

УДК 621.387.4.004.652:504.054:616.281:546.36:621.039.573

В. В. Василенко✉, О. М. Іванова, Л. О. Литвинець, В. О. Пікта, Г. М. Задорожна,  
М. І. Чепурний, І. А. Ліхтарьов

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

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВІДНОВЛЕННЯ ПРОЦЕДУРИ ПРОВЕДЕННЯ ЛВЛ-ВИМІРЮВАНЬ 1986 РОКУ

**Метою** дослідження є експериментальне відновлення процедури проведення ЛВЛ-вимірювань 1986 року та оцінка їх мінімально-детектованої активності.

**Матеріали і методи.** Дослідження були проведені на гамма-радіометрі СРП-68-01 зі сцинтиляційним детектором на основі кристалу NaI(Tl)  $\varnothing$  30 x 25 мм<sup>2</sup> та одноканальному спектрометрі NS-482-VM (фірми Vicron) зі сцинтиляційним детектором на основі кристалу NaI(Tl)  $\varnothing$  52 x 52 мм<sup>2</sup>. У роботі використано захисну камеру експертного лічильника випромінювання людини (ЛВЛ), гомогенні фантоми тіла людини з радіоактивним наповнювачем, результати ЛВЛ-вимірювань пацієнтів радіаційного реєстру (РР) ННЦРМ, отримані за допомогою ЛВЛ «Скриннер-3М». В роботі використано дозиметричні та математичні методи.

**Результати та висновки.** Відновлено процедуру проведення ЛВЛ-вимірювань на приладах, які використовувались у 1986 році для визначення вмісту інкорпорованого радіоцезію у населення РЗТ. За проведеною оцінкою мінімально-детектована активність ЛВЛ-вимірювань, проведених у 1986 році, лежить у межах від 1,3 кБк · організм<sup>-1</sup> (у випадку застосування одноканального спектрометра NS-482-VM зі сцинтиляційним детектором на основі кристалу  $\varnothing$  52 x 52 мм<sup>2</sup>) до 7,4 кБк · організм<sup>-1</sup> (у випадку застосування гамма-радіометра СРП-68-01 зі сцинтиляційним детектором на основі кристалу NaI(Tl)  $\varnothing$  30 x 25 мм<sup>2</sup>) для дорослої людини при часі вимірювання 60 с; від 0,8 кБк · організм<sup>-1</sup> до 5,6 кБк · організм<sup>-1</sup>, відповідно – для підлітка; та від 0,5 кБк · організм<sup>-1</sup> до 3,8 кБк · організм<sup>-1</sup>, відповідно – для дитини.

**Ключові слова:** ЛВЛ-вимірювання, радіоцезій, радіометр СРП-68-01, одноканальний спектрометр NS-482-VM, мінімально-детектована активність (МДА).

*Проблеми радіаційної медицини та радіобіології. 2016. Вип. 21. С. 119–131.*

✉ Василенко Валентина Володимирівна, e-mail: vvv2201@ukr.net

V. V. Vasynenko✉, O. M. Ivanova, L. O. Lytvynets, V. O. Pikta, G. M. Zadorozhna,  
M. I. Chepurnyi, I. A. Likhtariov

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

## **Experimental reconstruction of historical WBC-measuring procedure in 1986**

**Objective.** Examination and experimental reconstruction of the historical WBC-measuring procedure in 1986 and estimation of the minimum detectable activity (MDA) of those measurements.

**Materials and methods.** The SRP-68-01 gamma-spectrometer with attached scintillation detector based on a NaI(Tl)  $\emptyset$  30 x 25 mm<sup>2</sup> crystal and NC-482-BM one-channel spectrometer (Bicron Co.) with attached scintillation detector based on a NaI(Tl)  $\emptyset$  52 x 52 mm<sup>2</sup> crystal were used for the study. Protective chamber of the expert-type whole-body counter (WBC) and homogenous human body dummy phantoms filled with dry radioactive material were applied. Results of measurements on the WBC «Screener-3M» were retrieved from the Radiation Registry of the NRCRM. Dosimetry and mathematical methods were applied too.

**Results and conclusions.** The WBC-measurement procedure was reconstructed using the examples tested in 1986 to assay the level of incorporated radioactive cesium in population of contaminated territories. MDA under the WBC-measurements in 1986 was found being from 1.3 kBq per human body using the NC-482-BM one-channel spectrometer with attached scintillation detector based on a NaI(Tl)  $\emptyset$  52 x 52 mm<sup>2</sup> crystal up to 7.4 kBq per human body using the SRP-68-01 gamma-radiometer radiometer with attached scintillation detector based on a NaI(Tl)  $\emptyset$  30 x 25 mm<sup>2</sup> crystal in adults under the 60 seconds measurement time. The respective values for adolescents and children were within 0.8–5.6 kBq per body and 0.5–3.8 kBq per body.

**Key words:** WBC-measurements, radioactive cesium, SRP-68-01 radiometer, NC-482-BM one-channel spectrometer, minimum detectable activity (MDA).

*Problems of radiation medicine and radiobiology. 2016;21:119-131.*

### **ВСТУП**

Враховуючи на даний час підвищення вимог до якості дозиметричної інформації, створення персоніфікованих реєстрів індивідуальних даних щодо стану здоров'я та променевих навантажень жителів України, постає задача аналізу і ревізії бази даних ЛВЛ-вимірювань вмісту інкорпорованого радіоцезію, які надалі будуть використані для проведення широкомасштабних епідеміологічних і клінічних досліджень [1–4]. Найбільш важливими і цінними для досліджень є результати вимірювань, виконаних у 1986 році, коли дози внутрішнього опромінення населення були найбільшими [1]. Однак, саме ця інформація є найбільш проблемною, оскільки роботи щодо визначення доз внутрішнього опромінення тільки починалися, не було спеціальних приладів та методик для забезпечення таких робіт [5].

У базі даних (БД) відділу дозиметрії Національного наукового центру радіаційної медицини (ННЦРМ) 1986 року є 29 776 записів з результатами ЛВЛ-вимірювань, які надійшли з реєстру даних МОЗ України на паперових носіях та перенесені в електронну БД. На жаль, за цими записами часто неможливо встановити, на яких конкретно прила-

### **INTRODUCTION**

Considering the contemporary reinforcement of requirements to dosimetry data, establishing of personified registries for individual data on health and radiation doses in population of Ukraine the task has emerged to analyze and review the database of WBC-measurements of incorporated radioactive cesium that will be later applied in the wide-scale epidemiological and clinical research [1–4]. Measurement results received in 1986 are the most valuable, as at that time the internal radiation doses were the highest [1]. These data however are the most challenging as the work on identification of internal radiation doses is just initiated, whereas at that time there were no specialized devices to be applied [5].

There are 29,776 records in database (DB) of the National Research Center for Radiation Medicine (NRCRM) Dosimetry Department on WBC-measurements made in 1986. Records in electronic database were made in due time using data received as hard copies from the Data Registry of the Ministry of Health of Ukraine. Unfortunately it is often

дах були виконані ті чи інші дослідження. Однак встановлено [5], що у надзвичайній ситуації у зв'язку з аварією на ЧАЕС найбільш реальним і доступним для швидкого радіаційно-дозиметричного обстеження населення виявився метод використання типової вітчизняної апаратури, якою були оснащені радіологічні підрозділи СЕС, геологічні партії, служби радіаційної безпеки підприємств і організацій. Це сцинтиляційні гамма-радіометри або одноканальні спектрометри. До числа таких приладів відносяться радіометри ДП-5, СРП-68-01 зі сцинтиляційним циліндричним кристалом NaI(Tl)  $30 \times 25 \text{ мм}^2$ , який має нижній енергетичний поріг дискримінації 35 кеВ, вітчизняний ГТРМ-01-Ц з кристалом  $40 \times 40 \text{ мм}^2$ , RFT-20046 (фірми Роботрон, ГДР) з кристалами  $25 \times 25 \text{ мм}^2$  та  $40 \times 40 \text{ мм}^2$ , які мають можливість регулювання і встановлення нижнього та верхнього рівня енергетичного діапазону реєстрації гамма-випромінювання. Залежно від ефективності детектора і умов виконання вимірювань, нижня межа чутливості таких приладів за  $^{137}\text{Cs}$  знаходиться в межах від 1 до 20 кБк · організм<sup>-1</sup> при статистичній похибці 50 %, а продуктивність вимірювань складала 20–60 осіб · год<sup>-1</sup> [6]. Очевидно, що це найменш точний, але в той же час найбільш доступний і простий спосіб оцінки радіоактивності в тілі людини на момент аварії на ЧАЕС. Застосування такого роду засобів вимірювання було обумовлено відсутністю спеціалізованої апаратури контролю рівнів внутрішнього опромінення. Вони мали багато недоліків – не давали інформації про ізотопний склад випромінювання, не забезпечували необхідного рівня точності результатів вимірювань і мали низьку чутливість. Однак, завдяки максимальній простоті їх практичної реалізації вже в липні 1986 р. вдалося розгорнути заходи з масового обстеження населення щодо визначення рівнів внутрішнього опромінення [7].

Результати ЛВЛ-вимірювань, виконаних у 1986 році, є дуже важливими. Однак саме ці дані мають суттєві інформаційні прогалини. Одна з основних – практична відсутність інформації про МДА (мінімально-детектовану активність) проведених вимірювань. Оскільки значна частина записів БД мають значення вмісту інкорпорованого радіоцезію, нижчі від МДА вимірювання, для інтерпретації результатів вкрай важливо знати значення цього параметру.

unknown at what type and model of equipment the exact measurements had been made. Nevertheless it is clear [5] that under an emergency of the ChNPP accident the application of domestically produced typical devices was the most real and available for the prompt radiation-dosimetry examinations in population. The radiological units of sanitary and epidemiological stations, geological field parties and radiation safety services of enterprises and organizations were equipped with such devices, namely with gamma-radiometers and one-channel spectrometers. There are among them the radiometers DP-5, SRP-68-01 with attached scintillation cylindrical NaI(Tl)  $30 \times 25 \text{ мм}^2$  crystal featuring the 35 keV lower energy discrimination threshold, the home-produced GTRM-01-Ts with  $40 \times 40 \text{ мм}^2$  crystal, and RFT-20046 (Robotron Co., East Germany) with  $25 \times 25 \text{ мм}^2$  and  $40 \times 40 \text{ мм}^2$  crystals capable for adjusting and fixing the upper and lower thresholds of energy registration range of gamma-radiation. The lower sensitivity threshold for  $^{137}\text{Cs}$  depending on detector efficacy and measurement conditions is within 1–20 kBq per human body under the 50% statistical uncertainty. The performance rate of measurements is about 20–60 persons per hour [6]. Obviously it was the least precise but the most available and simple approach of radioactivity assay in human body at the time of the ChNPP accident. Application of such a kind of measurements was stipulated by no any specialized equipment available to count the internal irradiation levels. Such devices featured a lot of drawbacks, namely they provided no data on isotope spectrum of radiation sources, no enough level of measurement accuracy and were of low sensitivity. However due to the extreme simplicity of their implementation the arrangements on wide-scale public measurements of internal radiation levels were launched in July 1986 [7].

Results of measurements made in 1986 are especially valuable. But there are substantial information gaps just in these data. Firstly there is almost no information on the MDA (minimal detected activity) of conducted measurements. And as there are many records in DB with measured values of incorporated radioactive cesium under the MDA threshold it is actual to identify the value of this parameter to interpret the results.

**МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ**

Метою дослідження були експериментальне відновлення процедури проведення ЛВЛ-вимірювань 1986 року і оцінка їх мінімально-детектованої активності.

**МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ**

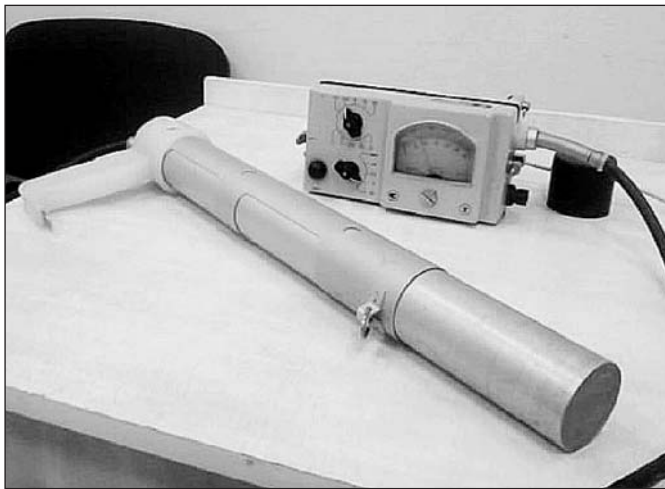
Роботи з відновлення процедури ЛВЛ-вимірювань, які виконувались у 1986 році, та визначення їх МДА були проведені на гамма-радіометрі СРП-68-01 зі сцинтиляційним детектором на основі кристалу NaI(Tl) Ø 30 × 25 мм<sup>2</sup> (рис. 1) та одноканальному спектрометрі NC-482-BM (фірми Bicron) зі сцинтиляційним детектором на основі кристалу NaI(Tl) Ø 52 × 52 мм<sup>2</sup> (рис. 2). Слід зазначити, що такі пристрої на даний час вже майже не використовуються.

**OBJECTIVE**

Experimental reconstruction of the historical WBC-measuring procedure in 1986 and estimation of the minimal detecting activity of those measurements.

**MATERIALS AND METHODS**

Activities on reconstruction of the historical WBC-measurements in 1986 and assay of their MDA were held at the SRP-68-01 gamma-spectrometer with attached scintillation detector with NaI(Tl) Ø 30 × 25 mm<sup>2</sup> crystal (Figure 1) and NC-482-BM one-channel spectrometer (Bicron Co.) with attached scintillation detector based on a NaI(Tl) Ø 52 × 52 mm<sup>2</sup> crystal (Figure 2). Noteworthy that such devices are almost no more used nowadays.



**Рисунок 1.** Гамма-радіометр СРП-68-01 з NaI(Tl) детектором Ø 30 × 25 мм<sup>2</sup>

**Figure 1.** Gamma-radiometer SRP-68-01 with NaI(Tl) detector Ø 30 × 25 mm<sup>2</sup>



**Рисунок 2.** Одноканальний спектрометр NC-482-BM з NaI (Tl) детектором Ø 52 × 52 мм<sup>2</sup>

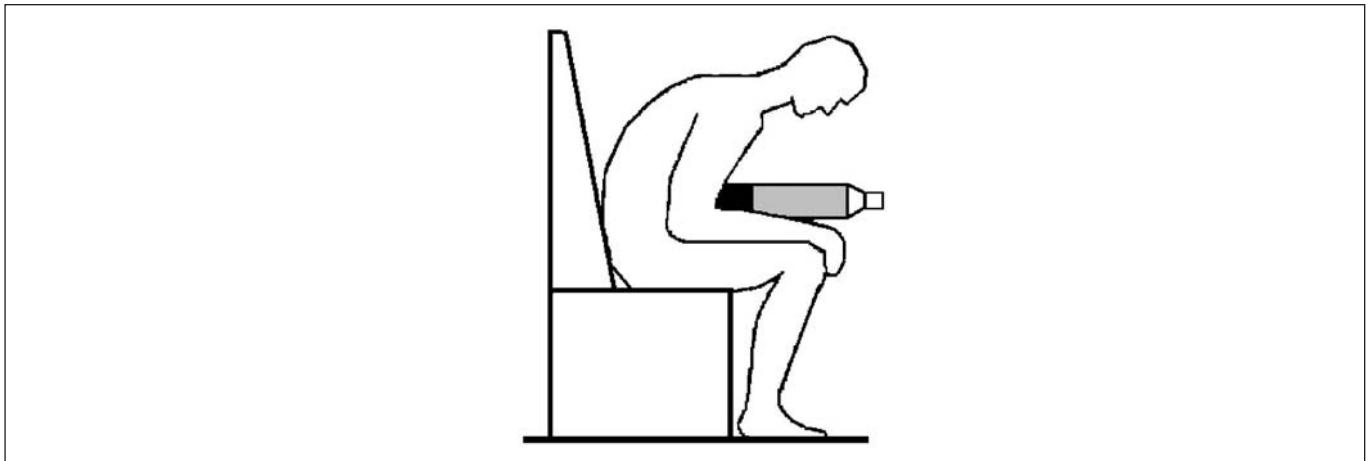
**Figure 2.** One-channel spectrometer NC-482-BM with NaI (Tl) detector Ø 52 × 52 mm<sup>2</sup>

Радіометр СРП-68-01 зі сцинтиляційним циліндричним кристалом NaI(Tl) Ø 30 × 25 мм<sup>2</sup> має нижній енергетичний поріг дискримінації 35 кеВ. Для спектрометра NC-482-BM було встановлено енергетичний діапазон реєстрації 500–900 кеВ, який дає можливість реєструвати гамма-випромінювання, що утворюється при розпаді радіонуклідів <sup>137</sup>Cs (лінії 662 кеВ з квантовим виходом 0,85 γ-квантів на розпад) та <sup>134</sup>Cs (лінії 563, 569, 605, 796 та 802 кеВ з квантовим виходом 0,08; 0,15; 0,98; 0,85; 0,09 – відповідно) [8].

Вимірювання було проведено в геометрії «Північ» — детектор розміщено перпендикулярно до живота, положення людини — сидячи зігнувшись. Це найбільш застосовувана геометрія для досліджуваних приладів, оскільки вона забезпечує найбільшу чутливість вимірювання (рис. 3).

The lower discrimination threshold of SRP-68-01 radiometer with cylindrical scintillation NaI(Tl) Ø 30 × 25 mm<sup>2</sup> crystal is 35 keV. The 500–900 keV registration energy range was established for the NC-482-BM spectrometer providing the detection of gamma-radiation emitted in the decay of <sup>137</sup>Cs (662 keV lines with quantum efficiency of 0.85 γ-quantum per decay) and <sup>134</sup>Cs (563 keV lines, 569, 605, 796 and 802 keV with quantum efficiency of 0.08, 0.15, 0.98, 0.85, and 0.09 respectively) [8].

Measurements were taken in the «North» geometry i.e. with detector placed at right angles to abdominal wall in sitting position with bending. It is the most widely used geometry for the applied devices as the highest measuring sensitivity is provided thus (Figure 3).



**Рисунок 3. Геометрія «північ» або «сидячи зігнувшись»**

**Figure 3. The «North» geometry i.e. «sitting position with bending»**

### РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

При відновленні методики вимірювання було вирішено окреме питання вивчення ефекту екранування фону тілом людини. Для застосованої нами геометрії «Північ» – цей ефект вносить суттєвий вклад в результати. Для його визначення ми відібрали результати вимірювання осіб із числа пацієнтів Поліклініки радіаційного реєстру (ПРР) ННЦРМ, отримані за допомогою ЛВЛ «Скриннер-3М», вміст інкорпорованого  $^{137}\text{Cs}$  яких є значно меншим, від очікуваного МДА. МДА вимірювання, проведеного на ЛВЛ «Скриннер-3М», становить 0,3 кБк радіоцезію для дорослої людини за час вимірювання 300 с.

Для одноканального аналізатора NC-482-BM із детектором  $\varnothing 52 \times 52 \text{ mm}^2$  коефіцієнт екранування  $K_{\text{екр}}$  описується експоненціальною функцією 1, що цілком співпадає з проведеними раніше дослідженнями [9]:

$$K_{\text{екр}} = 0.5 + \exp(-0.25 \cdot \sqrt{M}), \quad (1)$$

де  $M$  – маса тіла людини, кг.

Для радіометра СРП-68-01 визначений нами ефект екранування менш значущий (рис. 4) і описується функцією 2:

$$K_{\text{екр}} = 0.5 + \exp(-0.25 \cdot \sqrt{M}), \quad (2)$$

Слід зазначити, що коефіцієнт екранування, як було досліджено раніше [7], залежить від умов вимірювання, головним чином, від анізотропії і переважного напрямку потоку фонового опромінення, а також від вкладу в інтервал реєстрації його розсіяної компоненти, на що, у свою чергу, впливає взаємне розміщення детектора і оточуючих його предметів [7]. У той же час, при зміні умов проведення вимірювань з достатньою точністю зберігається функціональна за-

### RESULTS AND DISCUSSION

Issue of background-shielding effect of human body was separately concerned within dosimetry approach reconstruction. This effect makes a significant bias to the results under an applied «North» geometry. To evaluate this effect we have selected a set of measurement results in the patients of the NRCRM Radiation Registry Outpatient Clinic. Results were received at the WBC «Screener-3M» where the content of incorporated  $^{137}\text{Cs}$  is much lower vs. the expected MDA. The MDA measured on WBC «Screener-3M» is 0.3 kBq of  $^{137}\text{Cs}$  for an adult for 300 seconds of measurement time.

Shielding factor  $F_{sh}$  for the NC-482-BM one-channel spectrometer with scintillation detector based on a NaI(Tl)  $\varnothing 52 \times 52 \text{ mm}^2$  crystal is described by exponential function (1) being in a complete accord with previous studies [9]:

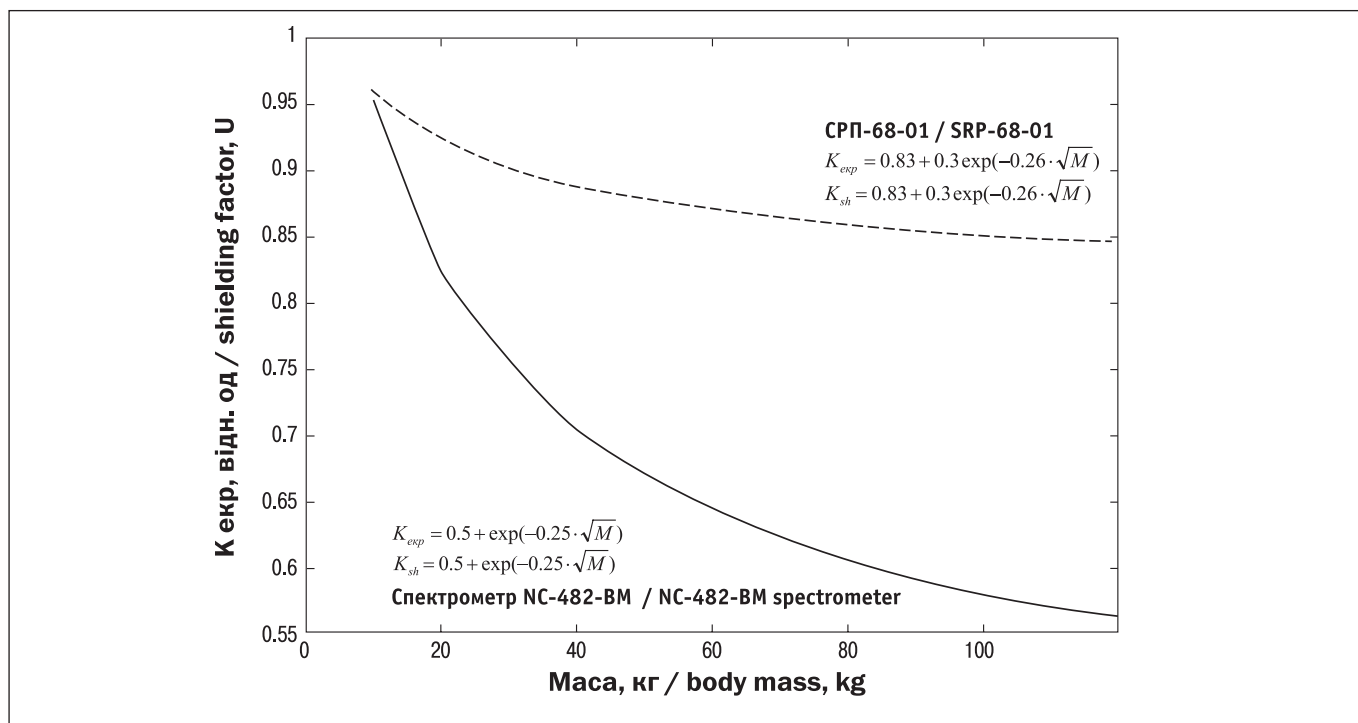
$$F_{sh} = 0.5 + \exp(-0.25 \cdot \sqrt{M}), \quad (1)$$

where  $M$  is a human body mass in kg.

Revealed shielding effect was less significant for the SRP-68-01 radiometer (Figure 4) being described by function (2):

$$F_{sh} = 0.5 + \exp(-0.25 \cdot \sqrt{M}), \quad (2)$$

Of note, as it was found earlier [7] the shielding factor depends on measurement conditions and first of all on anisotropy and predominant direction of a background radiation. Contribution of the dispersed component of radiation into the registration interval is meaningful too, being in its turn under an impact of positional relationship of the detector and surrounding items [7]. Functional dependence of  $F_{sh}$  is preserved with enough accuracy for vari-



**Рисунок 4.** Функції коефіцієнта екранування фону тілом людини для приладів СРП-68-01 та NC-482-BM із кристалом  $\varnothing 52 \times 52 \text{ мм}^2$

**Figure 4.** Function of human body background-shielding factor for the SRP-68-01 device and NC-482-BM device with  $\varnothing 52 \times 52 \text{ мм}^2$  crystal

лежність  $K_{exp}$  для різних вікових груп, тобто коефіцієнт екранування, отриманий в лабораторних умовах для даного приладу з точністю до постійного множника  $K_p$  – поправочний коефіцієнт, можна застосовувати в інших умовах вимірювання. Тобто, реальне значення коефіцієнта екранування визначається безпосередньо на місці проведення вимірювань і зводиться до визначення поправочного коефіцієнта  $K_p$  лише для однієї вікової групи. Як показав досвід, для визначення  $K_p$  в нестационарних умовах вимірювань у якості «фоновий фантом» можна використати вимірювання «чистої» людини (з вмістом радіоактивних речовин значно нижчим від МДА приладу):

$$K_p = \frac{K_{expR}}{K_{expF}}, \quad (3)$$

де  $K_{expR}$  – коефіцієнт екранування, визначений в реальних умовах вимірювання з використанням «фоновий фантом»;

$K_{expF}$  – коефіцієнт екранування, визначений в стаціонарних умовах для даного приладу (за формулами 1 і 2).

Дослідження щодо відновлення методики вимірювання було проведено в умовах трьох рівнів радіаційного фону – 0,5; 16 і 25  $\text{мкР} \cdot \text{год}^{-1}$  (табл. 1). На жаль, створити умови з більшим рівнем радіаційного фону не було можливості.

ous age groups at the same time i.e. the shielding factor assayed in laboratory settings for the specific device with accuracy up to the constant multiplier value  $F_a$  (adjustment factor) can be applied in other measurement conditions. In other words the real value of shielding factor is identified just at a place of taken measurements and comes to determination of an adjustment factor  $F_a$  for a specific age group. As experience has shown, the measurement of a «clean» human (with content of radioactive substances under the MDA of a device) can be used as a «background phantom» for the  $F_a$  assay in unsteady conditions of measurements.

$$F_a = \frac{F_{shR}}{F_{shF}}, \quad (3)$$

where  $F_{shR}$  – the shielding factor assayed in the real settings of measurement using a «background phantom»;

$F_{shF}$  – the shielding factor assayed in the steady conditions for a specific device (using equations 1 & 2).

Study on reconstruction of the measurement approach was held under the conditions of 3 radiation background levels, namely 0.5, 16 and 25  $\text{mR} \cdot \text{hour}^{-1}$  (Table 1). Unfortunately the environment with higher radiation background was unavailable.

**Таблиця 1**

**Результати визначення коефіцієнта екранування в умовах різних рівнів радіаційного фону**

**Table 1**

**Shielding factor values under the several radiation background levels**

	Маса, кг Mass, kg	Гамма-радіометр СРП-68-01 з NaI детектором Ø 30 x 25 мм <sup>2</sup> СРП-68-01 gamma-radiometer with NaI Ø 30 x 25 mm <sup>2</sup> detector			Одноканальний спектрометр NC-482-BM з NaI детектором Ø 52 x 52 мм <sup>2</sup> NC-482-BM one-channel spedrometer with NaI Ø 52 x 52 mm <sup>2</sup> detector		
		0,5 мкР · год <sup>-1</sup> 0.5 μR · hour <sup>-1</sup>	16 мкР · год <sup>-1</sup> 16 μR · hour <sup>-1</sup>	25 мкР · год <sup>-1</sup> 25 μR · hour <sup>-1</sup>	0,5 мкР · год <sup>-1</sup> 0.5 μR · hour <sup>-1</sup>	16 мкР · год <sup>-1</sup> 16 μR · hour <sup>-1</sup>	25 мкР · год <sup>-1</sup> 25 μR · hour <sup>-1</sup>
$K_p / F_a$			1,0	1,0		1,09	1,03
Дитина / child	11	1,0	0,96	0,96	1,0	0,99	0,97
Підліток / adolescent	27	1,0	0,91	0,91	1,0	0,84	0,91
Дорослий / adult	67	1,0	0,86	0,86	1,0	0,69	0,65

Однак, зважаючи на те, що будь-які спектрометричні вимірювання проводяться в умовах забезпечення мінімального рівня фонового опромінення з метою підвищення чутливості вимірювання, вважаємо, що такі дослідження є достатніми для отримання оцінки МДА. Було визначено коефіцієнти екранування для трьох вікових груп у реальних умовах проведення вимірювання.

Для точного визначення ефективності реєстрації приладів, у першу чергу, вимірювання було проведено в низькофоновій камері експертного лічильника випромінювання людини [10]. МДА гамма-спектрометричної «лінійки» експертного ЛВЛ становить 0,02 кБк радіоцезію за час вимірювання 600 с для дорослої людини. Фон всередині камери становив 0,5 мкР · год<sup>-1</sup>. Вимірювання було проведено для трьох вікових груп – дитина, підліток, доросла людина. Для визначення коефіцієнта калібрування були використані гомогенні фантоми тіла людини з радіоактивним наповнювачем [11] (рис. 5). Характеристики фантомів приведені в табл. 2.

Ефективність реєстрації  $\xi$  визначалась за формулами:

$$N = Q - K_{екр} \cdot Q_{фону}, \quad (4)$$

$$\xi = \frac{N}{I \cdot A_{фантома}}, \quad (5)$$

де  $Q$  – загальна кількість імпульсів від фантома людини за одиницю часу, с<sup>-1</sup>;

$Q_{фону}$  – кількість імпульсів фону за одиницю часу, с<sup>-1</sup>;

$N$  – кількість «корисних» імпульсів, за вирахуванням імпульсів фону, с<sup>-1</sup>;

$I$  – квантовий вихід g-квантів вимірюваного радіоізоотопу, розпад<sup>-1</sup>

$A_{фантома}$  – вміст <sup>137</sup>Cs у фантомі, Бк.

Considering however that any spectrometric measurements are taken under the providing of minimal background radiation levels aiming to increase measurement sensitivity we consider such studies sufficient to receive the MDA estimates. Shielding factor values were received for the 3 age groups in real conditions of taken measurements.

Measurements were taken first of all in a low-background chamber of the expert whole-body counter to assay precisely the registration efficiency of devices [10]. The MDA value of gamma-spectrometric «line» of expert WBC is 0.02 kBq of radioactive cesium for the measurement time of 600 seconds in adult human. Radiation background inside the chamber was 0.5 mR · hour<sup>-1</sup>. Measurements were taken for the 3 age groups, namely children, adolescents, and adults. The homogenous phantom human bodies filled with radioactive substance were used to assay the value of calibration factor [11] (Figure 5). Parameters of the phantoms are listed in Table 2.

Registration efficiency  $\xi$  was assayed by the equations:

$$N = Q - F_{sh} \cdot Q_{backgr}, \quad (4)$$

$$\xi = \frac{N}{I \cdot A_{phantom}}, \quad (5)$$

where  $Q$  – total number of pulses from a phantom per time unit, sec<sup>-1</sup>;

$Q_{backgr}$  – number of background pulses per time unit, sec<sup>-1</sup>;

$N$  – number of «useful» pulses with background impulses subtraction, sec<sup>-1</sup>;

$I$  – quantum efficiency of g-quanta of the tested isotope, decay<sup>-1</sup>;

$A_{phantom}$  – <sup>137</sup>Cs content in the phantom, Bq.



**Рисунок 5. Насипні радіоактивні гомогенні фантоми тіла людини, застосовані для проведення робіт**  
**Figure 5. The poured homogenous radioactive phantoms of human body used in the studies**

**Таблиця 2**

**Дозиметричні та антропометричні характеристики радіоактивних гомогенних фантомів тіла людини**

**Table 2**

**Dosimetry and anthropometrical parameters of homogenous radioactive phantoms of human body**

<b>Вікова група Age group</b>	<b>Маса, кг Mass, kg</b>	<b>Зріст, см Height, cm</b>	<b>Активність <sup>137</sup>Cs, кБк <sup>137</sup>Cs activity, kBq</b>
«Діти» / «children»	11	78	3,8
«Підлітки» / «adolescents»	27	131	9,2
«Дорослі» / «adults»	67	174	23,0

Калібровочний коефіцієнт  $K_{\text{кал}}$  розраховували за формулою:

$$K_{\text{кал}} = \frac{A_{\text{фантома}}}{N \cdot M_{\text{фантома}}} \quad (6)$$

Мінімально-детектовану активність визначено за спрощеною формулою. Оскільки час вимірювання людини і фону однакові, а у випадку відомого, стабільного фону і при довірчій ймовірності  $p = 0,95$  та прийнятій відносній похибці вимірювання величину МДА допускається визначати за формулою [12, 13]:

$$MDA = \frac{2 \cdot \sqrt{Q_{\text{фону}}}}{\xi \cdot I \cdot \sqrt{T_{\text{виміру}}}} \quad (7)$$

Такі ж вимірювання були проведені в умовах радіаційного фону  $16 \text{ мкР} \cdot \text{год}^{-1}$ ,  $25 \text{ мкР} \cdot \text{год}^{-1}$ .

Результати проведених вимірювань представлені у табл. 3. На рис. 6 представлені коефіцієнти калібру-

Calibration factor  $F_{\text{calib}}$  was calculated by formula:

$$F_{\text{calib}} = \frac{F_{\text{phantom}}}{N \cdot M_{\text{phantom}}} \quad (6)$$

The minimal detected activity was assayed by the simplified formula. As the measurement time for both human and background is the same, than in case of stable known background, confidential probability of 0.95 and accepted measurement uncertainty the MDA value can be assayed by the formula [12, 13]:

$$MDA = \frac{2 \cdot \sqrt{Q_{\text{backgr}}}}{\xi \cdot I \cdot \sqrt{T_{\text{measurement}}}} \quad (7)$$

The same measurements were taken under 16 and 25  $\text{mR} \cdot \text{hour}^{-1}$  radiation background levels.

Measurement results are listed in Table 3. Figure 6 shows the calibration factors  $F_{\text{calib}}$  received for



вання Ккал, отримані для гамма-радіометра СРП-68-01 і одноканального спектрометра NC-482-ВМ (фірми Bicron) зі сцинтиляційним детектором з кристалом NaI(Tl)  $\varnothing$  52 × 52 мм<sup>2</sup> в умовах різних рівнів радіаційного фону.

За результатами аналізу бази даних ЛВЛ-вимірювань 1986 року було виділено 2305 результатів вимірювань, які мали найбільшу інформаційну забезпе-

the SRP-68-01 gamma-spectrometer and NC-482-ВМ (Bicron Co.) one-channel spectrometer with scintillation detector with NaI(Tl)  $\varnothing$  52 × 52 mm<sup>2</sup> crystal under a range of radiation background levels.

From the review of DB records on WBC-measurements in 1986 the 2,305 measurement results were selected having the best information available

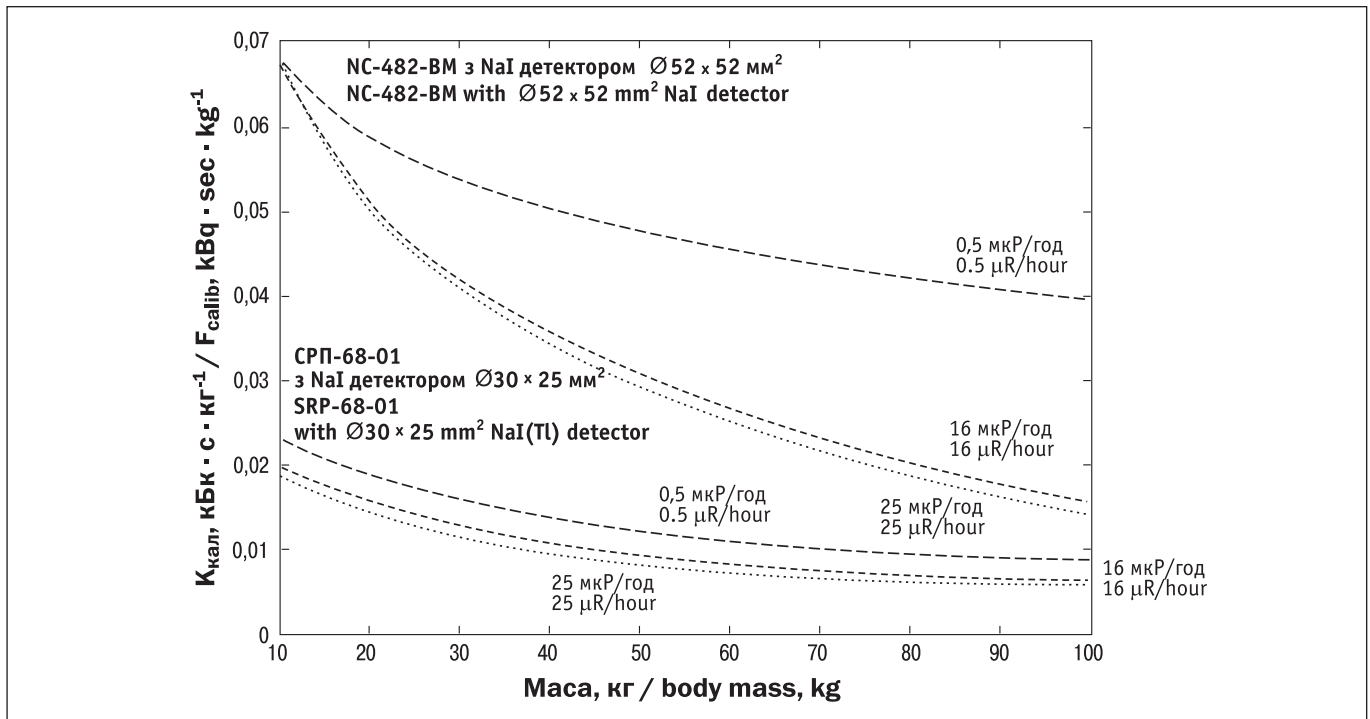
**Таблиця 3**

**Дозиметричні характеристики приладів СРП-68-01 та одноканального спектрометра NC-482-ВМ з NaI(Tl) детектором  $\varnothing$  52 × 52 мм<sup>2</sup>, визначені при відновленні методик вимірювання 1986 року**

**Table 3**

**Dosimetric parameters of the SRP-68-01 device and NC-482-ВМ з NaI(Tl) one-channel spectrometer with  $\varnothing$  52 × 52 mm<sup>2</sup> detector identified under the reconstruction of historical measurement approaches in 1986**

Рівень радіаційного фону Radiation background level	Калібрувальні характеристики Calibration characteristics	Фон Background	Вікова група / age group			
			дитина child	підліток adolescent	дорослий adult	
<b>Гамма-радіометр СРП-68-01 з NaI детектором <math>\varnothing</math> 30 × 25 мм<sup>2</sup> SRP-68-01 gamma-radiometer with NaI <math>\varnothing</math> 30 × 25 mm<sup>2</sup> detector</b>						
0,5 мкР·год <sup>-1</sup> / $\mu$ R · hour <sup>-1</sup>	Q, імп·с <sup>-1</sup> / pps	1,5	16,0	20,5	33,0	
	N, імп·с <sup>-1</sup> / pps		14,5	19,0	31,5	
	$K_{кал}$ , кБк·с·кг <sup>-1</sup> / $F_{calib}$ , кВq·sec·kg <sup>-1</sup>		0,024	0,018	0,011	
	$\xi$ , відн.од / units		0,0045	0,0024	0,0016	
	МДА, кБк / MDA, кВq		0,60	0,12	0,18	
16 мкР·год <sup>-1</sup> / $\mu$ R · hour <sup>-1</sup>	Q, імп·с <sup>-1</sup> / pps	60,0	75,0	79,3	96,6	
	N, імп·с <sup>-1</sup> / pps		17,4	24,7	45,0	
	$K_{кал}$ , кБк·с·кг <sup>-1</sup> / $F_{calib}$ , кВq·sec·kg <sup>-1</sup>		Kp = 1,0	0,020	0,014	0,008
	$\xi$ , відн.од / units			0,0054	0,0031	0,0023
	МДА, кБк / MDA, кВq			3,24	5,50	7,20
25 мкР·год <sup>-1</sup> / $\mu$ R · hour <sup>-1</sup>	Q, імп·с <sup>-1</sup> / pps	80,0		93,8	100,0	120,0
	N, імп·с <sup>-1</sup> / pps			17,0	27,2	51,2
	$K_{кал}$ , кБк·с·кг <sup>-1</sup> / $F_{calib}$ , кВq·sec·kg <sup>-1</sup>		Kp = 1,0	0,020	0,013	0,007
	$\xi$ , відн.од / units			0,0053	0,0035	0,0026
	МДА, кБк / MDA, кВq			3,81	5,62	7,36
<b>Одноканальний спектрометр NC-482-ВМ з NaI детектором <math>\varnothing</math> 52 × 52 мм<sup>2</sup> NC-482-ВМ one-channel spectrometer with NaI <math>\varnothing</math> 52 × 52 mm<sup>2</sup> detector</b>						
0,5 мкР·год <sup>-1</sup> / $\mu$ R · hour <sup>-1</sup>	Q, імп·хв <sup>-1</sup> / pps	12		350	430	550
	N, імп·хв <sup>-1</sup> / pps		338	418	538	
	$K_{кал}$ , кБк·с·кг <sup>-1</sup> / $F_{calib}$ , кВq·sec·kg <sup>-1</sup>		0,0060	0,049	0,038	
	$\xi$ , відн.од / units		0,0015	0,00075	0,00039	
	МДА, кБк / MDA, кВq		0,08	0,15	0,29	
16 мкР·год <sup>-1</sup> / $\mu$ R · hour <sup>-1</sup>	Q, імп·хв <sup>-1</sup> / pps	489	829	928	1021	
	N, імп·хв <sup>-1</sup> / pps		339	517	684	
	$K_{кал}$ , кБк·с·кг <sup>-1</sup> / $F_{calib}$ , кВq·sec·kg <sup>-1</sup>		Kp = 1,09	0,060	0,040	0,021
	$\xi$ , відн.од / units			0,0018	0,00011	0,00058
	МДА, кБк / MDA, кВq			0,47	0,71	1,22
25 мкР·год <sup>-1</sup> / $\mu$ R · hour <sup>-1</sup>	Q, імп·хв <sup>-1</sup> / pps	600		929	1008	1096
	N, імп·хв <sup>-1</sup> / pps			347	534	706
	$K_{кал}$ , кБк·с·кг <sup>-1</sup> / $F_{calib}$ , кВq·sec·kg <sup>-1</sup>		Kp = 1,03	0,060	0,039	0,019
	$\xi$ , відн.од / units			0,0018	0,00112	0,00060
	МДА, кБк / MDA, кВq			0,52	0,75	1,26



**Рисунок 6.** Коефіцієнти калібрування  $K_{кал}$  для приладів –  $\gamma$ -радіометр СРП-68-01 з сцинтиляційним циліндричним кристалом NaI(Tl) Ø 30 x 25 мм<sup>2</sup> та одноканального спектрометра NC-482-BM (фірми Bicron) зі сцинтиляційним детектором з кристалом NaI(Tl) Ø 52 x 52 мм<sup>2</sup> в умовах різного радіаційного фону

**Figure 6.** Calibration factors  $F_{calib}$  for the SRP-68-01  $\gamma$ -radiometer with NaI(Tl) Ø 30 x 25 mm<sup>2</sup> cylindrical scintillation crystal and NC-482-BM (Bicron Co.) one-channel spectrometer with scintillation detector with NaI(Tl) Ø 52 x 52 mm<sup>2</sup> crystal under the range of radiation background

ченість щодо характеристик вимірювання. Для таких даних вдалося встановити калібрувальні коефіцієнти. Слід зазначити, що отримані калібрувальні характеристики дають можливість зробити висновки щодо застосованих при вимірюваннях у 1986 році приладах. Співставляючи калібрувальні коефіцієнти, отримані за результатами аналізу бази даних та проведених нами експериментальних робіт, можна зробити висновок, що це були як одноканальні спектрометри з коефіцієнтом калібрування 0,033–0,062 кБк · с · кг<sup>-1</sup>, так і, скоріш за все, радіометри або ж одноканальні спектрометри з кристалом малого об'єму (20 x 20 мм<sup>2</sup>) з коефіцієнтом калібрування 0,007–0,012 кБк · с · кг<sup>-1</sup>.

Таким чином, за результатами проведених нами досліджень МДА ЛВЛ-вимірювання залежно від використаного приладу лежить у межах 1,3 кБк · організм<sup>-1</sup> у випадку застосування одноканального спектрометра NC-482-BM із NaI(Tl) детектором Ø 52 x 52 мм<sup>2</sup> до 7,4 кБк · організм<sup>-1</sup> – у випадку застосування гамма-радіометра СРП-68-01 для дорослої людини при часі вимірювання 60 с; від 0,8 кБк · організм<sup>-1</sup> до 5,6 кБк · організм<sup>-1</sup>, відповідно – для підлітка, та від 0,5 кБк · організм<sup>-1</sup> до 3,8 кБк · організм<sup>-1</sup>, відповідно – для дитини. Слід зазначити, що за результатами роботи

on radiation characteristics. It has turned out well to establish the calibration factors for those data. Of note the received calibration characteristics make it possible to outline the conclusions on examples of historical measurements in 1986. Comparing the calibration factors received from the database review and conducted experimental studies a conclusion can be made that there were the one-channel spectrometers with calibration factors of 0.033–0.062 kBq · sec · kg<sup>-1</sup> and most likely the radiometers or one-channel spectrometers with low-volume crystals (20 x 20 mm<sup>2</sup>) and calibration factor 0.007–0.012 kBq · sec · kg<sup>-1</sup>.

Thus subsequent to the results of our studies the MDA value of WBC-measurements depending on a device is in a range from 1.3 kBq per human body in case of the NC-482-BM one-channel spectrometer with NaI(Tl) Ø 52 x 52 mm<sup>2</sup> detector up to 7.4 kBq per human body in case of the SRP-68-01 gamma-radiometer for an adult under the 60 seconds measurement time. For adolescents and children the respective values are from 0.8 to 5.6 kBq per human body and from 0.5 up to 3.8 kBq per human body. It should be underlined that according to the research

Г. Н. Кайдановського та Є. М. Долгірева (НДІ радіаційної гігієни, С.-Петербург), МДА вимірювання для дорослої людини за той самий час, визначена за допомогою приладу СРП-68-01, становить  $6,9 \text{ кБк} \cdot \text{організм}^{-1}$  для фону  $10 \text{ мкР} \cdot \text{год}^{-1}$ , та  $9,8 \text{ кБк} \cdot \text{організм}^{-1}$  для фону  $20 \text{ мкР} \cdot \text{год}^{-1}$  [14].

## ВИСНОВКИ

Виконано роботи з відновлення методики вимірювання інкорпорованого радіоцезію на гамма-радіометрах та одноканальних спектрометрах на прикладі гамма-радіометра СРП-68-01 та одноканального спектрометра NC-482-BM із NaI(Tl) детектором  $\varnothing 52 \times 52 \text{ мм}^2$ .

Визначено функції калібрувальних коефіцієнтів залежно від вікової групи для досліджуваних приладів та проведено оцінку МДА вимірювання. Отримані калібрувальні характеристики дають можливість зробити висновки щодо застосованих при вимірюваннях у 1986 році приладах. Співставляючи калібрувальні коефіцієнти, отримані за результатами аналізу БД результатів ЛВЛ-вимірювань, та проведених нами експериментальних робіт, можна зробити висновок, що це могли бути як одноканальні спектрометри з коефіцієнтом калібрування  $0,033\text{--}0,062 \text{ кБк} \cdot \text{с} \cdot \text{кг}^{-1}$ , так і, скоріш за все, радіометри або ж одноканальні спектрометри з детектором малого об'єму ( $20 \times 20 \text{ мм}^2$ ) з коефіцієнтом калібрування  $0,007\text{--}0,012 \text{ кБк} \cdot \text{с} \cdot \text{кг}^{-1}$ .

За проведеною оцінкою мінімально-детектована активність вимірювань лежить у межах  $1,3 \text{ кБк} \cdot \text{організм}^{-1}$  у випадку застосування одноканального спектрометра NC-482-BM із NaI(Tl) детектором  $\varnothing 52 \times 52 \text{ мм}^2$  до  $7,4 \text{ кБк} \cdot \text{організм}^{-1}$  — у випадку застосування гамма-радіометра СРП-68-01 для дорослої людини при часі вимірювання 60 с; від  $0,8 \text{ кБк} \cdot \text{організм}^{-1}$  до  $5,6 \text{ кБк} \cdot \text{організм}^{-1}$ , відповідно — для підлітка, та від  $0,5 \text{ кБк} \cdot \text{організм}^{-1}$  до  $3,8 \text{ кБк} \cdot \text{організм}^{-1}$ , відповідно — для дитини.

Однак, слід зазначити, що наші розрахунки щодо МДА є дуже оптимістичними. Оскільки, післяаварійний спектр фону 1986 року, окрім радіоцезію включав лінії рутенію-106, церію-144, та інших радіонуклідів, у тому числі, природного походження. Особливо це стосується сцинтиляційних радіометрів, оскільки вони мають інтегральну рахункову характеристику у діапазоні  $30\text{--}3000 \text{ кеВ}$ , окрім приладів RTF. Таким чином, реальні МДА приладів в умовах 1986 року, можуть мати більші значення, ніж отримані при наших оцінках. Окрім того, у наших дослідженнях враховано ефект екранування фону

by G. Kaidanovsky and Ye. Dolgirev (St.-Peterburg) the MDA values for an adult with the same measurement time if identified by the SRP-68-01 device are  $6.9 \text{ kBq per human body}$  for the  $10 \text{ mR} \cdot \text{hour}^{-1}$  background and  $9.8 \text{ kBq per human body}$  for the  $20 \text{ mR} \cdot \text{hour}^{-1}$  background [14].

## CONCLUSIONS

Measurement procedure of radioactive cesium by means of gamma-radiometers and one-channel spectrometers was restored using the SRP-68-01 gamma-radiometer and NC-482-BM one-channel spectrometer with NaI(Tl)  $\varnothing 52 \times 52 \text{ mm}^2$  detector as the examples.

Functions of calibration factors depending on the age group were identified for the tested devices. Values of MDA of measurements were estimated. The received calibration characteristics do way to make some conclusions about the devices used in historical measurements in 1986. Comparing the calibration factors received subsequent to the review results of WBC-measurements DB and our own conducted experiments one can conclude that there could be both single-channel spectrometers with  $0.033\text{--}0.062 \text{ kBq} \cdot \text{sec} \cdot \text{kg}^{-1}$  calibration factor and most probably the radiometers or single-channel spectrometers with small-volume ( $20 \times 20 \text{ mm}^2$ ) detectors and  $0.003\text{--}0.012 \text{ kBq} \cdot \text{sec} \cdot \text{kg}^{-1}$  calibration factor.

According to estimations the MDA of the measurements is within a range of  $1.3 \text{ kBq per human body}$  if the NC-482-BM single-channel spectrometer with NaI(Tl)  $\varnothing 52 \times 52 \text{ mm}^2$  detector was applied, up to  $7.4 \text{ kBq per human body}$  if the SRP-68-01 gamma-spectrometer was applied in an adult under the 60 seconds of measurement time. Respective values for adolescents and children varied from  $0.8$  to  $5.6 \text{ kBq}$  and from  $0.5$  to  $3.8 \text{ kBq per human body}$ .

It should be emphasized however that our calculations of MDA values are enough optimistic. As the background spectrum in 1986 upon the accident included besides radioactive cesium the lines of Ru-106, Ce-144 and other radionuclides with ones of natural origin among them. It is especially relevant to the scintillation radiometers as their integral counting characteristic is within  $30\text{--}3000 \text{ keV}$  range except the RTF devices. Consequently the real MDA value of devices in conditions of 1986 could be higher than in our estimations. For another thing the effects of background shielding by human body was

тілом людини, який становить до 40 % для дорослих при вимірюваннях одноканальним спектрометром NC-482-BM із детектором  $\varnothing 52 \times 52$  мм<sup>2</sup> та до 15 % для дорослих при вимірюваннях гамма-радіометром СРП-68-01, що вряд чи було враховано при розрахунках 1986 року.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Дози опромінення / І. А. Ліхтарьов, Л. М. Ковган, В. В. Чумак, В. В. Василенко, М. Я. Циганков [та ін.] // Медичні наслідки Чорнобильської катастрофи: 1986-2011 : монографія / за ред. А. М. Сердюка, В. Г. Бебешка, Д. А. Базики. - Тернопіль : ТДМУ, 2011. - С. 35-64.
2. Радіологічні та медичні наслідки Чорнобильської катастрофи. Дози опромінення населення / І. А. Ліхтарьов, Л. М. Ковган, В. В. Чумак, В. В. Василенко, М. Я. Циганков [та ін.] // 25 років Чорнобильської катастрофи. Безпека майбутнього. - Київ : КІМ, 2011. - С. 116-125.
3. Зміни стабільних метаболітів оксиду азоту у дітей- мешканців радіоактивно забруднених територій / Є. І. Степанова, І. Є. Колпаков, В. В. Василенко [та ін.] // Проблеми радіаційної медицини та радіобіології. - 2014. - Вип. 19. - С. 334-344.
4. Ризик розвитку судинної патології сітківки у опроміненних у різному віці осіб внаслідок аварії на ЧАЕС / П. А. Федірко, Т. Ф. Бабенко, Р. Ю. Доричевська [та ін.] // Проблеми радіаційної медицини та радіобіології. - 2015. - Вип. 20. - С. 467-473.
5. Перевозников О. Н. Индивидуальная дозиметрия при радиационных авариях [Текст] / О. Н. Перевозников, А. А. Ключников, В. А. Канченко. - Чернобыль : Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2007. - 199 с.
6. Аналіз еволюції всіх видів моніторингу доз внутрішнього опромінення населення РЗТ та учасників ЛНА за поаварійні роки і розробка рекомендацій з оптимізації його на віддалену перспективу : звіт про НДР (закл.) / ДУ «НЦРМ АМН України» ; керівн. С. Ю. Нечаєв ; викон. : О. М. Перевозников [та ін.]. - Київ, 2009. - С. 30-33.
7. Литвинец Л. А. Обеспечение оперативного мониторинга доз внутреннего облучения населения после аварии на ЧАЭС : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 04.10.94 / Литвинец Леонид Александрович. - Киев, 1994. - 31с.
8. Моисеев А. А. Справочник по дозиметрии и радиационной гигиене / А. А. Моисеев, В. И. Иванов. - Москва : Энергоатомиздат, 1990. - 252 с.
9. Стан і перспективи системи радіаційного моніторингу внутрішнього опромінення на радіоактивно забруднених територіях внаслідок Чорнобильської аварії / О. М. Перевозников, В. В. Василенко, В. О. Пікта [та ін.] // Довкілля та здоров'я. - 2009. - № 1(36). - С. 18-22.
10. Моніторинг доз внутрішнього опромінення населення на пізньому етапі аварії на ЧАЕС з використанням лічильників випромінювання людини / С. Ю. Нечаєв, В. В. Василенко, Н. Ф. Рубель, В. О. Пікта ; ДУ «НЦРМ АМН України». - Київ, 2010. - 24 с.
11. Фантом людини : патент 54408. Україна, УДК Розділ 7 G01T1/161 / Перевозников О. М., Ліхтарьов І. А., Литвинец Л. О., Лівиний Л. П. - Заявлено від 06.07.98; Бюл. № 3 від 17.03.03. - 2 с.

accounted in our study being up to 40 % in adults if measurements were taken at the NC-482-BM spectrometer with  $\varnothing 52 \times 52$  mm<sup>2</sup> detector and up to 15 % in adults if the SRP-68-01 gamma-radiometer was applied in taken measurements. These data hardly were considered in calculations in 1986.

## REFERENCES

1. Likhtarev IA, Kovgan LM, Chumak W, Vasylenko W, Tsygankov MYa et al. [Radiation doses]. In: Health consequences of the Chernobyl catastrophe, AM Serduk, VG Bebeshko, DA Bazyka, eds. Ternopil, TDMU, 2011:35-64. Ukrainian.
2. Likhtarev IA, Kovgan LM, Chumak W, Vasylenko W, Tsygankov MYa et al. [Radiological consequences of the Chernobyl catastrophe. Radiation doses in population]. In: 25 years of the Chernobyl catastrophe. Safety of the future. Kyiv: KIM; 2011. p. 116-25. Ukrainian.
3. Stepanova Yel, Kolpakov IYe, Vasylenko W, Kondrashova VH, Litvinets OM, Zyhalo VM Changes in stable metabolites of nitric oxide in children-residents of radioactively contaminated territories. Probl Radiac Med Radiobiol. 2014;19:334-44.
4. Fedirko PA, Babenko TF, Dorichevska RYu, Garkava NA. Retinal vascular pathology development in the irradiated at different ages as a result of Chernobyl NPP accident. Probl Radiac Med Radiobiol. 2015;20:467-73.
5. Pereviznikov ON, Kluchnikov VA, Kanchenko VA. [Individual dosimetry in radiation accidents]. Kyiv: Institute of the NPP Safety Problems of the MH of Ukraine; 2007. 199 p. Russian.
6. Nechayev SU, Perevoznikov OM et al. [Evaluation of all types of monitoring of internal radiation doses in population of RCT and ACU participants in post-accident years and development of recommendations of its optimization for the further prospects]. Research report (final). SE «RCRM of the AMS of Ukraine», Kyiv, 2009: 30-3. Ukrainian.
7. Litvinets LA. [Maintenance of operative monitoring of the internal radiation doses in population after the ChNPP accident]. Author's synopsis of the thesis of candidate of technical sciences. Kyiv; 1994. 31 p. Russian.
8. Moiseyev AA, Ivanov VI. [Reference book on dosimetry and radiation hygiene]. Moscow: Energoatomizdat Publ.; 1990. 252 p. Russian.
9. Perevoznikov OM, Vasylenko W, Pikta VO et al. [State and perspectives of radiation monitoring system of internal irradiation at the radiologically contaminated territories after the Chernobyl accident]. Dovykillya and Zdorovya 2009;1(36):18-22. Ukrainian.
10. Nechayev SU, Vasylenko W, Rubel NF, Pikta VO; SE «RCRM of the AMS of Ukraine» [Monitoring of the internal radiation doses in a late period of the ChNPP accident using the whole-body counters]. Kyiv; 2010. 24 p. Ukrainian.
11. Perevoznikov OM, Likhtarev IA, Lytvynets LO, Linyviy LP. [Human phantom]. Patent 54408. Ukraine, UDK Section 7

12. Минимально детектируемая активность. Основные понятия и определения / А. Г. Исаев, В. В. Бабенко, А. С. Казимиров, С. Н. Гришин, С. М. Гевлев // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. - 2010. - Вип. 13. - С. 103-110.
13. Костеж А. Б. Прикладная ядерная спектрометрия радионуклидов уран-ториевых рядов в пробах окружающей среды / А. Б. Костеж, Т. В. Лаврова. - Киев : Випол, 2011. - С. 188-193.
14. Кайдановский Г. Н. Калибровка радиометров для массового контроля инкорпорированных нуклидов  $^{131}\text{I}$ ,  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$ , выполненных с помощью добровольцев / Г. Н. Кайдановский, Е. Н. Долгирев // Радиация и риск. - 1996. - Вып. 7. - С. 76-86.
- G01T1/161. Applied on 06.07.98. Bull. #3 from 17.03.03. Ukrainian.
12. Isayev AG, Babenko W, Kazimiriv AS, Grishin SN, Gevlev SM. [Minimal detected activity. Basic concepts and definitions]. Safety Issues of the Nuclear Power Plants and Chornobyl 2010;(13):103-10. Russian.
13. Kostezh AB, Lavrova TV. [Applicable nuclear spectrometry of the uranium-thorium radionuclide rows in environmental samples]. Kyiv: Vipol; 2011. p. 188-93. Russian.
14. Kaidanovsky Gn, Dolgirev YeN. [Calibration of radiometers for mass-scale monitoring of incorporated nuclides  $^{131}\text{I}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ , and  $^{137}\text{Cs}$  conducted with involvement of volunteers]. Radiation and Risk. 1996;(7):76-86. Russian.

*Стаття надійшла до редакції 05.07.2016*

*Received: 05.07.2016*