

УДК 613.648:616.441

І. А. Ліхтарьов, Л. М. Ковган, М. І. Чепурний, С. В. Масюк✉

Державна установа “Національний науковий центр радіаційної медицини” Національної академії медичних наук України, вул. Мельникова, 53, м. Київ, 04050, Україна

ІНТЕРПРЕТАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ ВМІСТУ РАДІОЙОДУ У ЩИТОПОДІБНІЙ ЗАЛОЗІ МЕШКАНЦІВ УКРАЇНИ (1986 РІК)

Мета. Аналіз, ревізія, оцінка надійності і точності результатів усіх вимірювань радіойоду у щитоподібній залозі мешканців України, що були здійснені у 1986 році, та обґрунтування коефіцієнтів калібрування, які мають бути застосовані при інтерпретації вимірювань, виконаних некаліброваними приладами.

Матеріали та методи. На основі даних 150 тис. прямих вимірювань вмісту ^{131}I у щитоподібній залозі, отриманих в рамках тиреодозиметричного моніторингу 1986 року, розраховано активність радіойоду у щитоподібній залозі мешканців найбільш забруднених регіонів України. Розроблено методу розрахунку похибок вимірювань та визначено їх точність у припущенні, що щільність розподілу похибок основних параметрів вимірювання близька до гаусівської. За результатами лабораторних вимірювань визначено калібрувальні коефіцієнти інтегральних радіометрів СРП-68-01 – приладів, що найчастіше використовувались при проведенні тиреодозиметричного моніторингу.

Результати. Розподіл оцінок вмісту радіойоду в щитоподібній залозі є близьким до логнормального з середнім геометричним – 4,8 кБк та геометричним стандартним відхиленням – 3,8. Більшість цих оцінок (90 %) лежить в інтервалі 0,58–47 кБк, а основний масив значень їх відносних похибок (90 %) знаходиться у межах 0,1–0,6. Таким чином, одержано модель спостереження радіоактивності щитоподібної залози з класичною адитивною похибкою.

Ключові слова: Чорнобильська катастрофа, щитоподібна залоза, радіоактивне опромінення, тиреодозиметричний моніторинг, калібрувальний коефіцієнт, похибки вимірювання.

Проблеми радіаційної медицини та радіобіології. 2015. Вип. 20. С. 185–203.

✉ Масюк Сергій Володимирович, e-mail: masja@rpi.kiev.ua

I. A. Likhtarov, L. M. Kovgan, M. I. Chepurny, S. V. Masiuk✉

State Institution "National Research Center for Radiation Medicine of the National Academy of Medical Science of Ukraine", Melnykov str., 53, Kyiv, 04050, Ukraine

Interpretation of results of radioiodine measurements in thyroid for residents of Ukraine (1986)

Objective. The purpose of this research is to make analysis, revision and estimation both reliability and accuracy of all measurements of radioiodine in the thyroid for residents of Ukraine, which were performed in 1986, and to justify the calibration factors to be applied for interpretation of measurements performed by non-calibrated devices.

Materials and methods. The radioiodine activity in the thyroid for residents of the most contaminated oblasts of Ukraine has been calculated on the base of 150 thousands direct measurements of the content of ^{131}I in thyroid obtained in the frames of the thyroid monitoring in 1986. A method for the calculation of measurement errors has been developed and the accuracy of the errors has been determined assuming that the density of errors' distribution for main parameters of the measurements is close to Gaussian. Using the results of laboratory measurements, the calibration factors have been determined for integrated radiometers SRP-68-01 – devices which were often used to perform the thyroid dosimetric monitoring.

Results. The distribution of estimates on the content of radioiodine in thyroid is close to the lognormal one with geometric mean being equal to 4.8 kBq and geometric standard deviation being equal to 3.8. Most of these estimates (90 %) are in the range of 0.58–47 kBq, and the main set of their relative errors (90 %) are between 0.1 and 0.6. Thus, the model of thyroid activity observation with classical additive error has been obtained.

Key words: Chernobyl disaster, thyroid, radioactive irradiation, thyroid dosimetric monitoring, calibration factor, errors of a measurement.

Problems of radiation medicine and radiobiology. 2015;20:185-203.

ВСТУП

Особливістю Чорнобильської аварії стало те, що під вплив радіоїдної атаки потрапило практично все населення України, зокрема діти та підлітки, опромінення щитоподібної залози (ЩЗ) яких є найбільш небезпечним. Треба також підкреслити, що саме радіоіндуковані раки щитоподібної залози на сьогодні є головним статистично достовірним віддаленим ефектом, який спостерігається в постчорнобильський період. Цілком зрозуміло, що для коректного ризик-аналізу вкрай важливо знати не лише дозову оцінку опромінення щитоподібної залози, але й точність такої оцінки, яка характеризується адитивною або мультиплікативною похибкою.

Протягом післячорнобильських років у відділі дозиметрії та радіаційної гігієни Інституту радіаційної гігієни та епідеміології ННЦРМ накопичена інформація щодо результатів близько 150 тисяч прямих вимірювань вмісту радіоїоду в ЩЗ, виконаних у травні-червні 1986 року [1–3], включаючи приблизно 112 тисяч вимірювань у дітей та підлітків. За останні 25 років накопичений величезний досвід використання цих даних для оцінки як індивідуальних дозових навантажень на щитоподібну залозу, так і доз для різних статево-вікових груп населення (так званих індивідуалізованих доз), що постраждало внаслідок Чорнобильської аварії [4–7].

INTRODUCTION

A peculiarity of the Chernobyl accident was that the radioiodine attack affected to almost the entire population of Ukraine, in particular, to children and teenagers for whom the exposure of the thyroid is the most dangerous. It should be also emphasize that the radiation-induced thyroid cancer is currently the main remote statistically significant effect observed in the Post Chernobyl period. It is clear that for correct risk analysis one has to know not only the estimate of the thyroid dose, but also to know the accuracy of this estimation, which is characterized by additive or multiplicative error.

During the post Chernobyl years, the Department of Dosimetry and Radiation Hygiene at the Institute of Radiation Hygiene and Epidemiology of NRCRM accumulated the results of ~150,000 direct measurements of radioiodine content in thyroid made in May and June 1986 [1–3], including roughly 112,000 measurements in children and teenagers. For the past 25 years a vast experience in the use of these data to estimate both individual thyroid doses and doses for different sex-age population groups (so-called individualized doses) affected by the Chernobyl accident has been accumulated [4–7].

У перші роки після аварії оцінки дозового навантаження на ЩЗ були необхідні для прийняття рішень щодо подолання наслідків Чорнобильської катастрофи, і тому для їх розрахунку були використані дозиметричні моделі, що мали заздалегідь консервативний характер [2].

В середині 90-х років стало зрозуміло, що на радіоактивно забруднених територіях України захворюваність на рак ЩЗ суттєво зросла [8–10]. Тому виникла потреба у проведенні радіоепідеміологічних досліджень на вказаних територіях, а значить – у максимально точних, не консервативних оцінках доз опромінення ЩЗ. Такі роботи стартували з початком виконання українсько-американського епідеміологічного проекту (УАЕП) з вивчення раків та інших захворювань ЩЗ після аварії на ЧАЕС [5–7, 10]. Так за час виконання УАЕП було розроблено нові методи оцінки доз опромінення ЩЗ та їх похибок і показано, що дозові похибки впливають на співвідношення доза-ефект [7, 11–15].

Аналіз результатів оцінки доз опромінення ЩЗ за даними прямих вимірювань в рамках УАЕП [7] виявив ряд проблем, для вирішення яких стала очевидною необхідність детального перегляду та ревізії усіх етапів реконструкції доз. Це, в першу чергу, стосується однієї з центральних задач – інтерпретації результатів інструментальних вимірювань вмісту радіоїоду, зокрема переходу від індикації приладів до активності радіоїоду у ЩЗ через калібрувальний коефіцієнт. Складність цієї задачі зумовлена тим, що в умовах аварійної ситуації масові вимірювання проводилися великою кількістю приладів (значна частина яких становила собою геологічні інтегральні радіометри СРП-68-01) різними дозиметричними бригадами на території декількох областей. Цей факт став причиною того, що досить значний відсоток відомостей, які містили результати вимірювань, не супроводжувався інформацією щодо калібрування приладів, а експертні значення коефіцієнтів калібрування (КК) були мало обґрунтованими.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета даної роботи – детальний аналіз, ревізія, оцінка надійності і точності результатів усіх вимірювань радіоїоду у щитоподібній залозі мешканців України, що були здійснені у 1986 році, та обґрунтування коефіцієнтів калібрування, які мають бути застосовані при інтерпретації вимірювань, виконаних некаліброваними приладами. Для ряду вимірювань удосконалення методології

In the first years after the accident, the estimations of thyroid doses were necessary to make decisions on overcoming consequences of the Chernobyl disaster, and therefore for their calculations there were used dosimetric models being conservative in their nature [2].

The significantly increased thyroid cancer morbidity over the contaminated territories of Ukraine has become evident in the mid 90th [8–10]. Therefore a need for radio epidemiologic studies on these areas emerged meaning the necessity to perform the most accurate, non-conservative, estimates of the thyroid doses. These works began with the start of implementation of the Ukrainian-American epidemiological project (UAEP) to study cancer and other thyroid diseases after the Chernobyl accident [5–7, 10]. Thus, for the time of UAEP project, the new methods were developed for estimation of thyroid doses and their error and shown that the dose errors affect the dose-effect relationship [7, 11–15].

Analysis of the results of the estimation of thyroid doses according to the direct measurements within UAEP [7] found a number of problems for which became apparent the need for a detailed review and revision all stages of reconstruction of the doses. This primarily refers to one of the central problems, namely, the interpretation of the results of instrumental measurements of radioiodine content, including the transition from indication of the devices to activity of radioiodine in the thyroid through a calibration factor. The complexity of this problem is due to the fact that mass measurements under emergency situation were performed by plenty of devices (much of which were geological integrated radiometers SRP-68-01) and by different dosimetric teams on the territory of several oblasts. This circumstance led to the fact that a fairly large percentage of the information upon the measurement results was not accompanied with information about calibration of the devices and the expert values of the calibration factors (CF) were poorly substantiated.

OBJECTIVE

The purpose of this work is to provide a detailed analysis, revision, estimation of reliability and accuracy of all measurements of radioiodine in the thyroid, which were made in 1986, as well as justification of numerical values of the CF to be applied in the interpretation of the measurements performed by non-calibrated devices. For some measurements, the improvement of methodology on reconstruction

реконструкції КК зумовлює суттєву зміну оцінок вмісту радіоактивності ^{131}I у ЩЗ і відповідно, доз опромінення ЩЗ, що розраховуються за цими оцінками.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Аварія на Чорнобильській АЕС зумовила викид в навколишнє середовище близько 2 ЕБк радіоїоду [16]. Масовий моніторинг забруднення навколишнього середовища і опромінення мешканців прилеглих до місця аварії територій було організовано у надзвичайно стислі терміни, що у свою чергу зумовило збільшення (порівняно з лабораторними дослідженнями) похибок результатів вимірювань внаслідок залучення персоналу без досвіду роботи в галузі дозиметрії, використання неспеціалізованих приладів різних типів та спрощених методик вимірювань.

Масове вимірювання вмісту ізотопів радіоїоду в щитоподібній залозі (далі тиреодозиметричного моніторингу) у травні-червні 1986 року було організовано і проведено спеціально підготовленими бригадами дозиметристів під загальним керівництвом Міністерства охорони здоров'я (МОЗ) УРСР. Консультативну допомогу їм надавала група фахівців з Науково-дослідного інституту гігієни морського транспорту МОЗ СРСР (НДІ ГМТ), що розробила загальну методику проведення вимірювань. Згідно з розробленою методикою, вимірювання проводилися в добре вентильованих приміщеннях із щогодинним вологим прибиранням. З метою зниження радіаційного фону детектори приладів були захищені свинцевими коліматорами. Для польових радіометрів СРП 68-01, фабрична комплектація яких не передбачала наявності коліматора, використовувались саморобні коліматори, зроблені з підручних матеріалів. Під час проведення вимірювань детектор приладу підносився до шиї вимірюваного, попередньо протертої змоченим у спирті ватним тампоном, після чого одноразовий відлік кількості імпульсів або їх інтенсивності заносився у відомість. Щогодини або щодня вимірювався фон в цій же точці простору, величина якого також заносилася у відомість. Також з метою калібрування приладу щогодини або щодня робився відлік імпульсів від пляшки-фантома (циліндрична пляшечка об'ємом 10 мл, що містила еталонний розчин ізотопу ^{131}I).

Результати вимірювань, виконані в одному і тому ж населеному пункті (НП), в один і той же день, одним і тим же приладом і однією і тією ж бригадою, заносилися в так звану вимірювальну відомість. Типова

of the CF leads to significant changes in estimates on content of radioactivity of ^{131}I in the thyroid and correspondingly to the thyroid doses which are calculated in accordance with this estimation.

MATERIALS AND METHODS

The accident at the Chornobyl nuclear power plant led to the release into the environment about 2 EBq of radioiodine [16]. Mass monitoring of the pollution of surrounding environment and the irradiation of residents living nearby the accident area was organized in a very short time, which in turn resulted in an increase (in comparison with laboratory researches) of errors in measurement results due to the involvement of personnel without experience in dosimetry using non-specialized devices of various types and simplified methods of the measurements.

Mass scale measurements of radioiodine content in the thyroid (the thyroid dosimetric monitoring) in May-June 1986 were organized and conducted by specially trained teams of dosimetrists under the supervision of the Ministry of Health Protection (MHP) of Ukrainian SSR (UkrSSR). An advisory assistance to them was provided by a team of specialists from the Research Institute of Hygiene of Maritime Transport at the Ministry of Health Protection of the USSR (RIHMT) having developed a general method of the measurements. In accordance with the developed method, the measurements were made in well ventilated rooms with hourly wet cleaning. For the purpose of reducing background of radiation, the detectors of devices were protected with lead collimators. For field radiometers SRP 68-01 with factory kitting without collimator, the homemade collimators were used made of scrap materials. During the measurement the detector device was being brought to the neck of a person measured, before having cleaned with a cotton wool wet in alcohol, then single counting the number of pulses or their intensity was written down in list. Every hour or every day the background in the same point of space was measured and its value was written down to the list. Also, in order make a calibration, the count of pulses coming from a bottle phantom (cylindrical bottle of 10 ml containing a reference solution of isotope ^{131}I) was being fulfilled either hourly or daily.

The results of measurements performed in the same settlement in the same day and by the same device and by the same team were recorded in so-called measuring list. A typical list contained the

відомість містила результати 100–200 індивідуальних вимірювань, хоча в окремих випадках кількість вимірювань, виконаних бригадою протягом дня, сягала тисячі. Відповідно до встановлених вимог, до вимірювальної відомості повинні були також заноситися: персональні дані суб'єкта (ПІБ, дата або хоча б рік народження), дані щодо дозиметричної бригади, тип вимірювального приладу, результати калібрування даного приладу (калібрувальний коефіцієнт), величина радіаційного фону в приміщенні. На жаль, не всі перелічені вище дані були внесені до відомостей. Деякі з них довелося відновлювати у процесі декількох циклів обробки даних.

За час проведення моніторингу було зроблено близько 150 тисяч вимірювань. Третина з них була виконана одноканальними спектрометрами в енергетичному вікні випромінювання радіоїоду, що значно зменшило вплив радіоактивного фону на кінцевий результат, решта – інтегральними радіометрами (табл. 1). Нині, після деяких уточнень, база даних прямих вимірювань вмісту радіоїоду в ЩЗ включає в себе близько 146 тисяч записів. В основному це жителі трьох північних, найбільш постраждалих областей України (табл. 2). При цьому мешканці Чернігівської та Житомирської областей вимірювались в основному за місцем проживання, тоді як значна кількість мешканців Київської області евакуювались в інші регіони України ще до початку вимірювань, що змусило охопити тиреодозиметричним моніторингом майже половину території України (табл. 3).

results of 100–200 individual measurements, although in some cases the number of measurements performed by the team during the day could be about thousand. In conformity with the established requirements to the measurement data there were also to be recorded: the personal data of person (name, date or even year of birth), information on dosimetric team, on type of measuring device, the results of the device's calibration (calibration factor) and the value of radiation background in the room. Unfortunately, usually not all the data mentioned above were written down in the lists. Some of them had to be recovered during several cycles of the data processing.

During the monitoring there were made about 150000 measurements. One third of the measurements were performed with one-channel spectrometers within the energy window of radioiodine irradiation, which significantly reduced the impact of radioactive background on the final result and the rest ones were done with integrated radiometers (Table 1). At the moment, after refinement of the data, the database of direct measurements of radioiodine content in the thyroid includes about 146 thousand records. Typically, these are residents of the three northern most suffered oblasts of Ukraine (Table 2). At this takes place, the residents of Chernihiv and Zhytomyr oblasts were measured mainly at place of their residence, while a significant number of residents of Kyiv oblast were evacuated to other oblasts of Ukraine before the measurements to begin. This fact led to covering by the monitoring almost a half of Ukraine (Table 3).

Таблиця 1

Особливості тиреодозиметричного моніторингу 1986 року: типи та моделі використаних приладів, кількість вимірювань, тривалість моніторингу

Table 1

The peculiarities of the thyroid dosimetric monitoring in 1986: types and models of the devices used, the number of measurements, the duration of the monitoring

Тип приладу	Модель	Кількість вимірювань	% від всіх вимірювань	Тривалість проведення вимірювань в 1986 р.
Type of devices	Model	Number of measurements	Percentage of all measurements	Duration of measurements in 1986
Одноканальні та багатоканальні спектрометри One-channel and multichannel spectrometers	НК-150, НК-350 / NC-150, NC-350	19321	13.2	14.05–11.06
	ГТРМ-01ц / GTRM-01ts	17834	12.2	17.05–30.06
	УР / UR	9745	6.7	17.05–6.06
	ДСУ-68 / DSU-68	4452	3.0	25.05–31.05
	ДСУ-2 / DSU-2	1345	0.9	18.05–29.05
	ПРЛ / PRL	7	< 0.1	8.05–12.05
Інтегральні радіометри Integrated radiometers	СРП 68-01 / SRP 68-01	93717	64.0	30.04–25.06
	ДП-5Б / DP-5B	5	< 0.1	8.05–19.05
Всі типи приладів / all devices		146426	100	30.04–30.06

Таблиця 2

Кількість вимірювань вмісту радіоїоду в ЩЗ, виконаних у 1986 році, залежно від району проживання постраждалих

Table 2

The number of measurements of the radioiodine content in the thyroid, made in 1986, depending on the oblast of residence of the suffered persons

Місцеперебування суб'єкта в день аварії, область Oblast of subjects' location at the time of the accident	Кількість вимірювань вмісту радіоїоду в ЩЗ	
	всього вимірювань total number of measurements	в т.ч. % неспектрометричних вимірювань percent of measurements performed by non-spectrometric devices
Київська / Kyiv	37504	67.3
м. Київ / Kyiv city	4923	57.2
Чернігівська / Chernihiv	48105	34.8
Житомирська / Zhytomyr	53009	90.3
Вінницька / Vinnytsya	1989	78.7
Львівська / Lviv	475	0.4
Інші області / other oblasts	421	47.7

Таблиця 3

Розподіл суб'єктів, які мешкали під час аварії у Київській, Житомирській та Чернігівській областях, областями України, в яких проводилися вимірювання вмісту радіоїоду в ЩЗ у травні-червні 1986 р.

Table 3

Distribution of the subjects who lived during the accident in Kyiv, Zhytomyr and Chernihiv oblasts, in oblasts of Ukraine where the measurements on the content of radioiodine in the thyroid were done in May-June 1986

Область перебування суб'єктів під час аварії Oblast of subjects' location at the time of the accident	Область проведення вимірювань у 1986 р. Oblasts of thyroid monitoring	Кількість вимірювань	
		всього total number of measurements	% неспектрометричних вимірювань percent of measurements performed by non-spectrometric devices
Київська область та м. Київ Kyiv oblast with Kyiv city	Київська та м. Київ / Kyiv oblast with Kyiv city	7285	27.2
	Житомирська / Zhytomyr	474	85.7
	Кримська / Crimea	11941	54.5
	Чернігівська / Chernihiv	337	40.1
	Донецька / Donetsk	1036	100.0
	Запорізька / Zaporizhzhya	40	100.0
	Одеська / Odesa	17822	91.1
	Сумська / Sumy	85	100
	Львівська / Lviv	3329	26.1
	Інші області / other oblasts	78	92.3
Житомирська область Zhytomyr oblast	Житомирська / Zhytomyr	46842	89.8
	Київська та м. Київ / Kyiv with Kyiv city	23	43.5
	Кримська / Crimea	34	50.0
	Хмельницька / Khmelnytskyi	3649	98.8
	Львівська / Lviv	449	42.3
	Одеська / Odesa	141	51.8
	Рівненська / Rivne	1645	100.0
	Інші області / other oblasts	226	96.9
Чернігівська область Chernihiv oblast	Чернігівська / Chernihiv	46292	32.6
	Одеська / Odesa	110	3.6
	Сумська / Sumy	1663	100.0
	Інші області / other oblasts	40	40.0

Калібрування вимірювальних приладів

В загальному випадку оцінка вмісту радіоізотопів йоду в ЩЗ Q за результатом прямого вимірювання визначається як:

Calibration of measuring devices

In general, the estimate of the content Q of iodine radioisotopes in the thyroid being the result of a direct measurement is defined as:

$$Q = K_b \cdot G(I_{th} - f_{sh} \cdot I_{bg}), \quad (1)$$

де K_b – коефіцієнт калібрування (КК) вимірювального приладу від пляшки-фантома, G – коригувальна поправка до КК, яка враховує відмінність геометрії вимірювань між референтним джерелом (пляшкою-фантомом) і суб'єктом вимірювань, I_{th} , I_{bg} – індикація приладу¹ відповідно при вимірюванні ШЗ та при вимірюванні гамма-фону, f_{sh} – коефіцієнт екранування гамма-фону тілом суб'єкта, що становить собою функцію, залежну від антропометричних параметрів суб'єктів та спектральних характеристик фону. Згідно з літературними даними, f_{sh} знаходиться в межах 0.9–1 [17, 18].

КК визначається шляхом вимірювання референтного джерела випромінювання з наперед відомою радіоактивністю Q . Оскільки при калібруванні $G=1$ (згідно з визначенням коригувальної поправки), для пляшкового фантому $f_{sh}=1$, тоді з (1) маємо:

$$K_b = \frac{Q_{ref}}{I_{ref} - I_{bg}}, \quad (2)$$

тобто КК чисельно дорівнює радіоактивності, яка відповідає одиниці індикації приладу і є величиною, оберненою до чутливості приладу.

Чутливість приладу в загальному випадку може змінюватись з часом з багатьох причин (наприклад, внаслідок температурної залежності параметрів приладової електроніки). Тому для мінімізації похибок результатів вимірювань бажано проводити калібрування приладів безпосередньо перед проведенням вимірювання суб'єктів. Це, у свою чергу передбачає наявність у дозиметричної групи референтного джерела випромінювання.

Широка географія проведення вимірювань (вони були проведені одночасно у 14 областях України) практично унеможливила забезпечення всіх дозиметричних бригад референтними джерелами випромінювання для калібрування приладів. Тому в першу чергу такі джерела надавались бригадам, що працювали зі спектрометрами (табл. 4). З таблиці видно, що більшість вимірювань, виконаних спектрометричними приладами, супроводжувалась їх калібруванням у день проведення вимірювань.

Разом з тим для значної частини радіометрів СРП-68-01 КК невідомий і потребує відновлення (табл. 5). На території 6 областей радіометри не калібрувались жодного разу. Ще для двох областей (Житомирська та Одеська) є звичайною ситуація, коли калібрувальні коефіцієнти вказані лише у деяких відомостях з результатами вимірювань.

where K_b is a calibration factor (CF) of measuring device from the bottle phantom; G is correcting coefficient to the CF relying on difference of the measurements geometry between reference source (the bottle phantom) and a subject of the measurements; I_{th} and I_{bg} show the device indication¹ during the thyroid gland measuring and gamma background respectively; f_{sh} is the coefficient of gamma background screening by body of the subject and is a function dependent on both subjects' anthropometric parameters and spectral characteristics of the background. According to the literature, f_{sh} is in the range 0.9–1 [17, 18].

The CF is determined by measurement of the reference radiation source with its activity Q being known in advance. Since when calibrating $G=1$ (due to definition of correction coefficient), for the bottle phantom $f_{sh}=1$, then from (1) we have:

i.e. the CF is numerically equal to radioactivity, which corresponds to the device's indication unit and is the value reversed to the sensitivity of the device.

In general, the device sensitivity can be varied by time for many reasons (for example, because of the temperature dependence of the parameters of electronics). Therefore, to minimize errors in the measurement results it is advisable to calibrate the device immediately prior to the measurements of the subjects. This in turn implies that the dosimetric team should have a reference radiation source.

Wide geography of the measurements (they were held simultaneously in 14 oblasts of Ukraine) almost made it impossible to supply all dosimetric teams with the reference radiation sources for calibration of the instruments. Thus, first of all such sources were delivered to the teams that worked with spectrometers (Table 4). The table demonstrates that most measurements made with spectrometric instruments were calibrated on the day of the measurements.

At once for a large part of the SRP-68-01 radiometers the calibration factor was unknown and required recovery (Table 5). At the six oblasts, the radiometers were not calibrated even once. For the another two oblasts (Zhytomyr and Odesa), it was common when the calibration factors were listed only in some information lists with the measurements' results.

¹ В ході моніторингу використовувались прилади з трьома типами індикації: реєстрація інтенсивності гамма-випромінювання (прилади зі стрілковими індикаторами), реєстрація проценту від активності референтного джерела випромінювання, реєстрація накоплених за певний час імпульсів.

¹ Devices with three types of indication were used during monitoring: devices with needle indicators registered intensity of pulses, devices with indicators showed percent from intensity of reference source, devices that indicated number of accumulated pulses.

Таблиця 4
Забезпеченість спектрометрів референтними джерелами випромінювання

Table 4
Provision of the spectrometers with the reference sources of radiation

Область, в якій проводились вимірювання*	Кількість використаних спектрометрів		всього	Кількість вимірювань % вимірювань у відомостях з калібруванням
	всього	в т.ч. тих, що калібрувались хоча б раз		
Oblast where measurements were performed*	N of spectrometric devices used for measuring		total	Number of measurements percent of measurements in the lists with calibration data
	total	number of devices which were calibrated at least once	total	
Вінницька / Vinnytsya	1	1	418	100.0
Житомирська / Zhytomyr	2	2	4882	100.0
Київська та м. Київ / Kyiv with Kyiv city	5	4	5339	84.9
Кримська / Crimea	7	7	5480	100.0
Львівська / Lviv	3	3	3253	100.0
Одеська / Odesa	2	2	1779	100.0
Чернігівська / Chernihiv	8	7	31463	44.8
Всього / total	28	26	52709	65.5

Примітки. * – Опущені дані по Сумській та Хмельницькій областях, в яких проводилось контрольне вимірювання незначної кількості місцевих жителів.
Notes. * – The data on Sumy and Khmelnytsky oblasts where control measurements of a small number of local residents have been performed are omitted.

Таблиця 5
Забезпеченість радіометрів СРП-68-01 референтними джерелами випромінювання

Table 5
Provision of the radiometers SRP-68-01 with the reference sources of radiation

Область, в якій проводились вимірювання*	Кількість використаних спектрометрів		всього	Кількість вимірювань % вимірювань у відомостях з калібруванням
	всього	в т.ч. тих, що калібрувались хоча б раз		
Oblast where measurements were performed*	N of spectrometric devices used for measuring		total	Number of measurements percent of measurements in the lists with calibration data
	total	number of devices which were calibrated at least once	total	
Вінницька / Vinnytsia	2	2	1626	100.0
Донецька / Donetsk	5	-	1042	-
Житомирська / Zhytomyr	11	3	42584	2.7
Запорізька / Zaporizhzhia	2	-	40	-
Київська та м. Київ / Kyiv oblast with Kyiv city	6	-	2001	-
Кримська / Crimea	8	4	6556	53.2
Львівська / Lviv	1	1	1059	100.0
Одеська / Odesa	13	12	16329	97.1
Рівненська / Rivne	1	1	1655	100.0
Сумська / Sumy	6	-	1757	-
Хмельницька / Khmelnytsk	6	-	3612	-
Чернігівська / Chernihiv	4	-	15247	-
Всього / total	64	23	93717	26.5

Таким чином, реконструкція числового значення КК потрібна для 75 % від всіх відомостей, в яких накопичена інформація про результати вимірювань, виконаних приладами СРП-68-01.

Thus, reconstruction of the numeric value of the CF is necessary for 75% of all information lists, which have information on the results of measurements made by the devices SRP-68-01.

Залежність коефіцієнта калібрування від геометрії вимірювань

У ході масового моніторингу 1986 р. калібрування приладів відбувалось за допомогою пляшкового фантому. Калібрувальні коефіцієнти K_b , отримані за допомогою пляшкових фантомів, повинні бути ско-

Dependence of the calibration factor on geometry of the measurements

During mass monitoring in 1986, the devices' calibration performed with help of a bottled phantom. The calibration factors K_b obtained through the bottle phantoms must be corrected by a factor

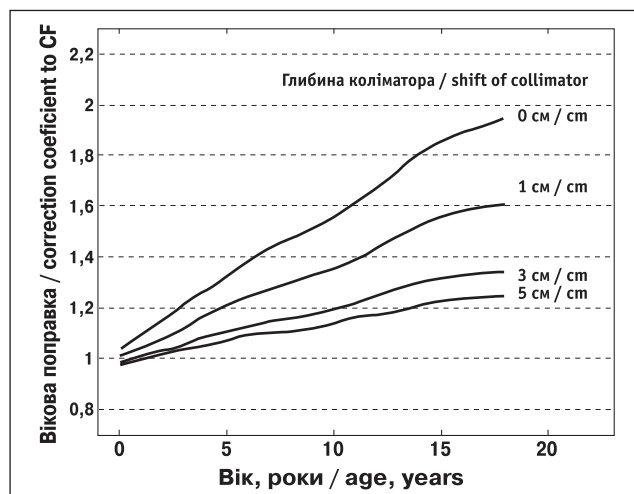


Рисунок 1. Залежність вікових коригувальних поправок G до КК від віку та глибини коліматора СРП-68-01 (усереднене для хлопчиків та дівчаток)

Figure 1. Dependence of the age correcting coefficients G to the CF on age and depth of the collimator SRP-68-01 (averaged for boys and girls)

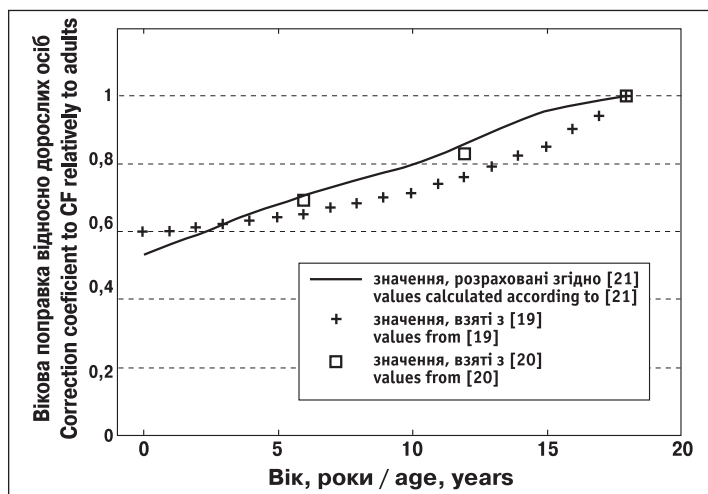


Рисунок 2. Порівняння вікових коригувальних поправок G , розрахованих згідно з аналітичною моделлю [21] у разі нульової глибини коліматора радіометра СРП-68-01, з літературними даними [19, 20]

Figure 2. Comparison of the age correcting factors from [19, 20] and those calculated in accordance with analytical model [21] in the case of zero-depth collimator for the radiometer SRP-68-01

реговані на коефіцієнт G , який враховує вплив геометрії вимірювання та фізичні характеристики ЩЗ і покривної тканини в області шиї на сигнал детектора приладу (див. формулу (1)).

Оскільки розміри ЩЗ є функцією маси, а значить функцією віку та статі – коефіцієнт G також є функцією, залежною від віку та статі. В літературі [19, 20] опубліковані лише дані щодо вік-залежності КК для радіометрів СРП-68-01 при відсутніх коліматорах¹. При розрахунку поправочних коефіцієнтів G для приладів з коліматорами довільної глибини, ЩЗ людини моделювалась двома двовісними еліпсоїдами обертання [21]. У цьому разі G становить собою відношення зареєстрованих детектором інтенсивностей випромінювання від моделі ЩЗ та моделі пляшкового фантому при умові однакового вмісту радіоїоду в них. На рис. 1 показано отримані нами вік-залежні значення G (середні для чоловічої та жіночої статі) для різних глибин коліматора, а на рис. 2 – значення G для безколіматорних СРП-68-01, отримані у роботі [20] шляхом математичного моделювання фантомів Ок-Ріджської лабораторії (США) методом Монте-Карло, а також узагальнені літературні дані для безколіматорних СРП-68-01, наведені у [19]. З рис. 2 видно, що отримані нами модельні значення вікової поправки G у разі відсутності коліматора на приладі СРП-68-01 близькі до опублікованих у роботах [19, 20].

G that accounts for the influence of geometry of the measurements, physical characteristics of the thyroid and coating tissue in the neck area to a signal of the device's detector (Eq. (1)).

Since the size of thyroid is a function of mass, and therefore a function of age and gender, the coefficient G is also a function dependent on age and sex. In references [19, 20] there are published only data on the age-dependence of the CF for radiometers SRP-68-01 with absent collimators¹. For calculation of the correction coefficients for devices with collimators of any depth, the human thyroid was simulated by two double-axis ellipsoids of revolution [21]. In this case the G is the ratio of intensities registered by a detector of radiation coming from a model of thyroid and a model of bottled phantom on condition that they have the same content of radioiodine in them. Figure 1 shows the age-dependent values of G found by us (average for a male and female) for various depths of the collimator. Figure 2 demonstrates the values of G obtained for SRP-68-01 gained in [20] by mathematical simulation of the thyroid phantoms of Oak Ridge Laboratory (USA) with help of Monte Carlo method and compiled data for non-collimator SRP-68-01 presented in [19, 20]. Fig. 2 shows the model values of G we received for SRP-68-01 with absent collimator are close to published in [19, 20].

¹ Коліматором зазвичай служив тонкий лист свинцю, обгорнутий навколо детектора приладу. Коліматор міг виступати за торець детектора на декілька сантиметрів. Довжина цього виступу називається глибиною коліматора.

¹ Usually a thin sheet of lead wrapped around the detector unit served as collimator. Collimator could shift to a few centimeters relatively to the end face of detector. The value of this shift is called "collimator depth" or "collimator shift".

Реконструкція калібрувальних коефіцієнтів для радіометрів СРП-68-01

Нами було проведено калібрування 2 радіометрів СРП-68-01 з повним повторенням схеми калібрування 1986 року. В якості джерела випромінювання використовувалась пляшка-фантом об'ємом 10 мл, наповнена водним розчином ¹³¹I. Знайдені числові значення КК виявилися однаковими для обох використаних приладів; у випадку відсутності коліматора (або якщо він не виступав за торець детекторного блоку, тобто при нульовій глибині коліматора) числове значення КК дорівнювало 90 Бк·год/мкР.

На рис. 3 наведено значення КК, отримане нами у фантомних експериментах та скоректоване на величину геометричної поправки *G* (див. рис. 1). Для порівняння наведені також емпіричні значення КК для трьох вікових груп, отримані у роботі [22] на добровольцях з використанням безколіматорного СРП-68-01. З рисунка видно, що знайдені нами значення КК в середньому співпадають зі значеннями, отриманими у роботі [22]. Таким чином, у випадку відсутності калібрування радіометрів СРП-68-01 в якості величини КК нами використовувалося значення $K_b = 90$ Бк·год/мкР, скореговане на вік-залежну поправку *G*.

Reconstruction of the calibration factors for the radiometers SRP-68-01

We calibrated two radiometers SRP-68-01 with a full repetition of the calibration steps as in 1986. As the radiation source there was used phantom bottle of 10 ml filled with an aqueous solution of ¹³¹I. The found numerical values of the CF occurred to be the same for both devices used. The numerical value of the CF was equal 90 Bq·h/μR when the collimator was absent (or if it did not protrude further the end face of detection unit, i.e. at zero depth of the collimator).

Figure 3 demonstrates the CF value received by us in phantom experiments and corrected by the value of geometric factor *G* (see Fig. 1). For comparison, there are also presented empirical values of the CF for three age groups obtained in [22] on volunteers using the SRP-68-01 with absent collimator. The figure shows that the average values of the CF found by us coincide with the values obtained in [22]. Thus, in the absence of calibration procedure for the radiometers SRP-68-01 as a value of the CF, we used the value $K_b = 90$ Bq·h/μR adjusted for the age-dependent correction factor *G*.

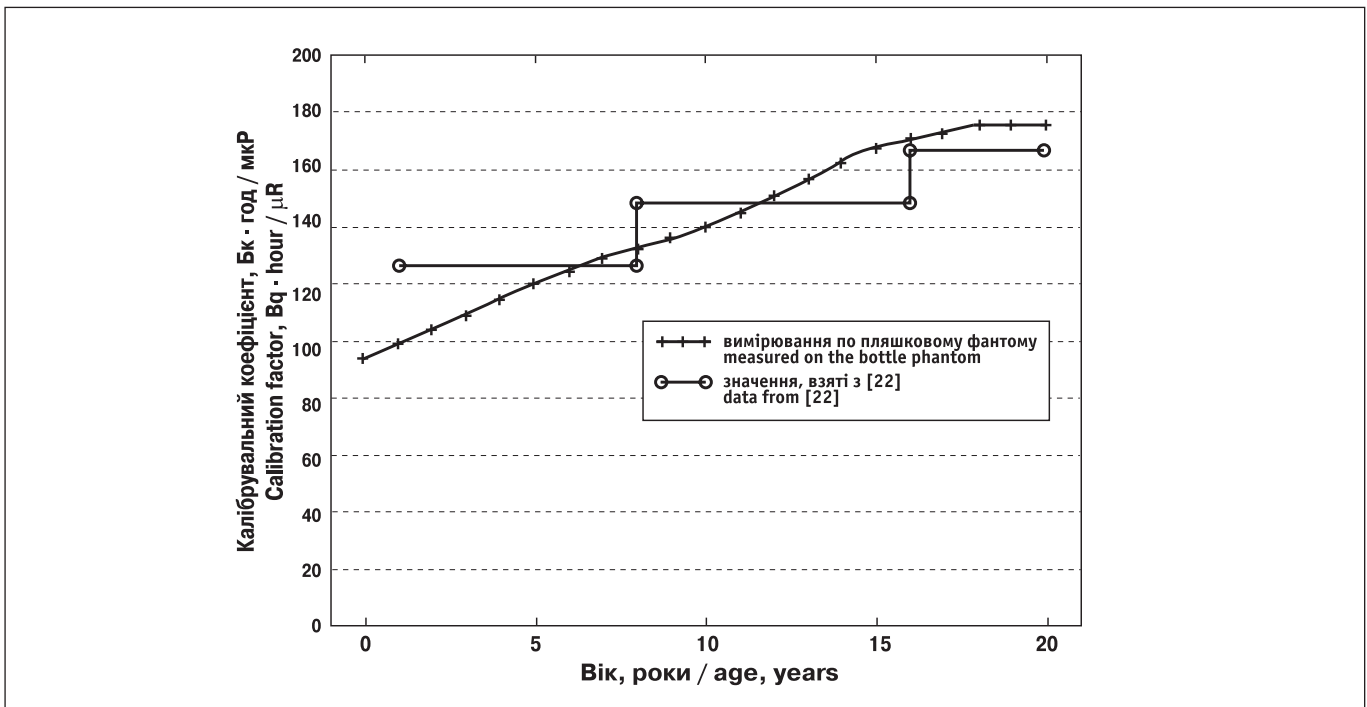


Рисунок 3. Порівняння експериментальних вік-залежних коефіцієнтів калібрування *K* (див. формулу (5)) для радіометрів СРП-68-01, отриманих на добровольцях [22] та за допомогою пляшкового фантома з урахуванням вікової поправки *G*

Figure 3. Comparison between the experimental age-dependent calibration factors *K* (see Formula (5)) for the radiometers SRP-68-01 obtained on volunteers [22] and gained by using bottled phantom taking into account the age correcting coefficient *G*

КК для спектрометричних приладів

Відсутність даних, необхідних для розрахунку КК для спектрометрів, є проблемою лише двох областей – Чернігівської (55 % всіх вимірювань у відомостях без даних калібрування), і меншою мірою – Київської (15 % вимірювань), (див. табл. 4). Для них КК були експертно визначені фахівцями НДІ ГМТ відразу після завершення моніторингу.

Модель прямих вимірювань вмісту радіоїоду в ЩЗ

Відомо [23], що при фіксованій інтенсивності випромінювання радіоактивного джерела n ймовірність зареєструвати k відліків на вимірювальному приладі (наприклад на лічильнику Гейгера-Мюлера) за час t визначається законом Пуассона з параметром nt :

$$p_n(k) = \frac{(nt)^k}{k!} e^{-nt}, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

Виходячи з (1) та з описаних вище методів вимірювання радіоактивності ^{131}I в ЩЗ, одержимо:

$$Q = K \left(\frac{k_{th}}{t_{th}} - f_{sh} \frac{k_{bg}}{t_{bg}} \right) \quad (4)$$

де Q – радіоактивність ^{131}I в щитоподібній залозі, k_{th} – кількість імпульсів, зареєстрованих приладом при вимірюванні радіоактивності ^{131}I в ЩЗ за час вимірювання t_{th} , k_{bg} – кількість імпульсів, зареєстрованих приладом при вимірюванні радіоактивного фону за час вимірювання t_{bg} , f_{sh} – коефіцієнт екранування фонового випромінювання, K – вік-залежний коефіцієнт калібрування (КК приладу від пляшкового фантому K_b , скоректований на геометричну вікову поправку G):

$$K = K_b \cdot G. \quad (5)$$

Оскільки при достатньо великих n пуасонівський розподіл (3) близький до нормального [24], то можна записати:

$$n_{th}^{mes} \sim N(n_{th}^{tr}, \sigma_{th}^2), \quad n_{bg}^{mes} \sim N(n_{bg}^{tr}, \sigma_{bg}^2), \quad (6)$$

де $N(0,1)$ – нормально розподілена величина з нульовим математичним сподіванням та одиничною дисперсією, $n_{th}^{mes} = \frac{k_{th}}{t_{th}}$, $n_{bg}^{mes} = \frac{k_{bg}}{t_{bg}}$ – інтенсивності радіоактивного джерела зареєстровані приладом під час вимірювання ЩЗ та фону відповідно, а $\sigma_{th}^2 = \frac{n_{th}^{tr}}{t_{th}}$, $\sigma_{bg}^2 = \frac{n_{bg}^{tr}}{t_{bg}}$ – дисперсії похибок цих вимірювань. Індекс “ tr ” означає справжнє значення величини, в той час як “ mes ” – її виміряне значення.

The CF for spectrometric devices

The lack of data needed for calculation of the CF for spectrometers is a problem only for two oblasts i.e. Chernihiv one (55% of all measurements in the lists without calibration data) and to a lesser extent Kyiv one (15% of the measurements), see Table 4. The CF for them was established expertly by specialists of the RIGMT immediately after the monitoring finished.

Model of direct measurements of the content of radioiodine in the thyroid

It is known [23] that at the fixed intensity of emission for a radioactive source n the probability to register k counts using a measuring device (such as the Geiger-Muller counter) for the time t is defined by Poisson's Law with parameter nt :

Based on (1) and the described above methods on the radioactivity measurement ^{131}I in thyroid, we obtain:

where Q is the radioactivity of ^{131}I in thyroid, k_{th} is the number of pulses registered by the device when measuring the radioactivity of ^{131}I in thyroid during the time t_{th} of measurement, k_{bg} is the number of pulses registered by the device when measuring radioactivity background during the time t_{bg} of measurement, f_{sh} is screening coefficient for the background radiation, K is the age-dependent calibration factor (the CF of device from the bottle phantom K_b adjusted with the age-dependent geometric correcting factor G):

Since for sufficiently large n , the Poisson distribution (3) is close to normal one [24] we can write down:

where $N(0,1)$ is normally distributed value with zero expectation and unit variance; $n_{th}^{mes} = \frac{k_{th}}{t_{th}}$, $n_{bg}^{mes} = \frac{k_{bg}}{t_{bg}}$ are intensities of a radioactive source registered during the measurement of thyroid and background respectively, and $\sigma_{th}^2 = \frac{n_{th}^{tr}}{t_{th}}$, $\sigma_{bg}^2 = \frac{n_{bg}^{tr}}{t_{bg}}$ are the variances of the measurements' errors. Index “ tr ” means the true value while “ mes ” does its measured value.

Окрім власне статистичної похибки реєстрації, величини n_{th}^{mes} та n_{bg}^{mes} містять ще й додаткову інструментальну похибку, дисперсію якої будемо позначати σ_{dev}^2 . Тоді можна оцінити повні дисперсії похибок вимірювання ЩЗ та фону:

$$\hat{\sigma}_{th}^2 = \frac{n_{th}^{mes}}{t_{th}} + \sigma_{dev}^2, \quad \hat{\sigma}_{bg}^2 = \frac{n_{bg}^{mes}}{t_{bg}} + \sigma_{dev}^2 \quad (7)$$

Виходячи з методу калібрування вимірювального приладу, можна записати приблизне співвідношення:

$$K^{mes} \approx K^{tr} (1 + \delta_K \gamma_1), \quad \gamma_1 \sim N(0,1), \quad (8)$$

де δ_K оцінюється, виходячи з похибки еталонного джерела ^{131}I та похибки приладу.

Вираз (4) з використанням (6) – (8) переписується так:

$$Q^{mes} \approx K^{tr} (1 + \delta_K \gamma_1) (n_{th}^{tr} - f_{sh} n_{bg}^{tr} + \sigma_n \gamma_2), \quad (9)$$

де $\sigma_n = \sqrt{\hat{\sigma}_{th}^2 + f_{sh}^2 \hat{\sigma}_{bg}^2}$, а $\gamma_2 \sim N(0,1)$.

З (9) маємо:

$$Q^{mes} \approx K^{tr} (n_{th}^{tr} - f_{sh} n_{bg}^{tr} + (n_{th}^{tr} - f_{sh} n_{bg}^{tr}) \delta_K \gamma_1 + \sigma_n \gamma_2 + \delta_K \sigma_n \gamma_1 \gamma_2). \quad (10)$$

Оскільки

$$Q^{tr} = K^{tr} (n_{th}^{tr} - f_{sh} n_{bg}^{tr}), \quad (11)$$

то підставляючи (11) в (10) одержимо:

$$Q^{mes} \approx Q^{tr} + K^{tr} (\sigma_n \gamma_2 + (n_{th}^{tr} - f_{sh} n_{bg}^{tr}) \delta_K \gamma_1 + \delta_K \sigma_n \gamma_1 \gamma_2) \approx Q^{tr} + \sigma_Q^{tr} \gamma, \quad (12)$$

де

$$\sigma_Q^{tr} = K^{tr} \sqrt{(\sigma_n^2 + \sigma_n^2 \delta_K^2 + (n_{th}^{tr} - f_{sh} n_{bg}^{tr})^2 \delta_K^2)}$$

Оскільки n_{th}^{tr} и n_{bg}^{tr} невідомі, то за оцінку σ_Q^{tr} візьмемо:

$$\sigma_Q^{mes} = K^{mes} \sqrt{(\sigma_n^2 + \sigma_n^2 \delta_K^2 + (n_{th}^{mes} - f_{sh} n_{bg}^{mes})^2 \delta_K^2)}. \quad (13)$$

Остаточно одержимо модель спостереження радіоактивності ЩЗ з класичною адитивною похибкою:

$$Q^{mes} = Q^{tr} + \sigma_Q^{mes} \gamma, \quad \gamma \sim N(0,1). \quad (14)$$

Похибки калібрування приладів

Похибка δ_K вік-залежного коефіцієнта калібрування K , визначеного в (5), може бути знайдена як:

$$\delta_K = \sqrt{\delta_b^2 + \delta_G^2}, \quad (15)$$

де δ_b – відносна похибка калібрування приладу від пляшки-фантома, а δ_G – відносна похибка вікової поправки G .

Для радіометрів СРП-68-01 величина відносної похибки геометричної поправки δ_G базується на

In addition to the statistical error of registration the values n_{th}^{mes} and n_{bg}^{mes} contain one more instrumental error with variance to be denoted σ_{dev}^2 . Then one can estimate the full variances of the measurement errors for both thyroid and background:

Based on the method of calibrating the measuring device, one can add the approximate value:

where δ_K is based on the error of reference source ^{131}I and the device's error.

Expression (4) with using (6) – (8) can be rewritten as:

where $\sigma_n = \sqrt{\hat{\sigma}_{th}^2 + f_{sh}^2 \hat{\sigma}_{bg}^2}$, and $\gamma_2 \sim N(0,1)$.

From (9), we get:

Since

then substituting (11) in (10), it is:

where

Inasmuch as n_{th}^{tr} and n_{bg}^{tr} are unknown, the estimate of σ_Q^{tr} will be the following:

Finally, we get the observation model of thyroid radioactivity in accordance with the classical additive error:

Errors of the devices calibration

The error δ_K of the age-dependent calibration factor K specified in (5) can be found as:

where δ_b is relative error of the device's calibration using bottle phantom and δ_G is relative error of age correcting factor G .

For the radiometers SRP-68-01, the value of the relative error δ_G for geometric correction is based

емпіричних даних, отриманих в [22] і складає 15%. Оскільки в спектрометрах сцинтиляційні кристали детекторів знаходяться на суттєво більшій відстані від ЩЗ, вплив геометрії вимірювань для них менший. Тому для спектрометрів δ_G була експертно оцінена в 5%.

Калібрування приладу від пляшки-фантома полягає у визначенні його чутливості, тобто визначенні величини $n_{ref}^{mes} - n_{bg}^{mes}$, зумовленої радіоактивністю Q_{ref} еталонного джерела випромінювання. Тому δ_b визначається за формулою:

$$\delta_b = \sqrt{\delta_{ref}^2 + \left(\frac{\sigma_s}{n_{ref} - n_{bg}} \right)^2}, \quad (16)$$

де δ_{ref} – відносна похибка радіоактивності еталонного джерела, відома з технічної документації поставальника (виробниче об'єднання “Ізотоп”), а σ_s – похибка при вимірюванні інтенсивності еталонного джерела.

Оскільки процес калібрування приладу від пляшки-фантома є аналогією вимірювання вмісту радіоактивності у ЩЗ, то похибка σ_s визначається аналогічно:

$$\sigma_s = \sqrt{\hat{\sigma}_{ref}^2 + \hat{\sigma}_{bg}^2} \quad (17)$$

де $\hat{\sigma}_{ref}^2 = \frac{n_{ref}^{mes}}{t_{ref}} + \sigma_{dev}^2$ – оцінка дисперсії похибки вимірювання інтенсивності еталонного джерела за час t_{ref} .

Для приладів з відсутньою інформацією щодо калібрування δ_b була експертно оцінена в 0,2 (20 %).

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Розподіл оцінок активностей радіоїоду в ЩЗ, розрахованих відповідно до вищенаведеної методики, має чітко виражений логнормальний характер (рис. 4) з середнім геометричним (GM) рівним 4,8 кБк та геометричним стандартним відхиленням (GSD) 3,8. Розкид активностей виявився значним: 90 % всіх значень радіоактивності ЩЗ лежить в інтервалі 0,58–47 кБк.

Окремо потрібно сказати про відхилення розподілу від логнормального виду в області малих значень вмісту радіоїоду. Це відхилення (в лівій частині рис. 4) пов'язане з тим, що результати недостовірних вимірювань цензурувалися. Вимірювання вважалося недостовірним, якщо ймовірність того, що “чиста” індикація приладу (різниця індикації приладу від щитоподібної залози та від фону) дорівнює нулеві, не перевищує 25%. Це еквівалентно умові що $(n_{th} - f_{sh} \cdot n_{bg}) \geq 0,68 \sigma_n$. Іншими словами, мінімальна детектована активність

on empirical data obtained in [22] and is estimated as 15%. Since scintillation crystals in detectors of spectrometers are located significantly farther from the thyroid therefore the influence of measurement geometry is less. So, for spectrometers, δ_G was expertly estimated to be equal 5%.

The device's calibration by a bottle phantom is to determine its sensitivity, i.e. to find out the values $n_{ref}^{mes} - n_{bg}^{mes}$ caused by radioactivity Q_{ref} of a reference radiation source. Therefore, δ_b is specified by the following formula:

where δ_{ref} is relative error of activity for the reference radioactive source which is known from the technical documentation of provider (Production Association “Isotope”) and σ_s is error in measuring the intensity of the reference source.

Since the process of calibration by a bottle phantom is similar to measurements of radioactivity in the thyroid then the error σ_s is calculated similarly

where $\hat{\sigma}_{ref}^2 = \frac{n_{ref}^{mes}}{t_{ref}} + \sigma_{dev}^2$ is estimation of error variance for measuring the intensity of the reference source during time t_{ref} .

For devices with missing information on the calibration, δ_b was expertly estimated to be equal 0.2 (20%).

RESULTS AND DISCUSSION

The distribution of activities of radioiodine in thyroid calculated according to the aforementioned methodology has clearly expressed logarithmically normal nature (Fig. 4) with a geometric mean (GM) equal to 4.8 kBq and geometric standard deviation (GSD) equal to 3.8. The spread of the activities occurred to be significant, namely, 90% of all values of thyroid radioactivity are in the range 0.58–47 kBq.

It should be emphasized separately that there is a deviation of distribution from the lognormal one in the region of small values of radioiodine content. This deviation (the left side of Fig. 4) is due to the censoring of the results of unreliable measurements. The measurements were considered unreliable if the probability of a “pure” indication of the device (difference between the device's indication of thyroid and background) was equal to zero, was $\leq 25\%$. This is equivalent to that condition that $(n_{th} - f_{sh} \cdot n_{bg}) \geq 0.68 \sigma_n$. In other words, the minimum detected activity (MDA)

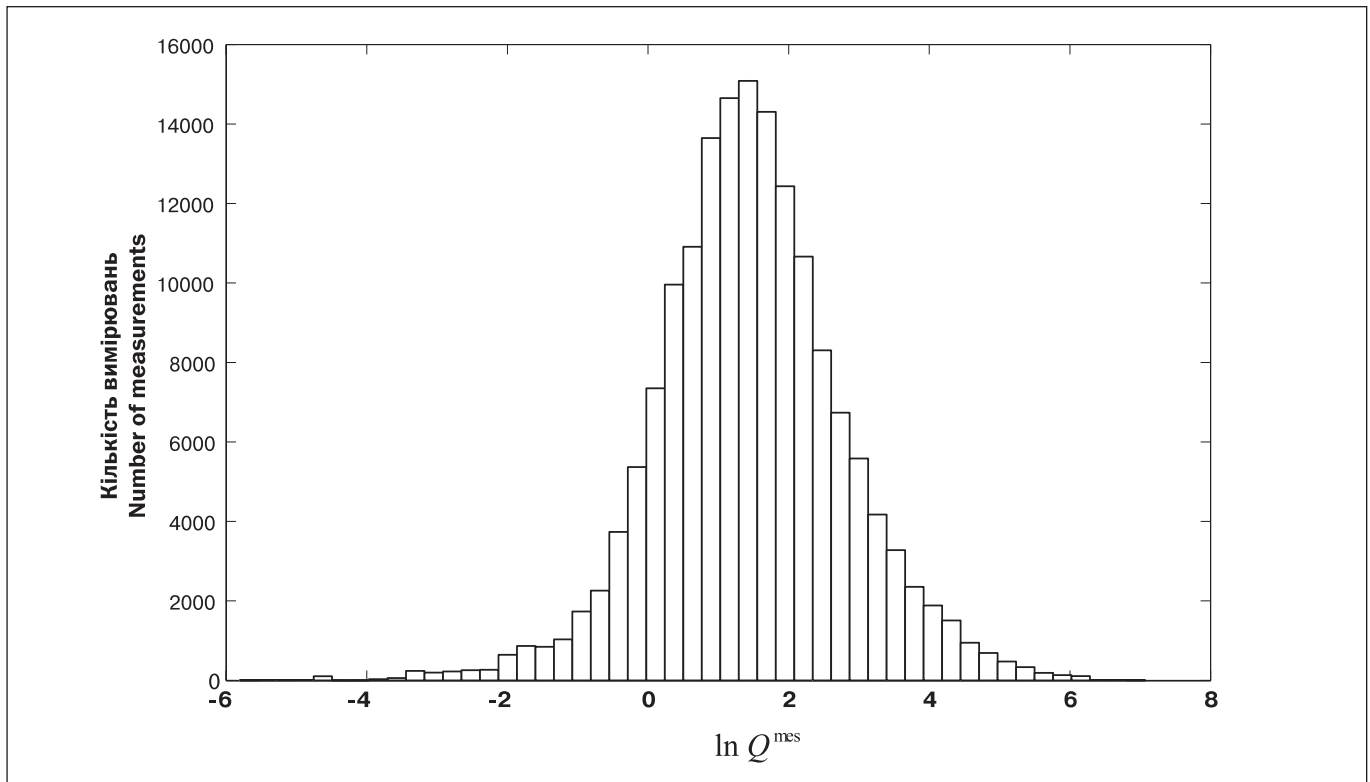


Рисунок 4. Щільність розподілу оцінок вмісту радіоїоду в ЩЗ у полі логарифмів

Figure 4. Density of distributions of the estimates on content of radio iodine in the thyroid in the field of logarithms

(МДА) радіоїоду в ЩЗ приймалась на рівні $0,68 \sigma_n$. У тому разі, якщо результат вимірювань був меншим ніж МДА, він замінювався половиною МДА. Тобто за умови $(n_{th} - f_{sh} \cdot n_{bg}) < 0,68 \sigma_n$, приймалось, що $n_{th} - f_{sh} \cdot n_{bg} = 0,34 \sigma_n$.

В таблиці 6 наведені параметри розподілів оцінок вмісту радіоїоду в ЩЗ у мешканців різних областей України. Не дивно, що високі оцінки вмісту радіоїоду характерні для мешканців Київської та Житомирської областей, більш низькі – для мешканців віддаленої від місця аварії Львівської області. Відносно невисокі значення вмісту радіоїоду у ЩЗ жителів Києва можна пояснити тим, що для них молочний шлях надходження радіоїоду в організм був обмежений контрзаходами [4, 5]. При цьому для всіх областей характерний великий розкид оцінок (великі значення GSD та STD).

Розподіл відносних похибок вимірювань радіоактивності ЩЗ представлений на рис. 5, а його характеристики – середнє, медіана та 5 % і 95 % квантилі, наведені у табл. 7. Для всього масиву даних середня відносна похибка становить 0,33, що суттєво більше, ніж формальні приладові величини похибок, наведені в технічній документації вимірювальних приладів. Основний масив значень (90 %) відносних по-

of radioiodine in thyroid accepted at level $0.68 \sigma_n$. In that case, if the result of measurement was less than the MDA, it is replaced by a half of the MDA. With the proviso that $(n_{th} - f_{sh} \cdot n_{bg}) < 0.68 \sigma_n$, it was accepted $n_{th} - f_{sh} \cdot n_{bg} = 0.34 \sigma_n$.

Table 6 shows the distributions' parameters of estimates on content of radioiodine in thyroid amongst the residents of different oblasts of Ukraine. No wonder that the high estimates of content of radioiodine are specific for the residents of Kyiv and Zhytomyr oblasts, and they are lower for Lviv oblast being remote from the accident place. The relatively low values of radioiodine content in thyroid for Kyiv residents can be explained by the fact that the "milk" way of radioiodine incorporation was restricted by countermeasures [4, 5]. As this takes place, there is the large deviation of estimates (high values of both GSD and STD) being typical for all oblasts.

The distribution of relative errors of measurements of thyroid radioactivity is depicted in Fig. 5 and its characteristics such as the mean, median, and 5% and 90% percentiles are presented in Table 7. For all dataset the mean relative error is 0.33 which is substantially higher than the values of the formal instrument errors given in the technical documentation of the measuring devices. The majority of values (90%)

Таблиця 6

Характеристики обласних розподілів вмісту радіоіоду в ЩЗ: AM – середнє арифметичне, STD – стандартне відхилення, GM – середнє геометричне, GSD – геометричне стандартне відхилення

Table 6

Characteristics of regional distributions on the content of radio iodine in the thyroid: AM is arithmetic mean, STD is standard deviation, GM is geometric mean and GSD is geometric standard deviation

Місцезнаходження суб'єктів під час аварії Oblast of subjects location at the time of the accident	Характеристики розподілу / characteristics of distributions					
	AM кБк / kBq	STD кБк / kBq	GM кБк / kBq	GSD кБк / kBq	медіана median кБк / kBq	90% довірчий інтервал 5 th –95 th percentiles
Київська обл. / Kyiv	11	24	5,4	3,2	5,0	0,97–40
м, Київ / Kyiv city	2,3	4,2	1,5	2,3	1,4	0,52–6,4
Житомирська обл. / Zhytomyr	18	38	6,7	4,1	6,3	0,74–71
Чернігівська обл. / Chernihiv	8,5	23	3,5	3,6	3,5	0,45–30
Вінницька обл. / Vinnytsya	7,4	10	2,8	4,8	3,7	0,21–31
Львівська обл. / Lviv	0,3	0,3	0,2	2,4	0,2	0,06–0,84
Всі області / all locations	12	29	4,8	3,8	4,6	0,58–47

Таблиця 7

Характеристики розподілу відносних похибок вимірювань радіоактивності ЩЗ залежно від типу приладу

Table 7

Characteristics of the distribution of relative errors for the thyroid radioactivity in dependence on the type of device

Типи вимірювань радіоактивності ЩЗ Measurements by device's types	% від кількості вимірювань Percent from all measurements	Відносна похибка / relative error		
		AM	медіана median	90 % довірчий інтервал 5 th –95 th percentiles
Всі вимірювання All measurements	100%	0,33	0,26	0,10–0,61
Вимірювання, зроблені спектрометрами Measurements performed by spectrometric devices	36%	0,27	0,22	0,09–0,54
Вимірювання, зроблені радіометрами Measurements performed by radiometers	64%	0,37	0,29	0,20–0,66

хибок прямих вимірювань радіоактивності ЩЗ, розрахованих згідно (13) та (15)–(17), знаходиться в межах 0,1–0,6 (рис. 5).

Складний характер розподілу, показаного на рис. 5, пояснюється суміщенням в одному масиві вимірювань, виконаних різними типами приладів (спектрометрами та інтегральними радіометрами). Радіометри є менш точними приладами; відносна похибка для них починається з величин 0,2, тоді як спектрометри демонструють значну кількість вимірювань з меншою похибкою. Для вимірювань, виконаних обома типами приладів, характерна значна права асиметричність розподілів відносних похибок. Аналіз показує, що основним компонентом відносних похибок з величинами понад 0,5 є σ_n – похибка “чистої” індикації приладу (похибка різниці індикації приладу від щитоподібної залози та від фону), яка досягає суттєвих

of the relative errors of the direct measurements of thyroid radioactivity being calculated according to (13) and (15)–(17) are in the range 0.1–0.6 (Fig. 5).

The complex nature of distribution shown in Fig. 5 is explained by the combination inside a single array of measurements made by different types of instruments (spectrometers and integrated radiometers). Radiometers are the less accurate devices with relative error for them begins with magnitudes of 0.2, while spectrometers show a significant number of measurements with less error. For measurements made with both types of the devices there is an important characteristic expressed by significant right asymmetry of the distributions of relative errors. The analysis demonstrates that the main component of the relative errors with values above 0.5 is the σ_n being the error of “pure” indication of device (the error of difference between the device's

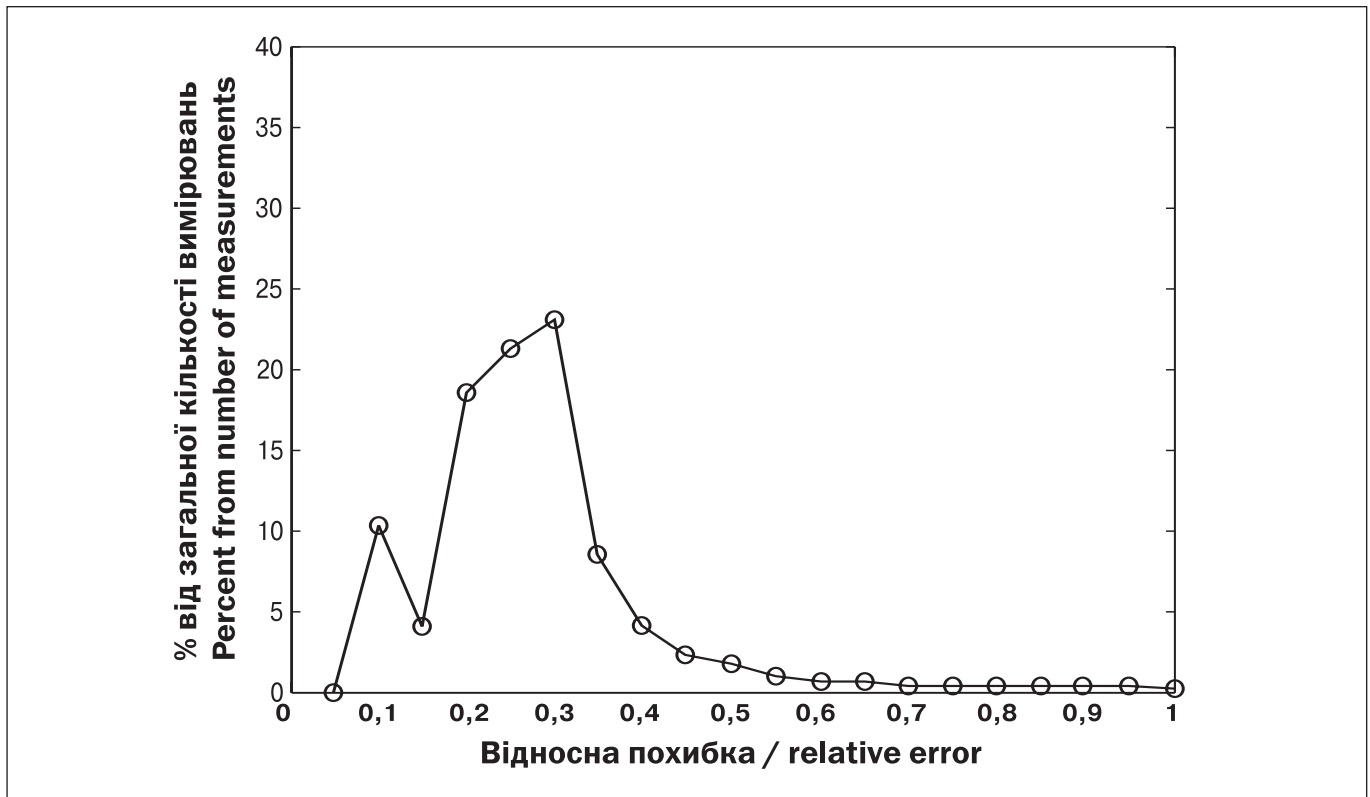


Рисунок 5. Розподіл відносних похибок вимірювань вмісту радіоїоду у ЩЗ

Figure 5. Distribution of the relative measurement errors on the content of radio iodine in the thyroid

величин відносно до “чистої” індикації приладу у разі, якщо сама індикація є близькою до фону. Потрібно зауважити, що незначна “чиста” індикація приладу свідчить про низький вміст радіоактивності ^{131}I у щитоподібній залозі і, відповідно, про незначну дозу опромінення щитоподібної залози. Отже, значні відносні похибки відповідають незначним абсолютним значенням радіоактивності ^{131}I у ЩЗ і, відповідно, незначним дозовим навантаженням на ЩЗ. Похибки вимірювань ЩЗ для суб’єктів, що отримали значні дозові навантаження, містяться у лівій частині розподілу, показаного на рис. 5.

ВИСНОВКИ

Таким чином, можна сформулювати такі узагальнюючі висновки:

1. Виконаний аналіз дозволяє більш коректно порівняно з [5–7] оцінити кінцеві результати масового інструментального моніторингу вмісту радіоїоду в ЩЗ мешканців України, а саме: дози опромінення ЩЗ та їх похибки.
2. Можна очікувати, що при використанні нових оцінок радіоактивності ЩЗ (а значить і нових оцінок дозових навантажень на ЩЗ) тією чи іншою мірою зміняться й оцінки ризиків радіоіндукованих раків ЩЗ;

indication of the thyroid and the background) that reaches significant values in relation to the “pure” indication of devices if the indication is close to the background. It should be noted that a small “pure” indication of device testifies about a negligible content of ^{131}I radioactivity in the thyroid and, respectively, about a small dose of thyroid exposure. Thus, the large relative errors correspond to low absolute values of ^{131}I radioactivity in the thyroid and consequently low exposure doses to the thyroid. The errors of thyroid measurements for subjects who received significant doses are at the left side of the distribution shown in Fig. 5.

CONCLUSIONS

Summarizing the following general conclusions can be formulated:

1. The analysis performed allows make a more correct, in comparison with [5–7], estimates of the outcomes of mass instrumental monitoring on the content of radioiodine in the thyroid for residents of Ukraine, namely, the thyroid doses and their errors.
2. It may be expected that when new estimates of the thyroid radioactivity are used (and hence new estimates of doses to the thyroid) then the risks estimations of radiation-induced thyroid cancers

при цьому оцінки ризиків стануть більш надійними за рахунок використання методів оцінювання, що враховують наявність похибок в дозах опромінення ЩЗ [12–15].

3. Варто підкреслити, що вперше проведено дослідження, в результаті якого була розроблена методика та виконані розрахунки похибок вимірювань радіоїоду в ЩЗ у рамках тиреодозиметричного моніторингу 1986 року.

Дане дослідження виконане в рамках бюджетної теми “Реконструкція доз опромінення щитоподібної залози для жителів усіх населених пунктів України з урахуванням різних джерел невизначеності”, яка фінансується Національною академією медичних наук України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Reliability and accuracy of the ^{131}I thyroid activity measurements performed in the Ukraine after the Chernobyl accident in 1986 / I. A. Likhtarev, G. Prohl, K. Henrichs [et al.]. – Munich : GSF-Bericht 19/93, Institut fur Strahlenschutz, 1993. – 40 p.
2. Ukrainian thyroid doses after the Chernobyl accident / I.A. Likhtarev N.K. Shandala, G.M. Gulko [et al.] // Health Phys. – 1993. – Vol. 64, No. 6. – P. 594–599.
3. Evaluation of the ^{131}I thyroid-monitoring measurements performed in Ukraine during May and June of 1986 / I. A. Likhtarev, G. M. Gulko, B. G. Sobolev [et al.] // Health Phys. – 1995. – Vol. 69, No. 1. – P. 6–15.
4. Post-Chernobyl thyroid cancers in Ukraine. Report 1: Estimation of thyroid doses / I. Likhtarev, A. Bouville, L. Kovgan [et al.] // Radiat. Res. – 2005. – Vol. 163, No. 2. – P. 125–136.
5. Questionnaire- and measurement-based individual thyroid doses in Ukraine resulting from the Chernobyl nuclear reactor accident / I. Likhtarev, A. Bouville, L. Kovgan [et al.] // Radiat. Res. – 2006. – Vol. 166, No. 1, Pt 1. – P. 271–286.
6. Reconstruction of individual thyroid doses to the Ukrainian subjects enrolled in the Chernobyl Tissue Bank / I. Likhtarev, G. Thomas, L. Kovgan [et al.] // Radiat. Prot. Dosimetry. – 2013. – Vol. 156, No. 4. – P. 407–423.
7. Thyroid cancer study among Ukrainian children exposed to radiation after the Chernobyl accident: improved estimates of the thyroid doses to the cohort members / I. Likhtarov, L. Kovgan, S. Masiuk [et al.] // Health Phys. – 2014. – Vol. 106, No. 4. – P. 370–396.
8. Thyroid cancer in Ukraine / I. A. Likhtarev, B. G. Sobolev, I. A. Kairo [et al.] // Nature. – 1995. – Vol. 375(6530). – P. 365–378.
9. Post-Chernobyl thyroid cancers in Ukraine. Report 2: Risk analysis / I. Likhtarev L. Kovgan, S. Vavilov [et al.] // Radiat. Res. – 2006. – Vol. 166, No. 2. – P. 375–386.
10. A cohort study of thyroid cancer and other thyroid diseases after the Chernobyl accident: thyroid cancer in Ukraine detected during first screening / M. D. Tronko, G. R. Howe, T. I. Bogdanova [et al.] // J Natl Cancer Inst. – 2006. – Vol. 98(13). – P. 897–903.

will be more or less change; the risk estimations will become more reliable through the use of estimation methods that take into account the presence of errors in thyroid doses [12–15].

3. It is worth to emphasize that we pioneered the studies in which there were developed methodology and performed calculations of the measurement errors of radioiodine in the thyroid in the frames of thyroid monitoring in 1986.

This research work is a part of the study “Reconstruction of thyroid doses for the residents of all settlements of Ukraine taking into account the uncertainty of various sources” which is funded by the National Academy of Medical Sciences of Ukraine.

REFERENCES

1. Likhtarev IA, Gulko GM, Kairo IA, Sobolev BG, Chepurnoy NI, Cheban AK, et al. Reliability and accuracy of the ^{131}I thyroid activity measurements performed in the Ukraine after the Chernobyl accident in 1986. Munich: GSF-Bericht 19/93, Institut fur Strahlenschutz; 1993. 40 p.
2. Likhtarev IA, Shandala NK, Gulko GM, Kairo IA, Chepurny NI. Ukrainian thyroid doses after the Chernobyl accident. Health Phys. 1993;64(6):594-9.
3. Likhtarev IA, Gulko GM, Sobolev BG, Kairo IA, Prohl G, Roth P, et al. Evaluation of the ^{131}I thyroid-monitoring measurements performed in Ukraine during May and June of 1986. Health Phys. 1995;69(1):6-15.
4. Likhtarov I, Kovgan L, Vavilov S, Chepurny M, Bouville A, Luckyanov N, et al. Post-Chernobyl thyroid cancers in Ukraine. Part 1. Estimation of thyroid doses. Radiat Res. 2005;163(2):125-36.
5. Likhtarev I, Bouville A, Kovgan L, Luckyanov N, Voilleque P, Chepurny M. Questionnaire- and measurement-based individual thyroid doses in Ukraine resulting from the Chernobyl nuclear reactor accident. Radiat Res. 2006;166(1 Pt 2):271-86.
6. Likhtarev I, Thomas G, Kovgan L, Masiuk S, Chepurny M, Ivanova O, et al. Reconstruction of individual thyroid doses to the Ukrainian subjects enrolled in the Chernobyl Tissue Bank. Radiat Prot Dosimetry. 2013;156(4):407-23.
7. Likhtarov I, Kovgan L, Masiuk S, Talerko M, Chepurny M, Ivanova O, et al. Thyroid cancer study among Ukrainian children exposed to radiation after the Chernobyl accident: improved estimates of the thyroid doses to the cohort members. Health Phys. 2014;106(3):370-96.
8. Likhtarev IA, Sobolev BG, Kairo IA, Tronko ND, Bogdanova TI, Oleinic VA, et al. Thyroid cancer in Ukraine. Nature. 1995;375(6530):365-78.
9. Likhtarov I, Kovgan L, Vavilov S, Chepurny M, Bouville A, Luckyanov N, et al. Post-Chernobyl thyroid cancers in

11. Error estimation for direct measurements in May-June 1986 of ¹³¹I radioactivity in thyroid gland of children and adolescents and their registration in risk analysis / I. Likhtarev, S. Masiuk, M. Chepurny [et al.] // *Mathematics and Life Sciences*. – Berlin : Publ. House De Gruyter, 2012. – P. 231–244.
12. Масюк С. В. Вплив похибок вимірювання в дозах опромінення щитоподібної залози на оцінку радіаційних ризиків / С. В. Масюк, С. В. Шкляр, О. Г. Кукуш // *Проблеми радіаційної медицини та радіобіології*. – 2011. – Вип. 16. – С. 25–29.
13. Масюк С. В. Похибки берксонавського типу в дозах опромінення та їх вплив на оцінку радіаційних ризиків / С. В. Масюк, С. В. Шкляр, О. Г. Кукуш // *Проблеми радіаційної медицини та радіобіології*. – 2013. – Вип. 18. – С. 119–126.
14. Methods for estimation of radiation risk in epidemiological studies accounting for classical and Berkson errors in doses / A. Kukush, S. Shklyar, S. Masiuk [et al.] // *The International Journal of Biostatistics*. – 2011. – N 7, Article 15. – P. 1–32.
15. Модели регрессии з похибками вимірювання та їх застосування до оцінювання радіаційних ризиків / С. В. Масюк, О. Г. Кукуш, С. В. Шкляр [та ін.] ; за ред. І. А. Ліхтарьова – К. : ДІА, 2015. – 288 с.
16. UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation). Sources and effects of ionizing radiation. Annex J: exposures and effects of the Chernobyl accident. New York : United Nations, 2000. – 115 p.
17. Оценка поглощенной дозы в щитовидной железе жителей Брянской, Тульской, Орловской областей по результатам радиометрии в 1986 году / И. А. Звонова, М. И. Баллонов, А. А. Братилова [и др.] // *Радиация и риск*. – 1997. – № 10. – С. 95–116.
18. Питкевич В. А. Влияние динамики выпадения ¹³¹I вследствие аварии на Чернобыльской АЭС на величину поглощенных доз в щитовидной железе для жителей Брянской и Калужской областей России / В. А. Питкевич, И. К. Хвостунов, Н. К. Шишканов // *Радиация и риск*. – 1996. – № 7. – С. 192–215.
19. Balonov M. I. Reconstruction of thyroid dose received by inhabitants of areas contaminated by the Chernobyl radioactive fallout / M. I. Balonov // *Final report for the Contract with the US National Cancer Institute, order Nr. 263-MQ-918148 from 13.09.1999*. St. Petersburg – Vienna, 2000. – 53 p.
20. Ulanovsky A. V. Influence of measurement geometry on the estimate of ¹³¹I activity in the thyroid: Monte Carlo simulation of a detector and a phantom / A. V. Ulanovsky, V. F. Minenko, S. V. Korneev // *Health Phys.* – 1997. – Vol. 72. – P. 34–41.
21. Чепурный Н. И. Компенсация влияния геометрии измерения активности йода в щитовидной железе на результат измерений / Н. И. Чепурный // *Епідеміологія медичних наслідків аварії на Чернобыльській АЕС : матеріали міжнародної науково-практичної конференції, 9–10 жовтня 2007, Київ, Україна*. – Київ, 2007. – С. 22.
22. Кайдановский Г. Н. Калибровка радиометров для массового контроля инкорпорированных нуклидов ¹³¹I, ¹³⁴Cs и ¹³⁷Cs, выполненная с помощью добровольцев / Г. Н. Кайдановский, Е. Н. Долгирев // *Радиация и риск (Бюллетень НРЭР)*. – 1996. – №7. – С. 76–86.
- Ukraine. Report 2: Risk analysis. *Radiat Res.* 2006; 166(2):375-86.
10. Tronko MD, Howe GR, Bogdanova TI, Bouville AC, Epstein OV, Brill AB, et al. A cohort study of thyroid cancer and other thyroid diseases after the Chernobyl accident: thyroid cancer in Ukraine detected during first screening. *J Natl Cancer Inst.* 2006;98(13):897-903.
11. Likhtarev I, Masiuk S, Chepurny M, Kukush A, Shklyar S, Bouville A, Kovgan L. Error estimation for direct measurements in May-June 1986 of ¹³¹I radioactivity in thyroid gland of children and adolescents and their registration in risk analysis. In: Antoniuk A, Melnik V, editors. *Mathematics and Life Sciences*. Berlin: Publ. House De Gruyter; 2012. P. 231-44.
12. Masiuk S, Shklyar S, Kukush A. [The influence of measurement errors in irradiation doses of thyroid gland to assess radiation risks]. *Probl Radiac Med Radiobiol.* 2011;(16):25-9. Ukrainian.
13. Masiuk S, Shklyar S, Kukush A. Berkson errors in radiation dose assessments and their impact on radiation risk estimates. *Probl Radiac Med Radiobiol.* 2013;(18):119-26.
14. Kukush A, Shklyar S, Masiuk S, Likhtarov I, Kovgan L, Carroll RJ, et al. Methods for estimation of radiation risk in epidemiological studies accounting for classical and Berkson errors in doses. *Int J Biostat.* 2011 Feb 16;7(1):1-32.
15. Masiuk SV, Kukush OG, Shklyar SV, Chepurny MI, Likhtarov IA. [Regression models with measurement errors and their application to the radiation risks estimation]. Likhtarov IA, editor. Kyiv: DIA; 2015. 288 p. Ukrainian.
16. UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation). Sources and effects of ionizing radiation. Annex J: exposures and effects of the Chernobyl accident. New York: United Nations, 2000. 115 p.
17. Zvonova IA, Balonov MI, Bratilova AA, Baleva GE, Gridasova SA, Mitrokhin MA. et al. [Thyroid absorbed dose estimations for population of the Bryansk, Tula, Orel regions according to results of radiometry in 1986]. *Radiation and Risk.* 1997;10:95-116. Russian.
18. Pitkevich VA, Khvostunov IK, Shishkanov NK. [Influence of dynamics of ¹³¹I fallout due to the ChNPP accident on value of absorbed doses in thyroid for population of Bryansk and Kaluga regions of Russia]. *Radiation and Risk.* 1996; 7: 192-215. Russian.
19. Balonov MI. Reconstruction of thyroid dose received by inhabitants of areas contaminated by the Chernobyl radioactive fallout. *Final report for the Contract with the US National Cancer Institute, order Nr. 263-MQ-918148 from 13.09.1999*. St. Petersburg, Vienna; 2000. 53 p.
20. Ulanovsky AV, Minenko VF, Korneev SV. Influence of measurement geometry on the estimate of ¹³¹I activity in the thyroid: Monte Carlo simulation of a detector and a phantom. *Health Phys.* 1997;72:34-41.
21. Chepurny M. [Accounting for the effect of incorporated cesium isotopes on the activity measured in thyroid]. In: *Epidemiology of medical consequences of the Chernobyl accident: Proceedings of*

23. Гольданский В. И. Статистика отсчетов при регистрации ядерных частиц / В. И. Гольданский, А. В. Куценко, М. И. Подгорецкий. – М. : Государственное издательство, 1959. – 411 с.
24. Molina E. C. Poisson's Exponential Binomial Limit / E. C. Molina. – New York : Krieger Pub Co, 1973. – 56 p.
- International Scientific and Practical conference; 2007 Oct 9-11; Kyiv, Ukraine. Kyiv; 2007. p. 22. Ukrainian.
22. Kaidanovsky GN, Dolgirev EI. Calibration of radiometers for mass control of incorporated ^{131}I , ^{134}Cs and ^{137}Cs nuclides with the help of volunteers. Radiat Prot Dosimetry. 1997;71(3):187-94.
23. Goldansky VI, Kutsenko AV, Podgoretsky MI. [Statistics of nuclear particle counting]. Moscow: State publishing house; 1959. 411 p. Russian.
24. Molina EC. Poisson's Exponential Binomial Limit. New York: Krieger Pub Co; 1973. 56 p.

Стаття надійшла до редакції 27.08.2015

Received: 27.08.2015