

О.А. Кочетков¹, Е.Ю. Тарасова², С.М. Шинкарев¹, Е.А. Румянцев², Ю.Д. Удалов¹

СЛИЧЕНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ АВАРИЙНЫХ ДОЗИМЕТРОВ НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ОРГАНИЗАЦИЯХ ГОСКОРПОРАЦИИ «РОСАТОМ» ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ СЦР

¹ Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва

² Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики Госкорпорации «Росатом», Саров,

Контактное лицо: Сергей Михайлович Шинкарев, e-mail: sshinkarev@mail.ru

РЕФЕРАТ

Цель: На примере рассмотрения и обсуждения результатов сличительных испытаний дозиметрических систем нейтронного излучения, используемых в организациях Госкорпорации «Росатом», оценить текущее состояние достоверности результатов измерений поглощенной дозы нейтронного излучения в ситуации аварийного облучения персонала и сформулировать рекомендации по корректирующим действиям для обеспечения единого подхода к проведению аварийного дозиметрического контроля внешнего облучения.

Результаты: Все средства измерений, представленные в сличительных испытаниях, находятся в Государственном реестре средств измерений и соответствуют современным требованиям к системам индивидуального дозиметрического контроля. Выбранные критерии для оценки результатов измерений поглощенной дозы нейтронного излучения полностью соответствуют требованиям межгосударственной системы стандартизации и государственной системы обеспечения единства измерений. По итогам анализа результатов измерений поглощенной дозы нейтронного излучения дозиметрами ДИНА, ДВГН-01 и Кордон-А получены оценки измерительных возможностей методов, реализованных в системах аварийного дозиметрического контроля. Использование индивидуальных дозиметров с расширенной верхней границей диапазона измерения индивидуального эквивалента дозы нейтронного излучения без учета особенностей регистрации поглощенной дозы может повлечь за собой систематический сдвиг в результатах измерений, что и продемонстрировано таким средством измерений, как ДВГН-01.

Выводы: Необходимо выработать современные требования к системам индивидуального аварийного дозиметрического контроля персонала. Необходимо определить процедуру поверки используемых для целей аварийного дозиметрического контроля средств измерений, т.к. в настоящее время отсутствуют эталоны поглощенной дозы нейтронного излучения в ткани (тканевой кермы) и аттестованные опорные поля поглощенной дозы нейтронного излучения. Для решения проблемы обоснованного применения конкретного средства измерения поглощенной дозы нейтронного излучения службам радиационной безопасности организаций рекомендуется:

- организовать и провести исследования, направленные на изучение характеристик полей излучения на рабочих местах радиометрическими и спектрометрическими методами;
- провести экспериментальное моделирование процесса облучения персонала с использованием антропоморфных фантомов;
- определить поправочные коэффициенты для используемых индивидуальных дозиметров.

Ключевые слова: дозиметры, аварийный дозиметрический контроль, сличительные испытания, самопроизвольная цепная реакция, нейтронное излучение

Для цитирования: Кочетков О.А., Тарасова Е.Ю., Шинкарев С.М., Румянцев Е.А., Удалов Ю.Д. Сличение индивидуальных аварийных дозиметров нейтронного излучения, используемых в организациях Госкорпорации «Росатом» при возникновении СЦР // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2026. Т. 71. № 3. С. 128–134. DOI:10.33266/1024-6177-2026-71-3-128-134

О.А. Kochetkov¹, E.Yu. Tarasova², S.M. Shinkarev¹, E.A. Romyantsev², Yu.D. Udalov¹

Comparison of Individual Emergency Neutron Radiation Dosimeters Used in the Organizations of Rosatom State Corporation Under a Spontaneous Chain Reaction

¹ A.I. Burnazyan Federal Medical Biophysical Center, Moscow, Russia

² Russian Federal Nuclear Center VNIIEF, Nizhny Novgorod region, Sarov, Russia

Contact person: S.M. Shinkarev, e-mail: sshinkarev@mail.ru

ABSTRACT

Purpose: To assess the current state of reliability of the results of measurements of the absorbed dose of neutron radiation in an emergency exposure situation of workers and to produce recommendations for corrective actions aimed at providing a unified approach to carry out emergency dosimetric monitoring of external exposure based on reviewing and discussing the results of comparison tests of neutron radiation dosimetric systems used in organizations of the Rosatom State Corporation.

Results: All measuring instruments presented in comparison tests are in the State Register of Measuring Instruments and comply with modern requirements for individual dosimetric monitoring systems. The criteria selected to assess the results of measurements of the absorbed dose of neutron radiation fully comply with the requirements of the interstate standardization system and the state system for provision of the uniformity of measurements. Based on the results of the analysis of the measurements of absorbed dose of neutron radiation carried out by the dosimeters ДИНА, ДВГН-01 and Kordon-A, the estimates of the measuring capabilities of the methods applied in emergency dosimetric monitoring systems were obtained. The use of individual dosimeters with an extended upper limit of the range of measuring the

individual dose equivalent of neutron radiation without taking into account the peculiarities of recording the absorbed dose can lead to a systematic shift in the measurement results, as demonstrated by such a measuring instrument as DVGН-01.

Conclusion: Modern requirements for dosimetric systems for individual emergency dosimetric monitoring of workers are necessary to be developed. The verification procedure for measuring instruments used for emergency dosimetric monitoring is needed to be determined, because at present there are no standards for the absorbed dose of neutron radiation in tissue (tissue kerma), as well as certified reference fields for the absorbed dose of neutron radiation.

In order to solve a problem to objectively apply a specific measuring instrument to measure the absorbed dose of neutron radiation, the radiation safety services of organizations are recommended to:

- organize and conduct a special research aimed at determination of the characteristics of radiation fields at workplaces using radiometric and spectrometric methods;
- carry out experimental modeling of the procedure of external exposure to workers using anthropomorphic phantoms;
- determine correction coefficients for the individual dosimeters that are used.

Keywords: *dosimeters, emergency dosimetric monitoring, comparison tests, spontaneous chain reaction, neutron radiation*

For citation: Kochetkov OA, Tarasova EYu, Shinkarev SM, Rummyantsev EA, Udalov YuD. Comparison of Individual Emergency Neutron Radiation Dosimeters Used in the Organizations of Rosatom State Corporation Under a Spontaneous Chain Reaction. Medical Radiology and Radiation Safety. 2026;71(3):128–134. DOI:10.33266/1024-6177-2026-71-3-128-134

Введение

Одной из основных задач служб радиационной безопасности организаций Госкорпорации «Росатом» является обеспечение индивидуального дозиметрического контроля (ИДК) дозы внешнего и внутреннего облучения персонала на рабочих местах как в ситуации планируемого облучения, так и в ситуации аварийного облучения. При этом особое место отводится контролю дозы внешнего облучения персонала при возникновении самоподдерживающейся цепной реакции (СЦР) деления на тех рабочих местах, где такая вероятность существует.

В статье [1], опубликованной в 2023 г. в журнале «Медицинская радиология и радиационная безопасность», подробно рассмотрены и обсуждены результаты проведенных в 2016–2017 гг. сличительных испытаний дозиметрических систем гамма- и нейтронного излучений, которые используются в организациях Госкорпорации «Росатом» при контроле внешнего облучения персонала в полях смешанного гамма-нейтронного излучения в ситуации планируемого облучения. По итогам сличительных испытаний признано, что все средства измерений индивидуального эквивалента дозы (ИЭД) фотонного и нейтронного излучений, представленные в сличительных испытаниях, соответствуют современным требованиям к системам ИДК.

В настоящей статье рассматриваются вопросы, связанные с контролем дозы облучения персонала нейтронным излучением в ситуации аварийного облучения, обусловленного СЦР. Во время проведения ядерно опасных работ или при эксплуатации ядерных установок в результате ошибок персонала, неисправностей оборудования, а также по случайным причинам могут произойти аварии, приводящие к незапланированному облучению персонала. Сведения о значении дозы незапланированного (аварийного) облучения необходимы для принятия оперативных действий для спасения жизни пострадавших. Кроме того, эти данные являются основой для прогнозирования тяжести поражения и планирования дальнейших медицинских мероприятий.

Для определения доз аварийного облучения в организациях Госкорпорации «Росатом» используются средства измерений различных типов, позволяющие регистрировать поглощенную дозу нейтронного излучения. Данное обстоятельство, в свою очередь, определяет важность решения вопросов метрологического обеспечения аварийного дозиметрического контроля (АДК), необходимых для достижения единства измерений и достоверности их результатов.

В 2019 г. были организованы и проведены сличительные испытания систем дозиметрического контроля

нейтронного излучения, используемых в организациях Госкорпорации «Росатом» для измерений дозы нейтронного излучения в ситуации аварийного облучения персонала (при возникновении СЦР). Эти сличения были направлены на проверку достоверности результатов измерений поглощенной дозы нейтронного излучения. Сличения проводились с использованием фантомно-дозиметрического комплекса в полях смешанного гамма-нейтронного излучения, моделирующих аварийную ситуацию, связанную с возникновением СЦР. В сличительных испытаниях систем принимали участие специалисты РФЯЦ – ВНИИЭФ и ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России.

Цель настоящей статьи – на примере рассмотрения и обсуждения результатов сличительных испытаний дозиметрических систем нейтронного излучения, используемых в организациях Госкорпорации «Росатом», оценить текущее состояние достоверности результатов измерений поглощенной дозы нейтронного излучения в ситуации аварийного облучения персонала и сформулировать рекомендации по корректирующим действиям для обеспечения единого подхода к проведению АДК внешнего облучения.

Необходимо отметить, что согласно опубликованному указу Президента Российской Федерации «Об утверждении основ государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности» одной из важнейших задач является «Совершенствование нормативно-правовой базы в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности, в том числе критериев, принципов, системы нормирования и основных требований к обеспечению ядерной и радиационной безопасности с учетом стандартов и рекомендаций международных организаций в области использования атомной энергии». Современная система радиационной защиты персонала и населения полностью представлена в вышедших в 2014 году основных стандартах безопасности МАГАТЭ [2], реализующих концепции и положения, сформулированные в Публикации 103 МКРЗ [3]. Дальнейшее развитие философии системы радиационной защиты получило в последующих Рекомендациях МКРЗ, а ее практическая реализация – в технических документах из серии стандартов безопасности МАГАТЭ.

В одном из последних опубликованных документов МАГАТЭ «Радиационная защита при профессиональном облучении» [4] подробно излагаются материалы по реализации требований, сформулированных в основных стандартах безопасности МАГАТЭ [2], в отношении радиационной защиты персонала в трех ситуациях облучения (планируемой, аварийной и существующей).

В контексте данной статьи представляют несомненный интерес рекомендации по контролю дозы облучения персонала в ситуации аварийного облучения в полях смешанного гамма-нейтронного излучения.

Методические подходы к проведению сличительных испытаний

Исследования проводились в соответствии с утвержденной программой сличительных испытаний в полях смешанного гамма-нейтронного излучения с использованием фантомно-дозиметрического комплекса [5]. Этот комплекс предназначен для:

- проведения исследований на облучательных и моделирующих установках новых типов дозиметрических систем, предназначенных для контроля профессионального облучения, в ситуациях планируемого и аварийного облучения;
- подтверждения заявленных дозиметрических характеристик интегральных детекторов, используемых в качестве индивидуальных;
- проведения практической проверки адекватности стандартизованных методов измерений, используемых для целей индивидуальной и аварийной дозиметрии;
- проведения межлабораторных исследований в области обеспечения дозиметрического контроля персонала;
- проведения исследований уровней облучения персонала на рабочих местах.

В работе использовался антропоморфный гетерогенный фантом взрослого человека (рис. 1) [6].

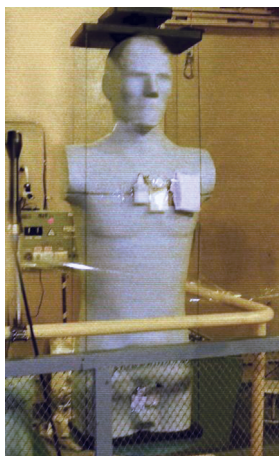


Рис. 1. Антропоморфный гетерогенный фантом взрослого человека [6]

Fig. 1. Anthropomorphic heterogeneous phantom of an adult [6]

Для ситуаций аварийного облучения, при которых у лиц из персонала могут возникать тканевые реакции (детерминированные эффекты), следует учитывать относительную биологическую эффективность (ОБЭ), зависящую как от вида излучения, так и от облучаемого органа (ткани). Дозиметрической величиной, рекомендуемой МКРЕ и МАГАТЭ для оценки тканевых реакций (детерминированных эффектов), является ОБЭ-взвешенная поглощенная доза. Она используется для оценки риска развития детерминированных эффектов излучения с учётом влияния на этот процесс качества излучения и радиочувствительности облучаемого органа. Для косвенно ионизирующего излучения (нейтронов) фундаментальной дозиметрической величиной является керма, определяемая как средняя сумма начальных кинетических энергий всех заряженных частиц, высвобожденных в единице

массы dm вещества незаряженными частицами, падающими на dm [7]. Хотя керма представляет собой величину, которая характеризует начальную передачу энергии веществу, ее иногда используют в качестве приближения поглощенной дозы нейтронного облучения. Численное значение кермы приближается к значению поглощенной дозы в ситуации, когда имеется равновесие заряженных частиц, радиационными потерями (потерями на излучение) можно пренебречь, а кинетическая энергия нейтронного излучения гораздо больше энергии связи высвобожденных заряженных частиц.

В соответствии с п. 4.2.4 Методических указаний [8], в качестве характеристики внешнего облучения нейтронами используется индивидуальная керма на поверхности тела (тканевая керма), равная керме в мягкой биологической ткани, определяемой на поверхности тела в рассматриваемой точке.

Используемые для целей индивидуального контроля в организациях Госкорпорации «Росатом» аварийные дозиметры должны проходить процедуру калибровки, т.е. должны быть установлены соотношения между показаниями аварийного дозиметра и соответствующим условно истинным значением тканевой кермы для всего диапазона энергии нейтронного излучения. Требования к процедуре калибровки дозиметров нейтронов изложены в стандартах ИСО 8529 [9], ИСО 12789 [10] и в докладе 66 МКРЕ [11].

Стандартные условия калибровки приведены в методике поверки средства измерения, утверждаемой при испытаниях с целью определения типа. Эти условия включают эталонное излучение, определенный диапазон внешних условий и конкретную ориентацию детектора прибора к излучению. На практике для целей калибровки дозиметров и поверки средств измерений используют метрологические установки типа УКПН ($^{239}\text{Pu-Be}(\alpha, n)$ – источник) с коллиматорами.

Надежное измерение поглощенной дозы нейтронного излучения является трудной задачей, осложненной широким диапазоном энергий нейтронов и несовершенством большинства дозиметров нейтронов. Калибровка дозиметров, используемых для целей аварийного контроля персонала, становится важнейшей процедурой, на которую следует обращать особое внимание. На измеренные показания дозиметров нейтронов влияет энергетическая зависимость чувствительности детектора и присущая ему анизотропия регистрации излучения. Именно поэтому показания дозиметров в стандартных условиях калибровки и на рабочих местах могут существенно отличаться.

Следует отметить, что источниками излучения при ядерных авариях являются активные зоны исследовательских ядерных установок, а также делящийся материал (ДМ) на рабочих местах в количествах, достаточных для возникновения СЦР. Спектр нейтронов на рабочих местах формируется нейтронами деления и рассеянными нейтронами рабочего помещения и отражает характерную структуру, связанную с наложением на исходный спектр нейтронов деления с вероятной энергией 2 МэВ спектра неупруго рассеянных нейтронов с максимумом в области нескольких сотен электрон-вольт. Формирование спектра тепловых нейтронов происходит за счет нейтронов, термализованных в стенах помещения. Таким образом, поля нейтронного излучения на рабочих местах имеют типичные характеристики: изотропное поле излучения со средней энергией нейтронного излучения $\sim 0,5\text{--}0,8$ МэВ и тканевой кермой в диапазоне $0,5\text{--}50$ Гр.

В данных сличительных испытаниях в качестве принятых опорных (эталонных) значений поглощенной дозы

в ткани принимались расчетные значения тканевой кермы, полученные на комплексе моделирующих опорных полей нейтронов исследовательской ядерной установки (ИЯУ) БР-1М. На этой установке создан и допущен к применению в качестве эталона по ГОСТ 8.105-80 «Комплекс моделирующих опорных полей МОП-К», обеспечивающий облучение объектов испытаний флюенсом нейтронов с погрешностью не более 5,0% при доверительной вероятности 0,95 (свидетельство о метрологической аттестации рабочего эталона №4/430-0011-15).

Метрологические и спектральные характеристики опорного поля нейтронов приведены в [12]. Для расчета значения поглощенной дозы в ткани использовался коэффициент перехода от флюенса нейтронов действующего спектра к значению тканевой кермы (коэффициент FKFT – Fluence-to-Kerma Factors Tissue), также приведенный в [12].

Для оценки результатов измерений поглощенной дозы различными средствами измерений были приняты подходы, изложенные в «Положении об организации и проведении межлабораторных сличительных (сравнительных) испытаний в организациях Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»» [13], рекомендации по международной стандартизации РМГ 103-2010 «Проверка квалификации испытательных (измерительных) лабораторий, осуществляющих испытания веществ, материалов, и объектов окружающей среды (по составу и физико-химическим свойствам) посредством межлабораторных сравнительных испытаний» [14] и правилах по межгосударственной стандартизации ПМГ-96-2009 «Результаты и характеристики качества измерений. Формы представления» [15]. Оценка результатов измерений проводилась по следующим характеристикам:

- оценка метрологических характеристик результатов измерений;
- оценка измерительных возможностей методов измерений;
- оценка качества результатов измерений;
- оценка наличия систематического сдвига.

Сличительные испытания

Сличение средств измерений поглощенной дозы нейтронного излучения проводилось на комплексе моделирующих опорных полей нейтронов реактора БР-1М. Реактор ИЯУ БР-1М (рис. 2) используется как мощный источник гамма-нейтронного излучения для различных исследований и испытаний, в том числе и в интересах метрологии нейтронных излучений. При облучении, моделирующем возникновение СЦР, дозиметры располагались на фронтальной поверхности антропоморфного фантома на расстоянии 2215 мм от центра активной зоны (АЗ) ИЯУ БР-1М в аттестованной точке поля МОП-К(2215) со средней энергией нейтронов 0,5087 МэВ на высоте 2200 мм от пола (что соответствует центру АЗ ИЯУ БР-1М). Облучение проводилось в режиме генерирования импульсов на запаздывающих нейтронах с энергосвободением $1,35 \times 10^{16}$ дел и $1,94 \times 10^{17}$ дел. Полный флюенс нейтронов соответствовал расчётному значению поглощенной дозы нейтронного излучения в биологической ткани 1,08 Гр и 15,5 Гр соответственно.

В сличении участвовали следующие средства измерения, используемые для АДК персонала:

- ДИНА (на основе трекового детектора);
- Кордон-А (на основе трекового детектора);
- ДВГН-01 (термолюминесцентный детектор на основе фторида лития).

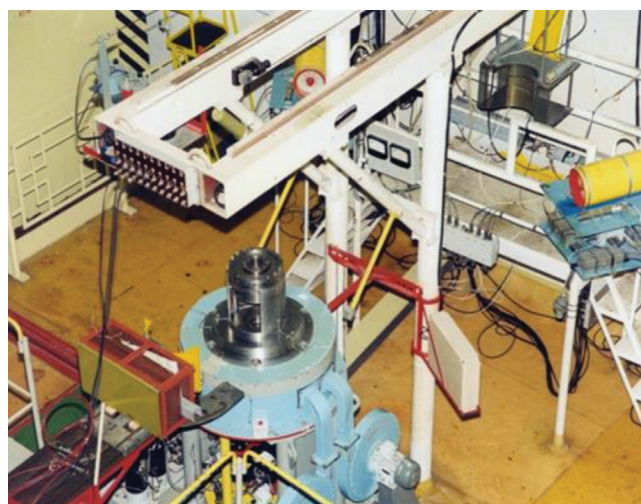


Рис. 2. Моделирующая установка на базе исследовательской ядерной установки БР-1М

Fig. 2. Simulation installation based on the BR-1M nuclear research facility

Технические характеристики дозиметрических систем для измерения нейтронного излучения, установленные в соответствующих описаниях на средства измерения, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики дозиметрических систем для измерения поглощенной дозы нейтронного облучения
Technical characteristics of dosimetric systems for measuring the absorbed dose of neutron radiation

Характеристика	ДИНА	Кордон-А	ДВГН-01
Регистрационный номер в Государственном реестре средств измерений	№ 80350-20	№ 28293-04	№ 22395-02
Энергетический диапазон, МэВ	0,1÷10	0,1÷15	$4 \times 10^{-7} \div 20$
Диапазон измерения поглощенной дозы нейтронного излучения, Гр	0,05÷558	0,05÷50	–
Диапазон измерения индивидуального эквивалента дозы, Зв	–	–	$5 \times 10^{-5} \div 10$
Основная погрешность измерения поглощенной дозы нейтронного излучения, %	29	от 25 до +170/-75	±15
Относительная погрешность измерения за счет энергетической зависимости чувствительности, %	–	±15	±50
Относительная погрешность измерения за счет анизотропии чувствительности, %	–	±250	±15

При принятии решения об использовании дозиметра ДВГН-01 в качестве индивидуального аварийного дозиметра специалисты Служб радиационной безопасности организаций руководствуются информацией, приведенной в разделе «Назначение и область применения» описания на средство измерения ДВГН-01 [16], где записано, что «...Комплекс может использоваться для аварийного контроля доз внешнего облучения персонала».

Графический анализ результатов измерения поглощенной дозы нейтронного облучения, выполненных с использованием дозиметров ДИНА, ДВГН-01 и Кордон-А с эталонной дозой для двух уровней поглощенной дозы (1,08 Гр и 15,5 Гр), приведен на рис. 3.

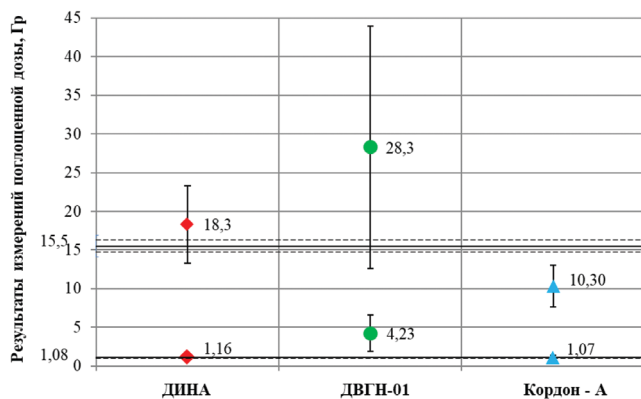


Рис. 3. Результаты измерений поглощенной дозы дозиметрами ДИНА, ДВГН-01 и Кордон-А для уровней эталонных доз 1,08 Гр и 15,5 Гр

Fig. 3. Results of absorbed dose measurements using dosimeters ДИНА, ДВГН-01 and Кордон-А for reference dose levels of 1.08 Gy and 15.5 Gy

На рис. 3 показаны заявленные значения основной погрешности измерения поглощенной дозы нейтронного излучения для 95% доверительного интервала оценки результата измерения.

На рис. 4 представлены итоги статистической обработки результатов измерения поглощенной дозы на каждом уровне доз облучения.

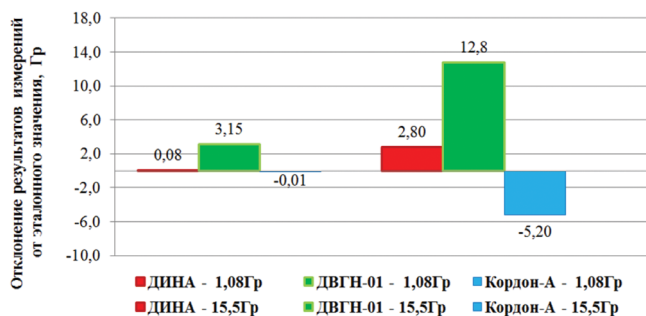


Рис. 4. Отклонение результатов измерений поглощенной дозы дозиметрами ДИНА, ДВГН-01 и Кордон-А от эталонных доз 1,08 Гр и 15,5 Гр

Fig. 4. Deviation of the results of absorbed dose measurements using dosimeters ДИНА, ДВГН-01 and Кордон-А from the reference dose levels of 1.08 Gy and 15.5 Gy

Обсуждение

В соответствии с требованиями [17], методики радиационного контроля должны содержать составляющие неопределенности (бюджет неопределенностей) измерений. Неопределенность измерения – это параметр, связанный с результатом измерения, характеризующий дисперсию значений, которые могли бы быть обоснованно приписаны измеряемой величине. Неопределенность оценки значений поглощенной дозы по показаниям индивидуального аварийного дозиметра имеет несколько составляющих: предел основной и дополнительных погрешностей измерения поглощенной дозы, погрешность определения поправочных коэффициентов на конкретное поле излучения, на рассеяние излучения, анизотропию, погрешность перехода от тканевой кермы к поглощенной дозе, погрешности, обусловленные влиянием сопутствующего излучения и др.

По итогам анализа результатов измерения поглощенной дозы нейтронного излучения показано, что такое средство измерения, как ДВГН-01 (метод регистрации – термоллюминесцентный альбедный), не подтвердило

свои измерительные возможности. Выявлен систематический сдвиг в результатах измерений ДВГН-01. Также анализ с использованием статистической оценки погрешности результатов испытаний показал неудовлетворительное качество результатов измерений ДВГН-01.

Анализ результатов измерения поглощенной дозы нейтронного излучения аварийными индивидуальными дозиметрами показывает, что в используемых средствах измерений выявлены проблемы, влияющие на качество получаемых результатов.

Так как в настоящее время организация индивидуального АДК во многом сведена к использованию индивидуальных дозиметров с расширенной верхней границей диапазона измерения ИЭД нейтронного излучения, то это, в свою очередь, требует решения ряда вопросов по определению переходных коэффициентов от эквивалентной к поглощенной дозе с учетом ОБЭ излучений.

Не менее важным вопросом стоит процедура поверки используемых для целей АДК средств измерений. Так, все потенциальные производители аварийных индивидуальных дозиметров сталкиваются с проблемой отсутствия эталонов поглощенной дозы нейтронного излучения в ткани (тканевой кермы) и аттестованных опорных полей поглощенной дозы нейтронного излучения. Также необходимо отметить, что все производители современных средств измерений предусматривают процедуру ежегодной поверки СИ, которая должна проводиться в заявленном диапазоне энергий и доз излучения. В условиях современного производства данная проблема также пока не нашла своего решения.

Также при измерении поглощенной дозы аварийного облучения дополнительно необходимо учитывать и энергетическую зависимость тканевой кермы (поглощенной дозы в ткани). Методические подходы к решению такой задачи еще предстоит выработать.

Опыт исследований аварийных дозиметрических систем показывает, что весьма полезно характеризовать поле излучения такой величиной, как удельная тканевая керма, т.е. керма на единичный флюенс нейтронов. В настоящее время это единственная характеристика, позволяющая связать флюенс нейтронного излучения с ожидаемой поглощенной дозой в ткани [12]. Для нейтронов всего энергетического диапазона – от тепловых энергий до 10 МэВ, удельная тканевая керма нейтронов изменяется в 3–4 раза в зависимости от типа активной зоны и дополнительно еще в 2–3 раза в зависимости от расстояния до нее. Такое большое различие не позволяет использовать какие-либо средние удельные значения, общие для всех исследовательских ядерных установок и помещений, в которых проводятся работы с ДМ, а требует индивидуального подхода – исследования характеристик полей излучения возможных аварийных ситуаций с разработкой индивидуальной методики измерений поглощенной дозы нейтронного излучения.

Заключение

Проведенные сличительные испытания средств измерения поглощенной дозы нейтронного излучения в смешанном поле гамма-нейтронного излучения, используемых для контроля аварийного облучения персонала, позволяют сформулировать следующие выводы:

1. Все средства измерений, представленные в сличительных испытаниях, находятся в Государственном реестре средств измерений и соответствуют современным требованиям к системам ИДК.
2. Выбранные критерии для оценки результатов измерений поглощенной дозы нейтронного излучения полностью соответствуют требованиям межгосу-

- дарственной системы стандартизации и государственной системы обеспечения единства измерений.
- Анализ результатов измерений поглощенных доз нейтронного излучения дозиметрами ДИНА, ДВГН-01 и Кордон-А позволил получить оценки измерительных возможностей методов, реализованных в исследованных системах АДК.
 - Использование индивидуальных дозиметров с расширенной верхней границей диапазона измерения ИЭД нейтронного излучения без учета особенностей регистрации поглощенной дозы может повлечь за собой систематический сдвиг в результатах измерений, что и продемонстрировано таким средством измерений, как ДВГН-01.

По итогам анализа полученных результатов сличения систем АДК нейтронного излучения можно дать следующие рекомендации по совершенствованию АДК облучения персонала в полях гамма-нейтронного излучения, направленные на решение выявленных проблем:

- необходимо выработать современные требования к дозиметрическим системам индивидуального АДК персонала;
- необходимо определить процедуру поверки используемых для целей АДК средств измерений, т.к. в настоящее время отсутствуют эталоны поглощенной дозы нейтронного излучения в ткани (тканевой кермы) и аттестованные опорные поля поглощенной дозы нейтронного излучения.

Для решения проблемы обоснованного применения конкретного средства измерения поглощенной дозы нейтронного излучения службам радиационной безопасности организаций рекомендуется:

- организовать и провести исследования, направленные на изучение характеристик полей излучения на рабочих местах радиометрическими и спектрометрическими методами;
- провести экспериментальное моделирование процесса облучения персонала с использованием антропоморфных фантомов;
- определить поправочные коэффициенты для используемых индивидуальных дозиметров.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Кочетков О.А., Тарасова Е.Ю., Шинкарев С.М., Румянцев Е.А. Сличение дозиметрических систем фотонного и нейтронного излучений, используемых в организациях Госкорпорации «Росатом» для контроля в ситуации планируемого облучения // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2023. Т.68. №6. С. 118-124.
- Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности. No.GSR Ч.3. Вена: МАГАТЭ, 2015. 520 с.
- Публикация 103 Международной Комиссии по радиационной защите (МКРЗ). Пер с англ. / Под общей ред. М.Ф.Киселёва и Н.К.Шандалы. М.: Алана, 2009. 344 с.
- Радиационная защита при профессиональном облучении. Общее руководство по безопасности. No.GSG-7. Вена: МАГАТЭ, 2021. 430 с.
- Фантомно-дозиметрический комплекс: Руководство по эксплуатации. Саров, 2015.
- Набор дозиметрических фантомов АТОМ. Ref.701; Ref.702; Ref.703; Ref.704; Ref.705; Ref.706. Паспорт. НИИ Доза.
- International Commission on Radiation Units and Measurements. Fundamental Quantities and Units for Ionizing Radiation. Report 85 // ICRU. 2011 Apr. V.11. No.1. P. 1-31. Doi: 10.1093/jicru/ndr011.
- Дозиметрический контроль внешнего профессионального облучения. Общие требования: МУ 2.6.5.026-2016. М., 2016. 52 с.
- Reference Neutron Radiation. Part 3: Calibration of Area and Personal Dosimeters and Determination of their Response as a Function of Neutron Energy and Angle of Incidence: ISO 8529-3, 1998-11.
- Reference Radiation Fields — Simulated Workplace Neutron Fields. Part 2: Calibration Fundamentals Related to the Basic Quantities: ISO 12789-2, 2008-03.
- Determination of Operational Dose Equivalent Quantities for Neutrons. ICRU Report 66, 2001.
- Севастьянов В.Д., Кошелев А.С., Маслов Г.Н. Характеристики полей нейтронов: Справочник. М.: Всероссийский НИИ физико-технических и радиотехнических измерений, 2007. 653 с.
- Положение об организации и проведении межлабораторных сличительных (сравнительных) испытаний в организациях Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом». Утв. приказом №1074-П от 01.11.2017 по Госкорпорации «Росатом» А.М.Локшиным.
- Проверка квалификации испытательных (измерительных) лабораторий, осуществляющих испытания веществ, материалов, и объектов окружающей среды (по составу и физико-химическим свойствам) посредством межлабораторных сравнительных испытаний: РМГ 103-2010.
- Результаты и характеристики качества измерений. Формы представления. ПМГ-96-2009. 14 с.
- Описание типа средства измерений Комплекс индивидуального дозиметрического контроля автоматизированный АКЖДК-301. №22395-02: Приложение к свидетельству.
- Методики радиационного контроля. Общие требования. МИ 2453-2015. 19 с.

REFERENCES

- Kochetkov O.A., Tarasova E.Yu., Shinkarev S.M., Rumyantsev E.A. Comparison of Dosimetric Systems of Photon and Neutron Radiation Used in Organizations of the State Corporation Rosatom for Monitoring in a Situation of Planned Irradiation. *Meditsinskaya Radiologiya i Radiatsionnaya Bezopasnost'* = Medical Radiology and Radiation Safety. 2023;68;6:118-124 (In Russ.).
- Radiatsionnaya Zashchita i Bezopasnost' Istochnikov Izlucheniya: Mezhdunarodnyye Osnovnyye Normy Bezopasnosti* = Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. No. GSR Part 3. Vienna, IAEA Publ., 2015. 520 p. (In Russ.).
- Publikatsiya 103 Mezhdunarodnoy Komissii po Radiatsionnoy Zashchite (MKRZ)* = Publication 103 of the International Commission on Radiation Protection (ICRP). Ed. M.F.Kiselev and N.K.Shandala. Moscow, Alana Publ., 2009. 344 p. (In Russ.).
- Radiatsionnaya Zashchita pri Professional'nom Obluchenii. Obshcheye Rukovodstvo po Bezopasnosti* = Occupational Radiation Protection. General Safety Guide. No.GSG-7. Vienna, IAEA Publ., 2021. 430 p. (In Russ.).
- Fantomno-Dozimetricheskij Kompleks* = Phantom-Dosimetric Complex. Operation Manual. Sarov Publ., 2015. (In Russ.).
- Set of Dosimetric Phantoms АТОМ. Ref. 701; Ref. 702; Ref. 703; Ref. 704; Ref. 705; Ref. 706. Passport. Research and Production Enterprise (RPE) Doza (In Russ.).
- International Commission on Radiation Units and Measurements. Fundamental Quantities and Units for Ionizing Radiation. Report 85. ICRU. 2011 Apr;11;1:1-31. Doi: 10.1093/jicru/ndr011.
- Dozimetricheskij Kontrol' Vneshnego Professional'nogo Oblucheniya. Obshchiye Trebovaniya* = Dosimetric Monitoring of External Occupational Exposure. General Requirements. MU 2.6.5.026-2016. Moscow Publ., 2016. 52 p.

9. Reference Neutron Radiation. Part 3. Calibration of Area and Personal Dosimeters and Determination of their Response as a Function of Neutron Energy and Angle of Incidence. ISO 8529-3, 1998-11.
10. Reference Radiation Fields – Simulated Workplace Neutron Fields. Part 2. Calibration Fundamentals Related to the Basic Quantities. ISO 12789-2, 2008-03.
11. Determination of Operational Dose Equivalent Quantities for Neutrons. ICRU Report 66, 2001.
12. Sevast'yanov V.D., Koshelev A.S., Maslov G.N. *Kharakteristiki Poley Neytronov* = Characteristics of Neutron Fields. Handbook. Moscow, Vserossiyskiy Nauchno-Issledovatel'skiy Institut Fiziko-Tekhnicheskikh i Radiotekhnicheskikh Izmereniy Publ., 2007. 653 p. (In Russ.).
13. Regulations on the Organization and Conduct of Interlaboratory Comparison (Comparative) Tests in Organizations of the State Atomic Energy Corporation Rosatom. Approved by Order No.1074-P. Dated November 1, 2017, for the State Atomic Energy Corporation Rosatom, by A.M.Lokshin (In Russ.).
14. *Proverka Kvalifikatsii Ispytatel'nykh (Izmeritel'nykh) Laboratoriy, Osushchestvlyayushchikh Ispytaniya Veshchestv, Materialov, i Ob'yektov Okruzhayushchey Sredy (po Sostavu i Fiziko-Khimicheskim Svoystvam) Posredstvom Mezhlaboratornykh Sravnitel'nykh Ispytaniy* = Verification of the Qualifications of Testing (Measuring) Laboratories that Carry out Testing of Substances, Materials, and Environmental Objects (by Composition and Physical and Chemical Properties) through Interlaboratory Comparative Tests. RMG 103-2010 (In Russ.).
15. *Rezultaty i Kharakteristiki Kachestva Izmereniy. Formy Predstavleniya. PMG-96-2009* = Results and Characteristics of Measurement Quality. Presentation Forms. PMG-96-2009. 14 p. (In Russ.).
16. *Opisaniye Tipa Sredstva Izmereniy Kompleks Individual'nogo Dozimetricheskogo Kontrolya Avtomatizirovannyy AKIDK-301* = Description of the Measuring Instrument Type: AKIDK-301 Automated Individual Dosimetric Monitoring Complex. No.22395-02. Appendix to the Certificate (In Russ.).
17. *Metodiki Radiatsionnogo Kontrolya. Obshchiye Trebovaniya* = Radiation Monitoring Methods. General Requirements. MI 2453-2015. 19 p. (In Russ.).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.
Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.
Поступила: 20.02.2026. Принята к публикации: 25.03.2026.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.
Financing. The study had no sponsorship.
Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.
Article received: 20.02.2026. Accepted for publication: 25.03.2026.