

УДК: 613.648.4: 614.876: 621.039.58

В. Чумак<sup>1</sup>✉, Н. Деняченко<sup>2</sup>, В. Волоський<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Державна установа “Національний науковий центр радіаційної медицини Національної академії медичних наук України”, 53, вул. Мельникова, м. Київ, 04050, Україна

<sup>2</sup>ПАТ Науково-дослідний інститут радіаційного захисту АТН України, Мельникова 53, Київ, 04050, Україна

## ЕНЕРГЕТИЧНІ ТА КУТОВІ ЗАЛЕЖНОСТІ ПОШИРЕНИХ ТИПІВ ІНДИВІДУАЛЬНИХ ДОЗИМЕТРІВ У ДЗЕРКАЛІ ПЕРШОГО НАЦІОНАЛЬНОГО ІНТЕРКАЛІБРУВАННЯ ЛАБОРАТОРІЙ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ДОЗИМЕТРИЧНОГО КОНТРОЛЮ УКРАЇНИ

Поглиблений аналіз результатів Першого національного інтеркалібрування лабораторій ІДК України дозволив вивчити енергетичні та кутові залежності найбільш поширених типів індивідуальних дозиметрів та дозиметричних систем. Всього лабораторії-учасниці інтеркалібрування використовують 9 різних типів дозиметричних систем – автоматичних, напівавтоматичних та ручних. Було встановлено, що енергетичні залежності поширених в Україні типів дозиметрів в основному відповідають літературним даним для відповідних матеріалів ТЛД детекторів (LiF:Mg,Cu,P, LiF:Mg,Ti та Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C), але, завдяки особливостям корпусів (фільтрів) дозиметрів та дозових алгоритмів, для окремих систем ці енергетичні залежності можна покращити (компенсувати). Кутові залежності відгуку виявились більш сильно вираженими: тільки дві системи продемонстрували слабку залежність відгуку від кута опромінення, для решти систем при великих кутах падіння ( $\alpha=60^\circ$ ) відмічається завищення показів індивідуальних дозиметрів.

**Ключові слова:** інтеркалібрування, індивідуальний дозиметричний контроль, енергетичні залежності відгуку дозиметрів, кутові залежності відгуку дозиметрів.

*Проблеми радіаційної медицини та радіобіології. 2015. Вип. 20. С. 257–268.*

✉ Чумак Вадим Віталійович, e-mail: chumak@leed1.kiev.ua

V. Chumak<sup>1</sup>✉, N. Deniachenko<sup>2</sup>, V. Volosky<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Institution “National Research Center for Radiation Medicine of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine”, Melnykov str., 53, Kyiv, 04050, Ukraine

<sup>2</sup>Radiation Protection Institute, ATS Ukraine, Melnikova 53, Kuiv, 04050, Ukraine

## Energy and angular dependences of common types of personal dosimeters in the mirror of the First national intercomparison of individual dosimetric monitoring laboratories in Ukraine

In-depth analysis of the results of the First National Intercomparison of individual dosimetry laboratories in Ukraine has revealed energy and angular responses of the most common types of personal dosimeters and dosimetric systems. Participating laboratories use 9 different types of dosimetric systems – automatic, semi-automatic and manual. It was found that energy dependences of the most common dosimeter types in Ukraine generally correspond to the literature data on respective TLD materials (LiF:Mg,Cu,P, LiF:Mg,Ti and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C), however, due to peculiarities of holders (filters) and dose algorithms, for some dosimetry systems the energy dependences can be improved (compensated). Angular dependences proved to be more pronounced: only two systems revealed weak dependence of response on the incident angle, for other systems at large angles ( $\alpha=60^\circ$ ) dosimeters overestimate true dose values.

**Key words:** intercomparison, individual dosimetric monitoring, energy dependence, angular dependence.

*Problems of radiation medicine and radiobiology. 2015;20:257-268.*

### ВСТУП

Індивідуальний дозиметричний контроль (ІДК) здійснюється лабораторіями чи службами ІДК із використанням спеціалізованих індивідуальних дозиметрів. Не всі дозиметричні системи, що використовуються нині в Україні, є сучасними і багато з них розроблялись задовго до впровадження концепцій та дозиметричних величин, якими користується весь світ зараз. Тому у рамках загальних зусиль із підвищення рівня радіаційного захисту при професійному опроміненні постає прикладна задача оцінити чи відповідають сучасним вимогам дозиметричні системи, які широко використовуються в Україні. Багаторічний досвід передових країн свідчить, що одним із найбільш ефективних способів об'єктивного контролю якості діяльності служб та лабораторій ІДК є проведення так званих інтеркалібрувань [1]. Інтеркалібрування – сліпий тест, під час якого дозиметричні лабораторії-учасниці інтеркалібрування визначають дози у дозиметрах, опроміненіх у різних полях випромінювання, та з дозами, заздалегідь невідомими для учасників тесту, і співставляють їх із референтними (умовно істинними) значеннями доз. У 2014 р. у рамках “Загальнодержавної соціальної програми поліпшення стану безпеки, гігієни праці та виробничого середовища на 2014–2018 роки”, затвердженої Законом України від 04 квітня 2013 року за № 178-VII вперше в Україні було проведено “Перше національне інтеркалібрування” (ПНІ), у якому ННЦРМ виступав у ролі Координатора. Аналіз результатів Першого національного інтеркалібрування (ПНІ), окрім висновку відносно відповідності якості

### INTRODUCTION

Individual dosimetric monitoring (IDM) is carried out by IDM laboratories or services using specialized individual dosimeters. Not all dosimetric systems, which are used currently in Ukraine are modern and many of them had been designed well before implementation of the concepts and dosimetric quantities which are used now worldwide. That's why within the general efforts to increase the level of radiation protection for occupational exposure some particular problem appears – to evaluate if dosimetric systems widely used in Ukraine meet the modern requirements. Years of experience of advanced countries shows that one of the most efficient ways to objectively control the quality of IDM laboratories and services is to implement so-called intercomparisons [1]. Intercomparison – a blind test for dosimetric laboratories-participants by measuring doses in dosimeters, that were irradiated in various radiation fields with doses that are not known to participants beforehand, and comparing them (results) with the reference (conventional true) doses. In 2014 under auspices of the “National social program of improvement of the safety, occupational health and professional environment for 2014–2018”, approved by the state law of Ukraine №178-VII from April 4th 2013, the “First national intercomparison” (FNI) where NRCRM acted as the Coordinator had been performed for the first time in Ukraine. Analyses of the FNI results, in addition to the general conclusion if results are matching requirements of the stan-

вимірювань вимогам стандарту, дозволяє також оцінити ряд специфічних характеристик дозиметричних систем, зокрема розглянути у комплексі роботу дозиметра (матеріалу детектора та корпусу), оцінити його енергетичні та кутові залежності, перевірити точність калібрування дозиметрів, узагальнити результативність визначення доз.

## МЕТА

Метою даного дослідження було на основі даних ПНІ дослідити кутові та енергетичні залежності відгуку поширених в Україні типів індивідуальних дозиметрів.

## МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

В основу дизайну Першого національного інтеркалібрування лабораторій ІДК було покладено добре апробований дизайн інтеркалібрувань ЄВРАДОЗ [1, 2], який загалом відповідає вимогам міжнародного стандарту ISO 14146 [3]. Між тим, слід зауважити, що на відміну від рекомендацій ISO 14146, дозиметри для контрольного опромінення не відбиралися представником Координатора у випадковий спосіб із наголосом на те, щоб лабораторіями-учасницями не вживалися будь-які кроки для спеціального відбору (найкращих) дозиметрів та їхньої обробки у особливий спосіб, що відрізняється від звичайних процедур. Крім того, Координатор інтеркалібрування не мав повноважень та не виконував функції органу акредитації. Натомість, завданням Координатора було забезпечити об'єктивне і безстороннє виконання плану інтеркалібрування та проведення аналізу й узагальнення результатів Інтеркалібрування на основі об'єктивних критеріїв. Оцінювання результатів, продемонстрованих лабораторіями-учасницями, здійснювалось на основі вимог міжнародного стандарту ISO 14146. Успішним вважався результат лабораторії, якщо не менше, ніж 90 % результатів визначення доз потрапляло у "трубу допусків":

$$\frac{1}{F} \left( 1 - \frac{2H_0}{H_0 + H_C} \right) \leq R \leq F \left( 1 + \frac{H_0}{2H_0 + H_C} \right) \quad (1)$$

де  $R$  – відношення вимірюваного значення дози  $H_S$  до умовно істинного значення  $H_C$

$$\left( R = \frac{H_S}{H_C} \right),$$

$F$  – параметр, що характеризує максимальне відносне відхилення при високих дозах; згідно з ISO 14146 [3] та МКРЗ 75 [4],  $F=1,5$ ,

allow to evaluate a number of specific characteristics of dosimetric systems, in particular to overview overall performance of a dosimeter (detector material and holder), to evaluate its energy and angular dependences, to check the accuracy of dosimeter calibration, to generalize efficiency of doses determination.

## OBJECTIVE

The objective of this study was to investigate angular and energy dependences of response of the widespread individual dosimeters in Ukraine by the FNI data.

## MATERIALS AND METHODS

Well tested intercomparison design of EURADOS [1, 2] which in general matches the requirements of the international standard ISO 14146 [3], was used as a basis of the design of the First national intercomparison of IDM laboratories. Meanwhile it should be mentioned that unlike the ISO 14146 recommendations, the dosimeters for the test irradiations were not picked by a Coordinator agent randomly in order to prevent any attempts for laboratories-participants to choose (best) dosimeters and to process them in a special way that differs from standard procedures or protocols. Moreover, the Coordinator of the intercomparison had no authority and didn't serve as the accreditation body. In turn, the task of the Coordinator was to provide unbiased and impartial following the intercomparison schedule and to carry out the analyses and generalizing of the Intercomparison results by objective criteria. An evaluation of results showed by the participants was performed basing on the requirements of the international standard ISO 14146. The result of the laboratory was assumed to be successful if not less than 90% of results fall get into "trumpet curve":

where  $R$  – ratio of measured dose value  $H_S$  to conventional true (nominal, reference) value  $H_C$

$F$  – parameter that show maximum relative deviance for high doses; according to ISO 14146 [3] and ICRP 75 [4],  $F=1.5$ ,

$H_0$  – нижня межа діапазону доз, що вимірюються; згідно з ISO 14146,  $H_0=0,2$  мЗв.

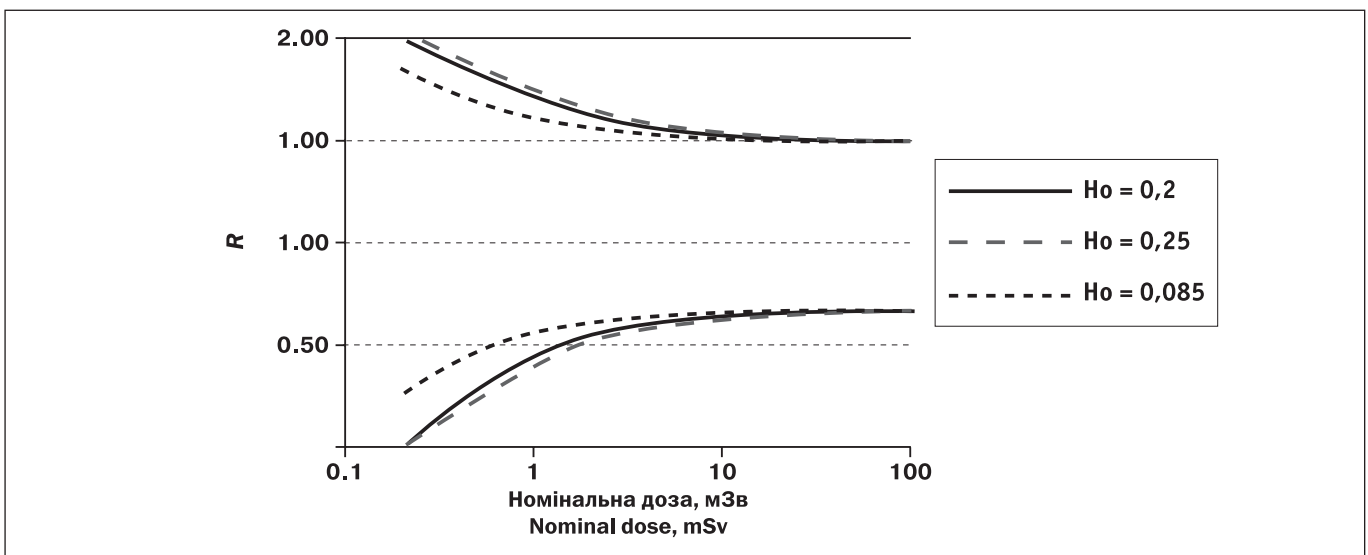
У загальному вигляді величина  $H_0$  обирається відповідно до тривалості періоду моніторингу. Наприклад, для періоду один місяць нижня межа повинна бути не менше ніж 1 мЗв (рівень реєстрації) / 12 (періодів моніторингу протягом року) = 0,085 мЗв. Саме таке значення зазвичай застосовується при оцінюванні результатів інтеркалібрувань EURADOS [1]. Між тим, в Україні часто період моніторингу становить 1 квартал (чотири періоди моніторингу протягом року), тому альтернативним значенням параметру може бути  $H_0=1$  мЗв / 4 = 0,25 мЗв. На рис. 1 проілюстровано вплив величини параметру  $H_0$  на “строгість” вимог до точності визначення доз: видно, що чим більше значення  $H_0$ , тим менш строгим є критерій, особливо у регіоні менших доз. Оскільки в Україні практикуються обидва поширених періоди моніторингу – місячний (персонал АЕС, подекуди жінки віком до 45 років у інших галузях) та кварталний (решта персоналу категорії А) – нами для розбудови “труби допусків” було обрано проміжне значення  $H_0 = 0,2$  мЗв, яке впливає з рекомендацій ISO 14146.

Контрольні опромінення дозиметрів здійснювались в акредитованих метрологічних лабораторіях України (ДП “Київоблстандартметрологія” – лабораторія № 1) та Бельгії (Бельгійський центр ядерних досліджень SCK-CEN – лабораторія № 2) у полях фотонного (гамма-/рентгенівського) випромінювання в одиницях еквіваленту індивідуальної дози  $H_p(10)$  та  $H_p(0.07)$  згідно з міжнародним стандартом ISO 4037 [5]. Для опромінення були використані наступні якості опромінення згідно з ISO 4037 [5] на дже-

$H_0$  – lower limit of the dose range, that can be measured; according to ISO 14146,  $H_0=0.2$  mSv.

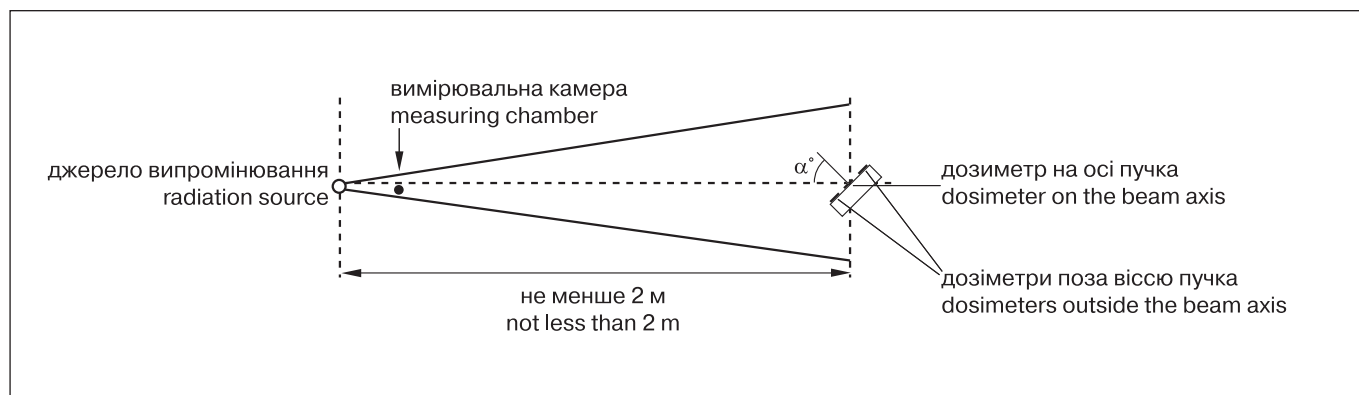
In general the value  $H_0$  is chosen according to the duration of the monitoring period. For example, for one month period the lower limit should be not less than 1 mSv (registration level) / 12 (monitoring periods within one year) = 0.085 mSv. This is the value that is usually used for evaluating of the EURADOS intercomparisons [1]. Meanwhile in Ukraine the monitoring period is often equals to 3 months (four monitoring period for one year), so alternative value of the parameter can be  $H_0=1$  mSv / 4 = 0.25 mSv. Fig. 1 illustrates the effect of the magnitude of the value  $H_0$  on the “strictness” of the requirements for accuracy of dose defining: one see, that the higher value of  $H_0$ , the less strict is the criterion, especially in a range of low doses. As both common periods are practiced in Ukraine – monthly (NPP staff, women aged under 45 in other areas) and quarterly (rest of the category A staff) – we used intermediate value  $H_0 = 0.2$  mSv to build “trumpet curve”, that follows from ISO 14146 recommendations.

Control irradiations of the dosimeters were provided by authorized metrological laboratories of Ukraine (SOE “Київоблстандартметрологія” – laboratory #1) and Belgium (Belgian nuclear research centre SCK-CEN – laboratory #2) in photon fields (gamma/x-ray) radiation in units of personal dose equivalents  $H_p(10)$  and  $H_p(0.07)$  according to international standard ISO 4037 [5]. Radiation qualities according to ISO 4037 [5] that were used for irradiation were as follows (Table 1):



**Рисунок 1.** Труби допусків для різних значень  $H_0$

**Figure 1.** Trumpet curves for different  $H_0$  values



**Рисунок 2.** Схема опромінення дозиметрів при кутах  $\alpha = 0^\circ, 45^\circ, 60^\circ$

**Figure 2.** The scheme of dosimeters irradiation for angles  $\alpha = 0^\circ, 45^\circ, 60^\circ$

релакс рентгенівського випромінювання (табл. 1): N-40 (2 точки), N-60 (7 точок при кутах опромінення  $\alpha=0^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  рис. 2), та ізотопних джерелах S-Cs (12 точок), S-Co (3 точки), опромінення здійснювалось на стандартному водному фантомі ISO [6]. Умови опромінення обирались таким чином, щоб вони відображали типові умови опромінення персоналу категорії А в Україні.

## РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Відношення “результат” / “номінальна доза” ( $R$ ) повинно потрапляти у трубу допусків згідно зі стандартом ISO 14146 [3]. На рис. 3 показані усі результати (незалежно від дози та якості опромінення), для кожного з учасників із позначенням дозиметричної системи, що ним використовувалась (всього учасники використовують 9 різних типів дозиметричних систем – див. табл. 2).

На рисунку результати лабораторій-учасниць відсортовано за наступними критеріями: відсоток потрапляння результатів до “труби допусків”, потім – точність відтворення результатів (коефіцієнт варіації) при опроміненні на джерелі S-Cs. Візуально усі дані на рис. 3 можна розподілити на 3 групи

- такі, що задовольняють вимогам ISO 14146 – область А;
- такі, що не задовольняють вимогам ISO 14146, однак відхилення не пов’язані з людським фактором, а скоріш із обмеженням певних дозиметричних систем – область Б;
- такі, які характеризуються великою дисперсією результатів, очевидно, через вади застосування дозиметричних систем – область В;

Розглянемо більш докладно результати ПНІ у розрізі систем, що використовуються для ІДК персоналу. У автоматичних системах типу Harshaw використовуються подібні за своїми метрологічними показниками зчитувачі моделей 6600, 6600plus та 8800 із детекто-

N-40 (2 points), N-60 (7 points for irradiation angles  $\alpha=0^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  Fig. 2), and isotope sources S-Cs (12 points), S-Co (3 points), irradiation were conducted on the standard ISO water phantom [6]. The irradiation conditions were selected this way to represent typical irradiation conditions for category A staff in Ukraine.

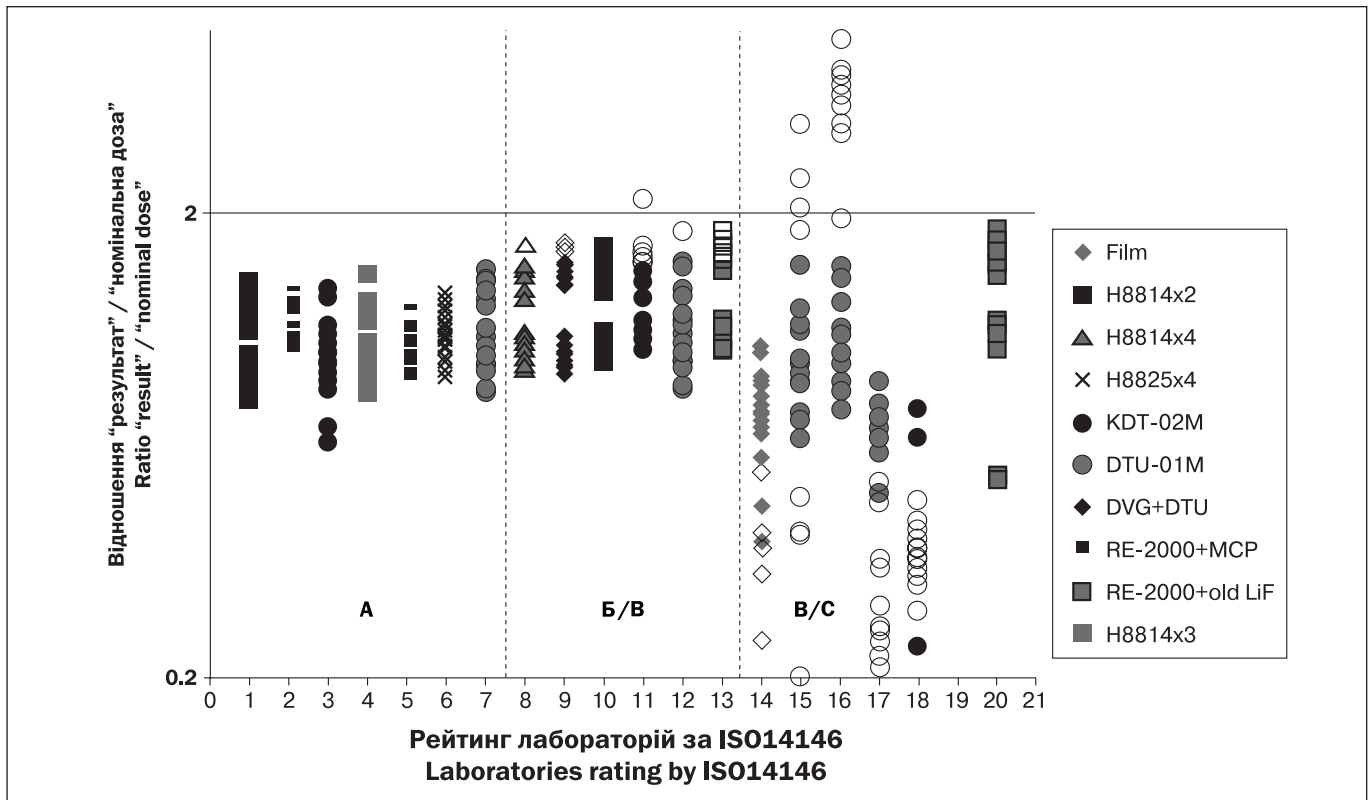
## RESULTS AND DISCUSSIONS

The ratio “result” / “nominal dose” ( $R$ ) has to get into the trumpet curve according to ISO 14146 standard [3]. Fig. 3 shows all results (irrespective to dose and radiation quality), for each of the participants with the marks about dosimetric system that one used (overall there were 9 different types of dosimetric systems used by participants – see Table 2)

On the figure the results of the laboratories-participants were sorted by the following criteria: percentage of the results got into “trumpet curve”, next – an accuracy of results reproducing (variation coefficient) for irradiating with S-Cs source. Visually all data on the Fig. 3 can be divided into 3 groups

- those who match the requirements ISO 14146 – region A;
- those who does not match the requirements ISO 14146, but deviations are not related to human factor, but rather caused by the limitations of a certain dosimetric system – region B;
- those who is characterized by high variance of the results, obviously, due to errors in dosimetric systems application – region C;

Let’s consider more precisely results of FNI in the context of the systems used for occupational IDM. For automatic systems like Harshaw similar in performance (reader models 6600, 6600plus and 8000) with detectors based on LiF:Mg,Ti are used,



**Рисунок 3.** Результати всіх лабораторій (відношення “результат” / “номінальна доза”) залежно від дозиметричної системи. Порожні (не зафарбовані) точки – результат, що не потрапив до труби допусків ISO 14146. Пояснення типів дозиметричних систем – див. табл. 2.

**Figure 3.** Results of all laboratories (ratio “result” / “nominal dose”) depending on the dosimetric system. Empty (not colored) points – result, that did not get into trumpet curve ISO 14146. Explanation for dosimetric systems types – see Table 2.

**Таблиця 1**

Якості опромінення [5] та номінальні дози, які були застосовані при контрольному опроміненні дозиметрів

**Table 1**

Radiation qualities [5] and nominal doses that were used for test irradiation of dosimeters

Серія №	Якість опромінення згідно ISO 4037a	Кут падіння опромінення	Номінальне значення $H_p(10)$ , мЗв	Кількість дозиметрів
Series #	Radiation quality according to ISO 4037*	Incidence irradiation angle	Nominal value of $H_p(10)$ , mSv	Number of dosimeters
1	S-Cs	0°	0.5	2
2	S-Cs	0°	2	3
3	S-Cs	0°	5	4
4	S-Cs	0°	20	2**
5	S-Cs	0°	60	1
6	S-Co	0°	5	3
7	N-60	0°	5	3
8	N-60	45°	5	2
9	N-60	60°	5	2
10	N-40	0°	5	2

Примітка. \* – Джерела випромінювання (ISO 4037): N-40: рентгенівське випромінювання, серія вузького спектра,  $\bar{E} = 33$  кеВ; N-60: рентгенівське випромінювання, серія вузького спектра,  $\bar{E} = 48$  кеВ; S-Cs: джерело  $^{137}\text{Cs}$ ,  $\bar{E} = 662$  кеВ; S-Co: джерело  $^{60}\text{Co}$ ,  $\bar{E} = 1250$  кеВ.

\*\* – опромінювались у двох різних метрологічних лабораторіях.

Note. \* – Radiation sources (ISO 4037): N-40: x-rays, narrow spectrum series,  $\bar{E} = 33$  keV; N-60: x-rays, narrow spectrum series,  $\bar{E} = 48$  keV; S-Cs:  $^{137}\text{Cs}$  source,  $\bar{E} = 662$  keV; S-Co:  $^{60}\text{Co}$  source,  $\bar{E} = 1250$  keV.

\*\* – irradiated in different metrology laboratories.

## Таблиця 2

Типи дозиметричних систем, які взяли участь у Першому національному інтеркалібруванні

Table 2

Dosimetric systems types, that took part in the First national intercomparison

Система (зчитувач)	Матеріал детектору	Тип корпусу	Дозиметричний алгоритм	Умовне позначення (рис.3)
System (reader)	Detector material	Holder type	Dosimetric algorithm	Symbol (fig. 3)
Harshaw 8800	TLD-100	Harshaw 8814/1111	-	H8814x2
Harshaw6600	TLD-100	Harshaw 8814/0110	NVLAP	H8814x4
Harshaw 6600	TLD-700, TLD-600	Harshaw 8814/7776	DOELAP	H8814 x3
Harshaw 6600	TLD-700, TLD-600	Harshaw 8825/7776	HANFORD/DOELAP	H8825x4
КДТ-02	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :C	ДПГ-03	-	KDT-02M
ДТУ	LiF:Mg,Ti	ДТУ_01	-	DTU-01M
ДВГ	LiF:Mg,Ti	ДТУ_01	-	DVG+DTU
Rados RE-2000	LiF:Mg,Cu,P	Alnor	-	RE-2000+MCP
Rados RE- 2000	LiF:Mg,Ti	Alnor	-	RE-2000+oldLiF

рами на основі LiF:Mg,Ti, але зустрічаються варіації в плані типу корпусу (а відтак – набору фільтрів), різновиду основного матеріалу (TLD-100, TLD-600 або TLD-700), та алгоритму, що використовується для оцінки дозиметричних величин – див. табл. 2.

На рис. 4 зображені енергетичні залежності різних варіантів систем Harshaw, що брали участь в інтеркалібруванні. Для усунення ймовірних розбіжностей зумовлених різним калібруванням, дані були нормовані по середньому  $R_u$  точці S-Cs [5]. Можна побачити, що існують значні розбіжності результатів різних учасників для низьких енергій (33кеВ та 48кеВ), натомість для високих енергій (кілька сотень кеВ) розбіжності є несуттєвими.

З рис. 4 видно, що найкращим є результат лабораторії 23 з дозиметром Harshaw 8825/7776. Це зумовлено тим, що даний корпус (тип 8825) містить додатковий фільтр з олова, а для оцінки дози використовується спеціальний алгоритм. Учасники 23 та 34, що використовують однаковий набір детекторів (тип 7776 означає, що використовуються три детектори з матеріалу TLD-700 та один з матеріалу TLD-600) продемонстрували досить відмінні енергетичні залежності, очевидно виключно за рахунок різних корпусів та алгоритмів оцінки доз. Порівняння результатів учасників 51 та 24 (однакові дозиметри, різні зчитувачі) вказує на відсутність впливу типу зчитувача на результати визначення доз.

У системах ДТУ також використовується матеріал детекторів LiF:Mg,Ti, але від іншого виробника та вироблений в інший спосіб. Так, дозиметри Harshaw містять детектори, вирізані з монокристалу, а в ДТУ детектори зроблені з пресованого полікристалічного LiF:Mg,Ti, що також відображається на дозиметрич-

but some variances in terms of the holder type occur (and therefore – a set of filters), variety of dosimetric material (TLD-100, TLD-600 or TLD-700), and an algorithm that is used for dosimetric quantity estimation – see Table 2.

Energy dependences for different versions of the Harshaw systems that took part in the intercomparison are illustrated on Fig. 4. To remove possible divergences caused by different calibration, this data was normalized by mean  $R$  at the S-Cs point [5]. One can see, that considerable divergences exist for results from different participants for low energies (33 keV and 48 keV), in turn for high energies (few hundreds of keV) divergences are not significant.

Fig. 4 shows that the result of the laboratory 23 with Harshaw 8825/7776 dosimeter is the best. This is due to use of particular older type (type 8825) that includes additional tin filter, and a special algorithm is used for dose estimation. Participants 23 and 34, who use the same set of detectors (type 7776 indicates that three detectors made of material TLD-700 and one of material TLD-600 are used), showed rather different energy dependences, obviously exclusively due to a different holders and algorithms of doses estimation. Comparison of the results of participants 51 and 24 (same dosimeters, different readers) shows that the type of a reader has no influence on the results.

For DTU systems LiF:Mg,Ti detectors are also used, but from another manufacturer and manufactured in a different way. So, Harshaw dosimeters include detectors cut from a single crystal, and for DTU detectors are made from pressed LiF:Mg,Ti polycrystalline material, that is also appears in dosi-

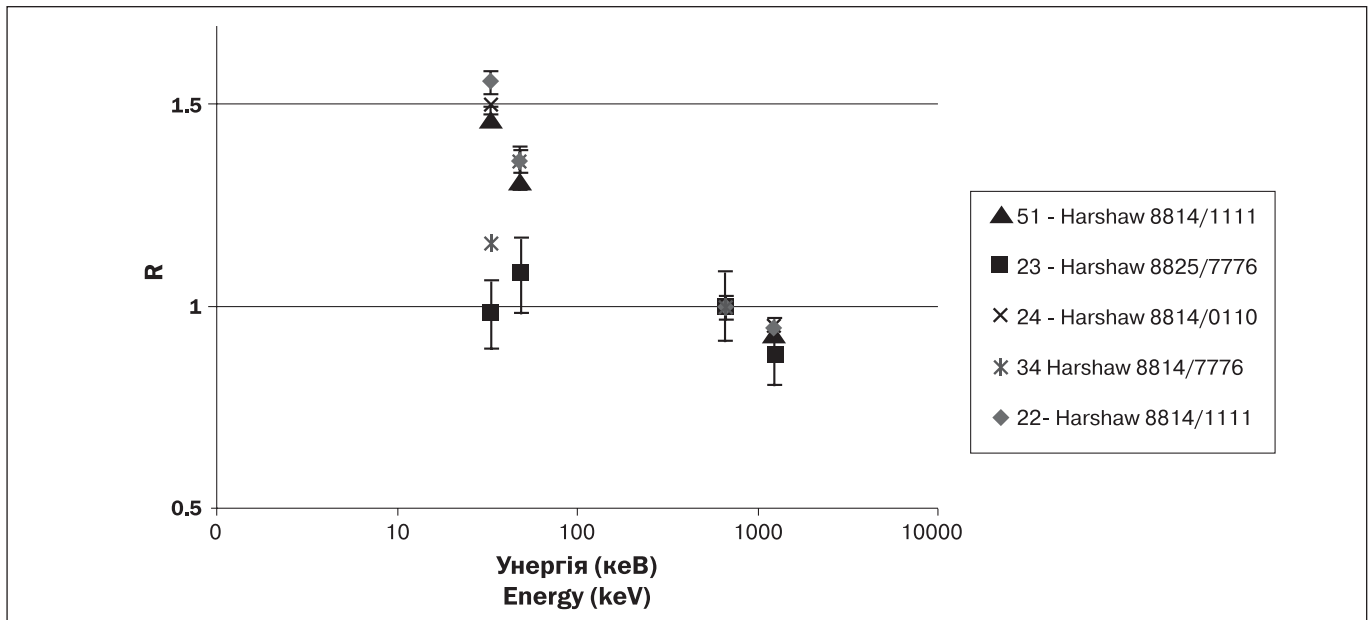


Рисунок 4. Енергетичні залежності дозиметрів типу Harshaw

Figure 4. Energy dependences of Harshaw type dosimeters

них характеристиках. ДТУ – ручна система, де визначення дози відбувається по максимуму амплітуди піку кривої висвітлювання (піковий метод), на відміну від автоматичних систем (Harshaw, RADOS), де реєструється світлосума в певному діапазоні температур (інтегральний метод). Відомо, що піковий метод є менш стійким до шумів та різного типу флюктуацій, відтак, з цієї причини для дозиметрів такого типу (ДТУ) спостерігається великий розкид результатів. Лабораторія 42 для зчитування дозиметрів ДТУ використовує напівавтоматичну систему ДВГ, в якій результат – інтеграл кривої висвітлювання, що, як і очікується, покращує точність визначення доз та відтворюваність результатів. У даному випадку, ймовірно, відмінності зумовлені використанням детекторів різних виробників та детекторів різних партій (різниця, наприклад, в кількості домішок).

Дві з трьох лабораторій з автоматичними системами RADOS використовують більш сучасний матеріал LiF:Mg,Cu,P, ще одна користується LiF:Mg,Ti російського виробництва. Як і очікувалось, для низьких енергій результати значно кращі для LiF:Mg,Cu,P, що цілком співпадає з літературними даними [7].

Досить цікавими виявились результати лабораторій, що використовують систему КДТ-02 з дозиметрами ДПГ-03 (матеріал детектора Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C). Так, одна з лабораторій показала 100 % потраплення до труби допуску, інша ж показала незадовільний результат у регіоні низьких енергій випромінювання. Розбіжність між двома, за рештою показників –

metric characteristics. DTU is a manual system, where dose determining is made by the amplitude maximum peak of the glow curve (peak method), unlike automatic systems (Harshaw, RADOS), where the amount of light in certain temperature range is scored (integral method). It is known that the peak method is less resistant to noise and fluctuations of various types, so for this reason, for this particular type of dosimeters (DTU), the great variation in the results is observed. Laboratory 42 used semiautomatic DVG for reading DTU dosimeters in which the result – the integral of the glow curve, as it's expected, improves accuracy of dose and reproducibility of the results. In this holder, probably, the differences are caused by the use of detectors from different manufacturers and detectors of various production batches (the difference, for example, in the amount of impurities).

Two of the three laboratories with automatic RADOS systems use more modern material LiF:Mg,Cu,P, another one uses LiF:Mg,Ti of Russian production. As expected, for a low energies results for LiF:Mg,Cu,P are significantly better, which is consistent with the literature [7].

The results of laboratories that use the system KDT-02 with the dosimeters DPG-03 (detector material is Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C) were quite interesting. For example, one of the laboratories showed 100% fit into the trumpet curve, while the other showed unsatisfactory results in the range of low-energy radiation. According to the rest of characteristics, the discrep-



ідентичними, лабораторіями полягає в тому, що одна (менш успішна) надала для участі у інтеркалібруванні дозиметри без алюмінієвої заціпки-тримача, а інша (успішна) використовувала дозиметри у штатній комплектації. Очевидно, заціпка потрібна не лише для механічного скріплення корпусу дозиметра, але й забезпечує необхідну компенсацію вкладу в дозу від зворотного розсіяння на тілі людини.

Ще одною важливою характеристикою дозиметричного обладнання є кутова залежність відгуку. На рис. 3 зображені кутові залежності дозиметричних систем, що взяли участь в інтеркалібруванні. Для ізольованої оцінки кутової залежності відгуку, дані були віднормовані на показники для нормального падіння випромінювання ( $\alpha = 0^\circ$  – див. рис.2).

Видно, що для більшості дозиметрів спостерігається завищення дози при збільшенні кута. Винятком є дозиметри ДПГ-03, які навіть на великих кутах показують гарні результати. Сильно виражені кутові залежності можуть бути спричинені недосконалою конструкцією корпусу, яку можна добре проілюструвати на прикладі дозиметру ДТУ (рис. 6а). Так, при великих кутах опромінення основний фільтр рентгеновського випромінювання (елемент 2, рис. 6б) не забезпечує екранування детекторів.

При більших енергіях ефект фільтрації алюмінієвим фільтром відносно знижується, а основний фільтр з пластику забезпечує достатню ізотропність фільтрації у широкому діапазоні кутів падіння випромінювання.

Таким чином, додатковий аналіз результатів Першого національного інтеркалібрування дозволив визначити базові дозиметричні характеристики основних типів дозиметричних систем ІДК, що використовуються в Україні для контролю професійного опромінення персоналу категорії А. Як впливає з цього аналізу, різні типи дозиметричних систем (усього 9 різних типів) не є рівноцінними, деякі з них мають принципові вади, які значно звужують галузь застосування цього обладнання.

З точки зору енергетичних залежностей відгуку дозиметрів (очевидно, найбільш важливий параметр з точки зору використання дозиметрів у широкому спектрі умов опромінення на робочих місцях), найбільш універсальними виявилися (1) дозиметри на основі ТЛД матеріалу LiF:Mg,Cu,P, (2) дозиметри на основі класичного матеріалу LiF:Mg,Ti, але у корпусах відповідної конструкції, які разом із застосуванням дозиметричних алгоритмів, дозволяють компенсувати енергетичну залежність цього матеріалу, а також, як не дивно, (3) дозиметри ДПГ-03 (матеріал

анци between these two identical laboratories is that the one (less successful) provided dosimeters without its aluminum latch-holder for the participation in intercomparison, and the other one (successful) used the dosimeters in standard assembly. Obviously latch-holder is needed not only for mechanical fastening the holder of dosimeter, but also provides the necessary compensation for the contribution to the backscattering dose from the human body.

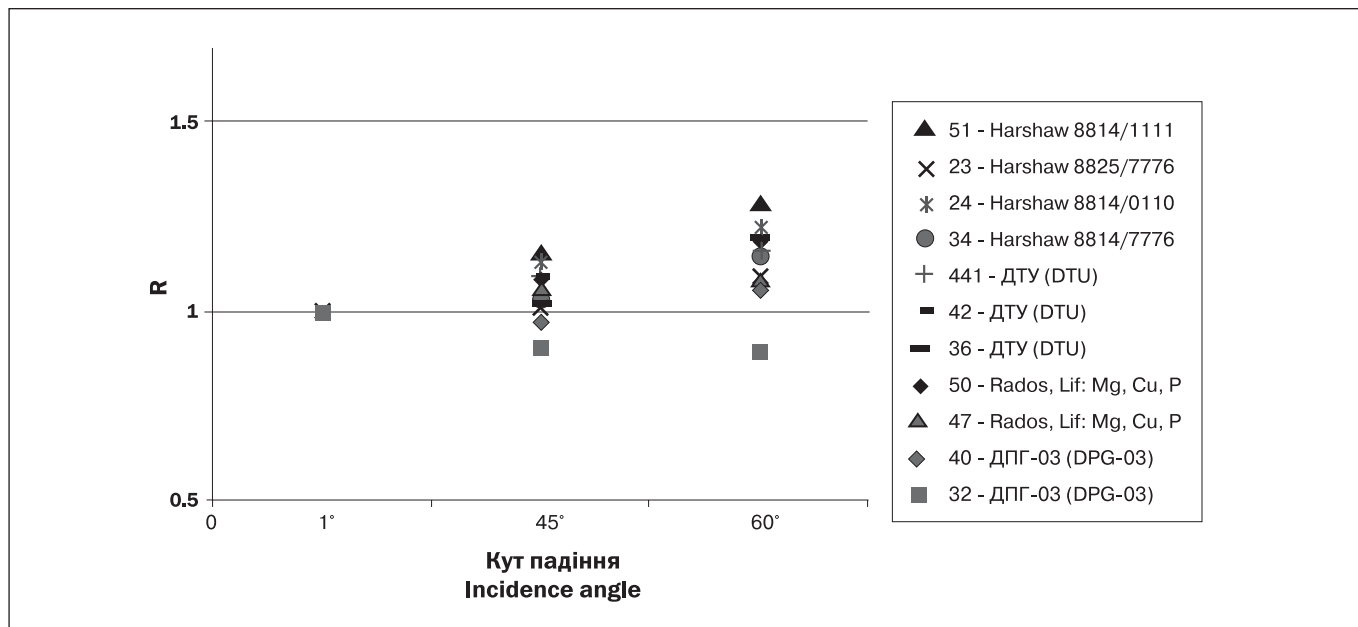
Another important characteristic of dosimetric equipment is angular dependence of the response. Fig. 3 shows the angular dependence for dosimetry systems that participated in intercomparison. For separate estimation of angular dependence of response the data was normalized by the values for normal incidence radiation ( $\alpha = 0^\circ$  – see. Fig. 2).

It is seen that for the most of the dosimeters overestimating of the dose while increasing the angle is observed. The exception is dosimeters DPG-03, which, even at high angles show good results. Strongly expressed angular dependence can be caused by imperfect holder design, which can be well illustrated by the dosimeter DTU (Fig. 6). So at high incident angles the main X-ray filter (item 2, Fig. 6b) does not provide shielding of the detectors.

For higher energies the filtering effect with aluminum filter is relatively reduced, and main plastic filter provides sufficient isotropy of filtration in a wide range of angles of incidence of radiation.

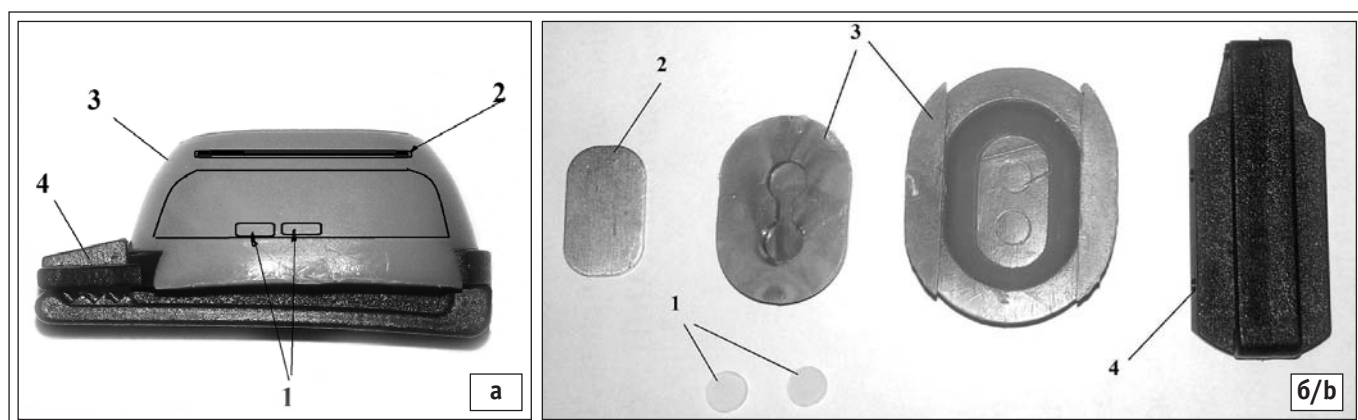
Thus, additional analysis of the First National Intercomparison made it possible to determine the basic dosimetric characteristics of the main types of IDM dosimetry systems used in Ukraine for monitoring of occupational exposure category A personnel. As it follows from this analysis, different types of dosimetry systems (9 different types in total) are not equal, and some of them have fundamental flaws that significantly narrow application scope of this equipment.

In terms of energy dependences of the dosimeters (obviously, the most important parameter in terms of the use of dosimeters in a wide range of exposure conditions at the workplaces), the most universal were (1) dosimeters based on TLD material LiF:Mg,Cu,P, (2) dosimeters based on classical material LiF:Mg,Ti, but in holders of appropriate design, which along with the use of dosimetric algorithms, are able to compensate the energy dependence of the material and, surprisingly, (3) dosimeters DPG-03 (detector



**Рисунок 5.** Кутові залежності дозиметричних систем при опроміненні у серії рентгенівського опромінення N-60

**Figure 5.** Angular dependences of dosimetric systems for irradiation by x-ray radiation N-60 series



**Рисунок 6.** Дозиметр ДТУ-01: 1 – детектори, 2 – алюмінієвий фільтр, 3 – елемент корпусу, 4 – заціпка.

**Figure 6.** DTU-01 dosimeter. 1 – detectors, 2 – aluminum filter, 3 – holder part, 4 – holder

детектора  $Al_2O_3:C$ ) зі складу морально застарілої ТЛД системи КДТ-02.

Найкращими (найслабшими) кутовими залежностями характеризуються дозиметри нового типу RADOS, які використовуються для ІДК персоналу двох АЕС України. Для автоматичних ТЛД систем не було виявлено впливу зчитувачів різних моделей на точність результатів, причина розбіжностей у відтворюваності результатів ручних та напівавтоматичних систем однозначно не визначена – ймовірним є вплив попереднього сортування детекторів за класами індивідуальної чутливості (у автоматичних системах варіації чутливості окремих детекторів враховуються автоматично через застосування індивідуальних калібрувальних коефіцієнтів), або априорно

material  $Al_2O_3:C$ ) from the obsolete TLD system KDT-02.

The new type of dosimeters RADOS, which are used for IDM for staff of two NPPs in Ukraine, have demonstrated the best (weakest) angular dependences. For automatic TLD systems the effect of the different reader models on the accuracy of the results has not been found, the cause of differences in reproducibility of results of manual and semi-automatic systems was not clearly defined – the impact of preliminary sorting detectors by classes of individual sensitivity is probable (in automatic systems variations of the sensitivity of individual detectors are taken into account automatically by applying individual calibration coefficients), or the higher *a priori*

більша точність інтегрального методу зчитування (ДВГ) порівняно з піковим методом (ДТУ, КДТ).

Важливим практичним результатом інтеркалібрування є також те, що практично всі типи систем ІДК (за винятком застарілої плівкової системи ІФК-У) фігурують серед успішних лабораторій (таких, що відповідають критеріям стандарту ISO 14146), а відтак, в умілих руках можуть використовуватись для якісного дозиметричного контролю персоналу категорії А.

## ВИСНОВКИ

- Вперше в Україні було здійснено національне ІК лабораторій індивідуального дозиметричного контролю, яке дало можливість, поміж інших показників, оцінити кутові та енергетичні залежності найбільш поширених дозиметричних систем.
- Енергетичні залежності поширених в Україні типів дозиметрів в основному відповідають літературним даним для відомих матеріалів ТЛД детекторів (LiF:Mg,Cu,P, LiF:Mg,Ti та Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C), але, завдяки особливостям корпусів (фільтрів) дозиметрів та дозових алгоритмів, для окремих систем ці енергетичні залежності можна покращити (компенсувати).
- Встановлено, що кутові залежності найменш виражені для дозиметрів ДПГ-03 зі складу системи КДТ-02 (матеріал детекторів Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C) та нових корпусів дозиметрів RADOS (матеріал детекторів LiF:Mg,Cu,P). Інші пасивні дозиметричні системи показують завищення при збільшенні кута опромінення, зокрема для ДТУ-01 воно зумовлене невдалою конструкцією фільтра.
- Результати дослідження свідчать про те, що основні поширені в Україні типи індивідуальних дозиметрів, за винятком ДТУ і ІФКУ (плівковий дозиметр), мають енергетичні та кутові залежності, що задовольняють практичні потреби ІДК у широкому діапазоні умов професійного опромінення. Ті ж з систем, що показали незадовільні результати, можуть використовуватись у більш вузьких класах умов опромінення на робочих місцях (наприклад, тільки при рентгенівському опроміненні).
- Очевидно погані результати інтеркалібрування, продемонстровані окремими учасниками, зумовлені, скоріш за все, вадами методик та людським фактором, а не недоліками дозиметричного обладнання.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. EURADOS Intercomparison 2008 for Whole Body Dosimeters in Photon Fields / T. W. M. Grimbergen, M. Figel, A. M. Romero, H. Stadtmannand, A. F. McWhan // EURADOS Report 2012-01. – EURADOS: Braunschweig, 2012. – 155 p.

accuracy of the integral method of reading (DVG) compared to the peak method (DTU, KDT).

An important practical result of the intercomparison is the fact that virtually all types of IDM systems (except the obsolete film system IFC-U) appear among successful laboratories (those that meet the criteria of ISO 14146), and then, in skilled hands can be properly used for qualitative dosimetric monitoring of category A staff.

## CONCLUSIONS

- For the first time in Ukraine the national IC of laboratories for individual dosimetric monitoring had been implemented, allowing to evaluate, among other indicators, energy and angular dependences of the common dosimetric systems.
- Energy dependences of the common dosimeter types in general correspond to the literature data for known materials of TLD detectors (LiF:Mg,Cu,P, LiF:Mg,Ti and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C), but due to the peculiarities of dosimeter holders (filters) and dose algorithms for some systems these energy dependences can be improved (compensated).
- It was found that the angular dependences are the least expressed for dosimeters DPG-03 from the KDT-02 system (detectors material Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C) and new holders for RADOS dosimeters (detectors material LiF:Mg,Cu,P). Other passive dosimetry systems demonstrate overestimation while increasing incident angle, particularly strongly for DTU-01, obviously, due to fail filter design.
- Investigation results indicate that the common types of individual dosimeters in Ukraine, except DTU and IFCU (film dosimeter) have energy and angular dependences, satisfying the practical needs of IDM in a wide range of conditions of occupational exposure. Those of the systems that have shown poor results may be used in more narrow classes of exposure conditions at the workplaces (for example, restrictively for the X-ray irradiation).
- Obviously, poor results of intercomparison, demonstrated by some participants are caused, by the failing methods and human factor, rather than by flaws of dosimetric equipment.

## REFERENCES

1. Grimbergen TWM, Figel M, Romero AM, Stadtmannand H, McWhan AF. EURADOS Intercomparison 2008 for Whole Body Dosimeters in Photon Fields. EURADOS Report 2012-01. EURADOS: Braunschweig, 2012. 155 p.

2. EURADOS intercomparisons for individual monitoring services: Results of the 2012 whole body intercomparison / H. Stadtmann, A. McWhan, M. Figel, W. Dobrzynska, T.W.M. Grimbergen, A.M. Romero// Rad Meas. – 2014. Vol. 71. – P. 416-420.
3. International Organisation for Standardisation. Radiation protection – Criteria and performance limits for the periodic evaluation of processors of personal dosimeters for X and gamma radiation. [Text] – ISO 14146:2000. – ISO: Geneva, 2000. – 5 p.
4. МКРЗ. Публікація 75. General Principles for the Radiation Protection of Workers / Annals of the ICRP. – 1997. – Vol. 27, no. 1.
5. International Organisation for Standardisation. X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy – Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and the measurement of the irresponse as a function of energy and angle of incidence – ISO 4037-3:1999. Geneva: – ISO, 1999. – 42 p.
6. Grosswendt B. Dependence of the photon backscatter factor for water on source-to-phantom distance and irradiation field size / B. Grosswendt, Physics in Medicine and Biology. – 1990. – Vol. 35, no. 9, 1990. – P.1233.
2. Stadtmann H, McWhan A, Figel M, Dobrzynska W, Grimbergen TWM, Romero AM. EURADOS intercomparisons for individual monitoring services: Results of the 2012 whole body intercomparison Rad Meas. 2014;71:416-420.
3. International Organisation for Standardisation. Radiation protection - Criteria and performance limits for the periodic evaluation of processors of personal dosimeters for X and gamma radiation. - ISO 14146:2000. ISO: Geneva; 2000. 5 p.
4. ICRP Publication 75. General Principles for the Radiation Protection of Workers, Annals of the ICRP. 1997;27(1).
5. International Organisation for Standardisation. X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy - Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and the measurement of the irresponse as a function of energy and angle of incidence - ISO 4037-3:1999. Geneva: ISO; 1999. - 42 p.
6. Grosswendt B. Dependence of the photon backscatter factor for water on source-to-phantom distance and irradiation field size / B. Grosswendt. Physics in Medicine and Biology. 1990;35(9):1233.

*Стаття надійшла до редакції 22.09.2015*

*Received: 22.09.2015*