения ЩЖ основаны на следующем:

измерения активности ^{131}I в ЩЖ;

измерения активности ^{131}I в молоке, воздухе и воде; радиоэкологические модели;

корреляции доз облучения ЩЖ с плотностью загрязнения почвы ^{137}Cs и пунктом проживания;

опросники;

атмосферные дисперсионные модели;

различные комбинации перечисленных методов.

Кроме того, при разработке модели необходимо принимать во внимание важную информацию о метеоро-

period should be taken into account in the development of the model.

Reliable measurements of ^{131}I concentration in the thyroids can be considered as a most important basis for the dose estimations. Number of available for the analysis measurements is presented in table. Group of screened people includes persons of all ages in rural and urban settlements mainly within a distance of 150–250 km from the Chernobyl Nuclear Power Plant. In most cases only one single measurement was carried out for each person.

рологических условиях и начале сезона выпаса скота на пастбищах.

Надежные измерения концентрации ^{131}I в ЩЖ можно считать наиболее значимой основой для оценки дозы. Ряд доступных для анализа измерений приведен в таблице. Группа обследованного населения включает лиц всех возрастов, проживающих в сельской и городской местности, в основном на расстоянии 150–250 км от ЧАЭС. В большинстве случаев каждому обследованному было проведено только одно единичное измерение.

^{131}I ACTIVITY MEASUREMENTS IN THE THYROID

TABLE

ИЗМЕРЕНИЯ АКТИВНОСТИ ^{131}I В ЩИТОВИДНОЙ ЖЕЛЕЗЕ

ТАБЛИЦА

Country	Total number	High quality (25–40% error)
Ukraine (Likh tarev I.A. et al., 1993–1995; Goulko G.M. et al., 1998): Kyiv city, Kyiv, Zhytomir, Chernigov and Vinnitza regions	150,000	60,000
Belarus (Gavrilin Y. et al., 1996): Minsk city, Gomel and Mogilev regions	130,000 (300,000)	10,000
Russia (Zvonova I.A., Balonov M.I., 1993): Bryansk and Tula regions	14,000*	2,000

Note. * — additionally about 28,000 measurements are available in lower contaminated Kaluga region (Tsyb A.F. et al., 1994).

Примечание. * — дополнительно доступны результаты приблизительно 28 000 измерений, проведенных в мало загрязненной Калужской области (Tsyb A.F. et al., 1994).

Quality and uncertainties of the Ukrainian ^{131}I activity measurements were analysed by I.A. Likh tarev et al. (1995). About 40% of these measurements were performed with the energy-selective devices. Almost all of the measurements in Belarus were carried out by the military device DP-5 operating in dose-rate regime of measurement (Gavrilin Y. et al., 1996). Specialised spectrometric equipment were used only in about 2,000 measurements in Bryansk and Tula region of Russia. In general, measurements performed in Ukraine are considered as a more reliable.

Very few ^{131}I activity measurements in milk and air are available in Ukraine. This data were used in dose reconstruction for the inhabitants of Kyiv city (Likh tarev I.A. et al., 1994a). Analysis of ^{131}I activity measurements in soil for the contaminated areas of Russia was reported by V.A. Pitkevich et al. (1993). 409 spectrometric measurements of ^{131}I concentration in soil, 163 measurements of grass and 54 of milk were applied for the thyroid dose reconstruction in Belarus (Drozdovitch V.V. et al., 1997).

Information about individual behaviour can be applied for the estimation of individual doses. Detailed questionnaire was developed and applied for the thyroid dose reconstruction in Ukraine (Likh tarev I.A. et al., 1996). 16,250 people (11,766 children up to 18 years old at the time of the accident) were questioned in the most contaminated areas of Ukraine. This number includes 2,394 persons with monitoring measurements of the thyroid. Additionally, information about behaviour of approximately 30,000 evacuees is available (Likh tarev I.A. et al.,

Качество и неопределенность измерений активности ^{131}I в Украине проанализированы I.A. Likh tarev и соавторами (1995). Около 40% этих измерений выполнено с помощью энерго-селективных приборов. Почти все измерения в Беларуси проведены с помощью армейского прибора ДП-5, предназначенного для измерения мощности дозы (Gavrilin Y. et al., 1996). Специализированное спектрометрическое оборудование использовали только приблизительно в 2000 измерений в Брянской и Тульской областях России. В целом, измерения, проведенные в Украине, рассматриваются как более надежные.

В Украине имеется очень мало результатов измерений активности ^{131}I в молоке и воздухе. Эти данные использовали для реконструкция дозы облучения жителей Киева (Likh tarev I.A. et al., 1994a). Результаты анализа измерений активности ^{131}I в почве загрязненных областей России представлены V.A. Pitkevich и соавторами (1993). В Беларуси для реконструкции доз облучения ЩЖ использовали результаты 409 спектрометрических измерений концентрации ^{131}I в почве, 163 — в траве и 54 — в молоке (Drozdovitch V.V. et al., 1997).

Информация об индивидуальном поведении людей может быть использована для оценки индивидуальных доз облучения. В Украине разработан и применен для реконструкции доз облучения ЩЖ подробный опросник (Likh tarev I.A. et al., 1996). Были опрошены 16 250 лиц (включая 11 766 детей в возрасте до 18 лет на момент аварии), проживающих в наиболее загрязненных областях Украины, в том числе 2394 лиц с мониторингом измерений ЩЖ. Дополнительно имеется информация о поведении около 30 000 эвакуированных лиц (Likh tarev I.A. et al., 1994c). На ос-

1994c). These data will be a basis for developing the model of the dose reconstruction based on behaviour factors. About 150,000 people were interviewed in Belarus in 1988 using a simple questionnaire containing only 5 questions about residence at the time of the accident, consumption of milk, starting day for the pasture period, restriction of milk consumption and administration of stable iodine (Gavrilin Y. et al., 1996). Public survey was performed in Bryansk region in 1987 (Zvonova I.A., Balonov M.I., 1993). People were mainly asked about consumption of different foodstuff and applied countermeasures. About 600 questionnaires were analysed together with ^{131}I activity measurements in the thyroids.

RESULTS AND DISCUSSION

To reconstruct thyroid doses several population groups were considered:

- people with short-time period of intake;
- people with long-time period of intake;
- people evacuated, but staying in contaminated area;
- people exposed in utero;
- people from «non-contaminated» area;
- liquidators.

These groups of people could have ^{131}I activity measurements in their thyroids or could not. They could live in the settlements where such measurements were performed or were not performed. Age is also an important characteristic of the population for the dose reconstruction. Depending from an availability of data the individual or average doses can be estimated for the specific group of people. Several models were developed to reconstruct radioiodine concentrations and conditions of exposure for different groups of population (Likhtarev I.A. et al., 1993, 1994a, 1994b, 1996; Pitkevich V.A. et al., 1993; Zvonova I.A., Balonov M.I., 1993; Tsyb A.F. et al., 1994; Gavrilin Y. et al., 1996; Goulko G.M. et al., 1996, 1998; Drozdovitch V.V. et al., 1997). Present estimations of individual doses are based on ^{131}I activity measurements in the thyroids. Similar models for the individual dose estimations was developed in Ukraine, Russia and Belarus. These models include several assumptions:

deposition on the considered territory occurred during one single day when pasture period is already started (April 27, 1986);

intake for the short-time period of stay on the contaminated territories can be represented by a single intake function and for the long-time period — by the time-dependence of milk contamination;

новании этих данных будет разработана модель реконструкции дозы облучения по поведенческим факторам. Около 150 000 лиц были интервьюированы в Беларуси в 1988 г. с использованием простого опросника, содержащего только 5 вопросов, касающихся места проживания на момент аварии, потребления молока, дня начала выпаса скота на пастбищах, ограничения потребления молока и применения препаратов стабильного йода (Gavrilin Y. et al., 1996). Обследование населения было проведено в Брянской области в 1987 г. (Zvonova I.A., Balonov M.I., 1993). В основном население опрашивали относительно потребления различных продуктов питания и проведенных контрмер. Проанализированы данные около 600 опросников и измерений активности ^{131}I в ЩЖ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для реконструкции доз облучения ЩЖ были обследованы следующие группы населения:

- с кратковременным периодом поступления [^{131}I];
- с долговременным периодом поступления [^{131}I];
- эвакуированных, но находящихся на загрязненных территориях;
- облученных внутриутробно;
- из «незагрязненных» территорий;
- ликвидаторы.

В этих группах населения не всегда проводили измерения активности ^{131}I в ЩЖ. Обследованные могли проживать в населенных пунктах, где как проводили, так и не проводили подобные измерения. Возраст также является важной характеристикой популяции для реконструкции дозы облучения. Для определенных групп населения могут быть оценены индивидуальные или средние дозы облучения в зависимости от доступности данных. Для восстановления концентрации радиоактивного йода и условий облучения отдельных групп населения были разработаны различные модели (Likhtarev I.A. et al., 1993, 1994a, 1994b, 1996; Pitkevich V.A. et al., 1993; Zvonova I.A., Balonov M.I., 1993; Tsyb A.F. et al., 1994; Gavrilin Y. et al., 1996; Goulko G.M. et al., 1996, 1998; Drozdovitch V.V. et al., 1997). Данные оценки индивидуальных доз облучения основаны на измерениях активности ^{131}I в ЩЖ. Подобные модели для оценки индивидуальных доз облучения были разработаны в Украине, России и Беларуси. Эти модели включают следующие предположения:

выпадения на данной территории произошли на протяжении 1 дня, когда уже начался период выпаса скота на пастбищах (27 апреля 1986 г.);

поступление при кратковременном пребывании на загрязненных территориях может быть описано с помощью единственной функции поступления, а при долговременном — временной зависимости загрязнения молока;

reference anatomical, metabolic and radioecological parameters are used.

Intake for the long-time period in Bryansk region is assumed to be a constant during 15–20 days after the deposition. Then intake exponentially decreases accordingly to the milk constant rate (Zvonova I.A., Balonov M.I., 1993). Such model takes indirectly into account contribution of inhalation during the first days after the accident and possible prolonged deposition.

Applying of data about individual behaviour is an alternative method for an assessment of individual doses. This method can be used only in combination with doses based on ^{131}I activity measurements in the thyroids or results of radioecological models (Goulko G.M. et al., 1996; Drozdovitch V.V. et al., 1997).

Individual doses are the basis for the estimation of average exposure in different population groups. In Ukraine average age-dependent doses were assessed in each settlement where ^{131}I activity measurements were performed. Then these age-specific doses were extrapolated to other closely located settlements based on correlation with ^{137}Cs deposition, distance and direction relatively to the ChNPP (Likhtarev I.A. et al., 1994b; Goulko G.M. et al., 1998). Similar methods based on empirical relationship between individual doses and ^{137}Cs deposition were developed in Belarus and Russia (Zvonova I.A., Balonov M.I., 1993; Gavrilin Y. et al., 1996). An ^{131}I environmental transfer model was applied to estimate thyroid doses for different population groups in Belarus (Drozdovitch V.V. et al., 1997). This model is based on the ratio between ^{131}I and ^{137}Cs ground deposition estimated in the southern districts of Gomel and Mogilev regions. Additionally, the influence of applied countermeasures has been taken into account, such as the interruption of locally produced milk consumption, and the appropriate correction factors have been estimated.

Preliminary dose assessment was performed in Ukraine in 1986–1991. During this period primary measurements of ^{131}I activity in the thyroids were analysed and doses in the areas with such monitoring measurements were estimated (individual and average age-specific in the several districts and big towns) (Likhtarev I.A. et al., 1993). At the next stage (1991–1993) average age-specific doses in each settlement were assessed in three northern Ukrainian regions. This area includes settlements with and without monitoring measurements (Likhtarev I.A. et al., 1993, 1994a, 1994b, 1996; Goulko G.M. et al., 1996, 1998). At present more advanced models are applied for the assessment of individual and age-specific doses in different locations. These models are based on more realistic intake functions.

Estimation of the dose uncertainties is very important parameter for the risk assessment. Sensitivity

используются справочные анатомические, метаболические и радиоэкологические параметры.

Предположено, что долговременное поступление в Брянской области было постоянным в течение 15–20 дней после выпадения. Затем поступление экспоненциально уменьшалось в соответствии с константой скорости очистки молока (Zvonova I.A., Balonov M.I., 1993). Модель косвенно учитывает роль ингаляционного пути поступления в первые дни после аварии и возможное пролонгированное выпадение.

Использование сведений об индивидуальном поведении является альтернативным методом оценки индивидуальных доз облучения. Этот метод может быть использован только в сочетании с оценками доз, основанными на измерениях активности ^{131}I в ЩЖ или радиоэкологических моделях (Goulko G.M. et al., 1996; Drozdovitch V.V. et al., 1997).

Индивидуальные дозы являются основой для оценки среднего облучения различных групп населения. В Украине оценены средние возрастные дозы для жителей каждого населенного пункта, где выполнены измерения активности ^{131}I . Далее эти возрастные дозы экстраполировали на другие близко расположенные населенные пункты, основываясь на корреляции с выпадением ^{137}Cs , расстоянием и направлением относительно ЧАЭС (Likhtarev I.A. et al., 1994b; Goulko G.M. et al., 1998). Сходные методы, основанные на эмпирической связи индивидуальных доз и выпадением ^{137}Cs , разработаны в Беларуси и России (Zvonova I.A., Balonov M.I., 1993; Gavrilin Y. et al., 1996). Для оценки доз облучения ЩЖ в различных группах населения Беларуси использовали модель переноса ^{131}I в окружающей среде (Drozdovitch V.V. et al., 1997). Эта модель базируется на определении отношения выпадения на почву ^{131}I и ^{137}Cs в южных районах Гомельской и Могилевской областей. Дополнительно учитывается влияние проведенных контрмер (прекращение потребления местного молока) вводятся и соответствующие поправочные коэффициенты.

Предварительные оценки доз в Украине проведены в 1986–1991 гг, когда анализировали результаты первичных измерений активности ^{131}I в ЩЖ и оценивали дозы облучения в областях, где проводили измерения (индивидуальные и средние возрастные дозы для жителей различных районов и крупных городов) (Likhtarev I.A. et al., 1993). В 1991–1993 гг. были оценены средние возрастные дозы для жителей каждого населенного пункта в трех северных областях Украины. В эти области входят населенные пункты, в которых как проводили, так и не проводили измерения (Likhtarev I.A. et al., 1993, 1994a, 1994b, 1996; Goulko G.M. et al., 1996, 1998). В настоящее время применяют усовершенствованные модели оценки индивидуальных и возрастных доз облучения. Эти модели основаны на более реалистичных функциях поступления.

Оценка неопределенности дозы является очень важным параметром оценки риска. При анализе чувстви-

analysis shows that natural variability of the thyroid mass is a main contributor to the final uncertainty of the dose estimated on the basis of ^{131}I activity measurements (40–60%). The second important source of uncertainties is error in the measurements of ^{131}I activity in the thyroid (25–30% for the good quality measurements). Uncertainties due to variability of the thyroid mass or errors of the measurements can not be reduced. This sensitivity analysis does not consider another possible contributor to the variance of the thyroid dose — uncertainties due to the modelling of the intake function.

Further progress in the thyroid dose reconstruction is connected with development of models for the estimation of individual and average age-dependent doses in different locations, as well as with assessments of uncertainties of these estimates.

ACKNOWLEDGMENTS

This study was supported by the INCO-COPERNICUS project IC15CT960306 of the European Commission, and by the project «Scientists help Chernobyl children» supported by the German Electricity Companies (VDEW). Author would like to thank I. Likharev, I. Kayro, N. Chepurny, V. Shpak and A. Moskalyuk (Scientific Centre for Radiation Medicine, Kyiv, Ukraine), V. Drozdovitch, Ya. Kenigsberg, V. Minenko (Scientific Research and Clinical Institute for Radiation Medicine and Endocrinology, Minsk, Belarus), I. Zvonova, M. Balonov (Institute of Radiation Hygiene, St. Petersburg, Russia), P. Jacob, G. Pröhl, G. Voigt (GSF-Institut für Strahlenschutz, Neuherberg, Germany).

REFERENCES

- Buglova E.E., Kenigsberg J.E., Sergeeva N.V. Cancer risk estimation in Belarussian children due to thyroid irradiation as a consequence of the Chernobyl nuclear accident. *Health Phys.*, 1996, 71: 45–49.
- Drozdovitch V.V., Goulko G.M., Minenko V.F., Paretzke H., Voigt G., Kenigsberg Ya.I. Thyroid dose reconstruction for the population of Belarus after the Chernobyl accident. *Radiat. Environ. Biophys.*, 1997, 36: 17–23.
- Gavrilin Y., Kbrouch V., Shinkarev S., Drozdovitch V., Minenko V., Sbemyakina E., Bouville A., Anspaugh L. Estimation of thyroid doses received by the population of Belarus as a result of the Chernobyl accident. In: *The Radiological Consequences of the Chernobyl Accident. Proceedings of the First International Conference Minsk, Belarus, 18–22 March 1996.* EUR 16544 EN, 1996, pp.1011–1020.
- Goulko G.M., Chumak V.V., Chepurny N.I., Henrichs K., Jacob P., Kairo IA, Likharev IA, Repin V.S., Sobolev B.G., Voigt G. Estimation of ^{131}I thyroid doses for the evacuees from Pripjat. *Radiat. Environ. Biophys.*, 1996, 35: 81–87.
- Goulko G.M., Chepurny N.I., Jacob P., Kairo IA, Likharev IA, Pröhl G., Sobolev B.G. Thyroid doses and

тельности установлено, что естественная изменчивость массы ЩЖ вносит основной вклад в конечную неопределенность дозы, оцененной на основе измерения активности ^{131}I (40–60%). Вторым важным источником неопределенности является ошибка измерений активности ^{131}I в ЩЖ (25–30% при высоком качестве измерений). Неопределенности, обусловленные вариабельностью массы ЩЖ и погрешностями измерений, не могут быть снижены. Этот анализ чувствительности не учитывает возможный вклад в изменения дозы облучения ЩЖ неопределенности, обусловленной моделированием функции поступления.

Дальнейший прогресс реконструкции доз облучения ЩЖ будет определяться разработкой моделей для оценки индивидуальных и средних возрастных доз в различных местах проживания, а также характеристик неопределенности этих оценок.

ВЫРАЖЕНИЕ ПРИЗНАТЕЛЬНОСТИ

Исследование выполнено благодаря поддержке проекта IC15CT960306 INCO-COPERNICUS Европейской Комиссии и проекта «Помощь ученым детям Чернобыля» электроэнергетических компаний Германии (VDEW). Автор выражает благодарность И. Лихтареву, И. Кайро, Н. Чепурному, В. Шпак и А. Москалюк (Научный центр радиационной медицины, Киев, Украина), В. Дроздович, Я. Кенигсберг, В. Миненко (Научно-исследовательский и клинический институт радиационной медицины и эндокринологии, Минск, Беларусь), И. Звоновой и М. Балонову (Институт радиационной гигиены, Санкт-Петербург, Россия), P. Jacob, G. Pröhl, G. Voigt (GSF-Institut für Strahlenschutz, Нюгерберг, Германия).

thyroid cancer incidence after the Chernobyl accident: assessments for the Zhytomyr region (Ukraine). *Radiat. Environ. Biophys.*, 1998, 36: 261–273.

Ivannov V.K., Tsyb A.F., Gorsky A.I. et al. Leukemia and thyroid cancer in emergency workers of the Chernobyl accident: estimation of radiation risks (1986–1995). *Radiat. Environ. Biophys.*, 1997, 36: 9–16.

Jacob P., Goulko G., Heidenreich W.F., Likharev I., Kairo I., Tronko N.D., Bogdanova T.I., Kenigsberg J., Buglova E., Drozdovitch V., Golovneva A., Demidchik E.P., Balonov M., Zvonova I., Beral V. Thyroid cancer risk to children calculated. *Nature*, 1998, 392: 31–32.

Likharev IA, Shandala N.K., Goulko G.M., Kairo IA. Exposure doses to thyroid of the Ukrainian population after the Chernobyl accident. *Health Phys.*, 1993, 64: 594–599.

Likharev IA, Goulko G.M., Kairo IA, Los I.P., Henrichs K., Paretzke H.G. Thyroid exposures resulting from the Chernobyl accident in the Ukraine. Part 1: Dose estimates for the population of Kiev. *Health Phys.*, 1994a, 66: 137–146.

Likharev IA, Goulko G.M., Sobolev B.G., Kairo IA, Chepurny N.I., Pröhl G., Henrichs K. Thyroid dose assessment for the Chernigov region (Ukraine): estimation based on ^{131}I thyroid measurements and extrapolation of the results to districts without monitoring. *Radiat. Environ. Biophys.*, 1994b, 33: 149–166.

Likhtarev IA, Chumak VV, Repin VS. Retrospective reconstruction of individual and collective external g-doses of population evacuated after the Chernobyl accident. *Health Phys.*, 1994c, 66: 643–652.

Likhtarev IA, Goulko G.M., Sobolev B.G., Kairo IA, Pröhl G., Rath P., Henrichs K. Evaluation of the ^{131}I thyroid-monitoring measurements performed in Ukraine during May and June of 1986. *Health Phys.*, 1995, 69: 6–15.

Likhtarev I., Sobolev B., Kairo I., Tabachny L., Jacob P., Pröhl G., Goulko G. Results of large scale thyroid dose reconstruction in Ukraine. In: *The Radiological Consequences of the Chernobyl Accident. Proceedings of the First International Conference, Minsk, Belarus, 18–22 March 1996.* EUR 16544 EN, 1996, pp. 1021–1034.

Pitkevich VA, Shershakov VM, Duba VV, Chekin SY, Ivanov VK, Vakulovski SM, Mabonko KP, Volokitin AA,

Tsaturov YS, Tsyb AF. Reconstruction of radionuclide composition of the deposition in Russia due to the Chernobyl accident. *Radiation and Risk*, 1993, 3: 62–93.

Tsyb AF, Stepanenko VF., Gavrilin YI., Kbrouch VT., Shinkarev SM., Omelchenko VN., Ismailov FG., Pesbakov CY., Yakubovich ND., Proshin AD., Kuzmin PS. The problems of the retrospective estimation of exposure doses of inhabitants affected by the Chernobyl accident: peculiarities of forming, structure and level of irradiation according to the data of direct measurements. Part 1: Internal thyroid doses. WHO/EOS/94.14, Geneva, 1994.

Zvonova IA, Balonov MI. Radioiodine dosimetry and prediction of consequences of thyroid exposure of the Russian population following the Chernobyl accident. In: S.E. Mervin, M.I. Balonov (eds.) *The Chernobyl Paper. Vol. 1. Doses to the Soviet Population and the Early Health Effects Studies.* Research Enterprises, Richland, WA, 1993, pp. 71–125.