

Раздел 2

РАДИАЦИОННАЯ МЕДИЦИНА

УДК 614.876:546.36(476.2)

Аветисов А. Р., Сосновская Е. А.

АНАЛИЗ ДОЗ ВНУТРЕННЕГО ОБЛУЧЕНИЯ ЦЕЗИЕМ-137 НАСЕЛЕНИЯ ХОЙНИКСКОГО РАЙОНА ПО ДАННЫМ СПЕКТРОМЕТРА ИЗЛУЧЕНИЙ ЧЕЛОВЕКА

*Учреждение образования «Белорусский государственный медицинский университет»,
г. Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Проанализированы результаты измерений активности ^{137}Cs на спектрометре излучений человека за период 2015–2024 гг. Произведен расчет эффективных доз внутреннего облучения и произведена оценка 22 параметров, которые могли повлиять на дозу облучения. Выявлено, что распределение доз внутреннего облучения приближается к логнормальному. Обнаружены достоверные гендерные и возрастзависимые отличия в дозах облучения, а также влияние места проживания на внутреннее облучение жителей Хойникского района.

Ключевые слова: годовая эффективная доза, спектрометр излучения человека.

Введение. Данное исследование является актуальным в настоящее время, так как изучение влияния радионуклидов, поступающих в организм человека с загрязненных территорий на здоровье населения, является неотъемлемой частью разработки методов предупреждения формирования и развития тканевых реакций.

Цель работы – анализ доз внутреннего облучения, формируемых на население Хойникского района от проживания на территории, загрязненной радионуклидами от чернобыльского выброса.

Материалы и методы. Использованы данные 43 030 исследований измерений ^{137}Cs на спектрометре излучения человека (далее – СИЧ) Хойникского района Гомельской области, предоставленные УЗ «Хойникская центральная районная больница» в рамках договора о сотрудничестве. Расчет показателей и предварительная математическая обработка результатов проводились с помощью программы Microsoft Excel, статистическая обработка данных проводилась с помощью программы Statsoft Statistica 12. Расчет годовой эффективной дозы (далее – ГЭД) внутреннего облучения населения Хойникского района Гомельской области проводился в соответствии с инструкцией по применению [1].

Результаты и их обсуждение. При выполнении расчетов ГЭД внутреннего облучения с помощью СИЧ, логарифмирования значений ГЭД и предварительного анализа измерений при помощи описательной статистики было обнаружено, что данные имеют распределение отличное от нормального (таблица 1).

Таблица 1 – Меры центральной тенденции ГЭД внутреннего облучения

Варианта	N	Среднее	Ср. геом.	Медиана	Мода	Асимметрия	Эксцесс
ГЭД (мЗв/год)	43 030	0,0171	0,0161	0,0154	0,02	33,04	1914,9
Логарифм ГЭД (мкЗв/год)	43 030	2,779	2,766	2,732	3,0	2,79	18,18

Анализ литературных данных, посвященных этому вопросу [2, 3], показал, что результаты могут представлять собой логнормальное или сумму логнормальных распределений. Чтобы проверить выдвинутую гипотезу для результатов измерений по Хойникскому району Гомельской области, мы провели процедуру логарифмирования значений ГЭД внутреннего облучения. Для удобства восприятия информации значения ГЭД внутреннего облучения были выражены в мкЗв/год, поскольку если значения логарифмов доз выразить в мЗв/год, то полученные результаты будут отрицательны, что затруднит визуальное восприятие графической и цифровой информации. Описательная статистика логарифмов значений ГЭД представлена в таблице 1, гистограмма частот распределения данных до и после логарифмирования с проверкой нормальности распределения представлены на рисунках 1 и 2.

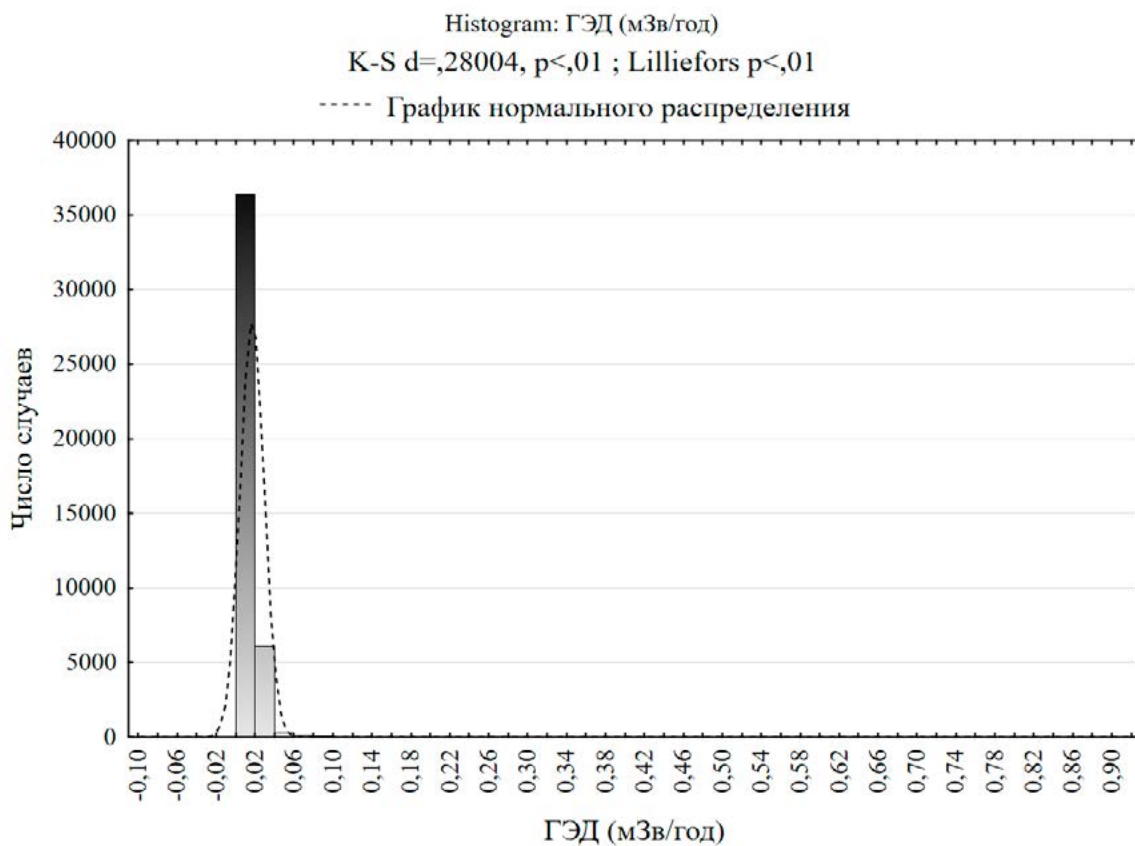


Рисунок 1 – Гистограмма частот распределения ГЭД, мЗв/год

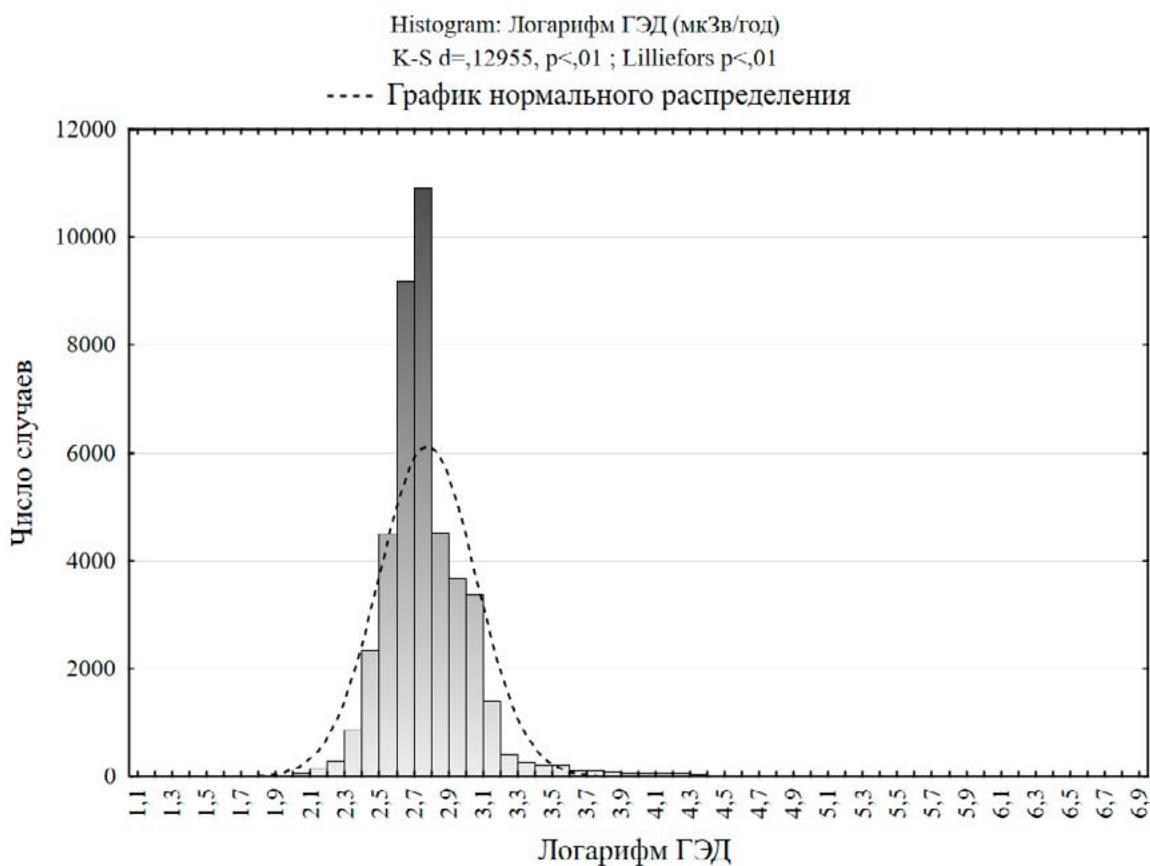


Рисунок 2 – Гистограмма частот распределения логарифмов значений ГЭД, мкЗв/год

Из представленных данных видно, что среднее значение ГЭД внутреннего облучения отличается от среднего геометрического в 1,06 раза, а медианы – в 1,11 раза. Можно заметить, что значение моды превышает среднее значение в 1,17 раза, а при логарифмировании значений ГЭД мода превышает среднее значение в 1,08 раза. Установленные факты косвенно указывают на ненормальность распределения результатов вычислений как для ГЭД, так и (в меньшей степени) для логарифма значений ГЭД. Для подтверждения этой гипотезы были использованы критерий Колмогорова – Смирнова и критерий Лиллиефорса. Оба критерия подтвердили, что распределение не является нормальным со значением $p < 0,01$ (рисунки 1 и 2).

При анализе показателей была выявлена выраженная асимметрия данных как для ГЭД внутреннего облучения, так и для логарифма значений ГЭД, что требует отдельного тщательного изучения. Довольно выраженными оказались отклонения от нормальности распределения за счет правых частей кривых распределения. Оценка частотного распределения логарифма значений ГЭД, в отличие от ГЭД внутреннего облучения, графически приближается к гауссовскому распределению, но не проходит соответствующие тесты на нормальность распределения данных.

В период наблюдения 2015–2024 гг. распределение логарифмов эффективных доз внутреннего облучения показало тенденцию к росту логарифма значений ГЭД для отдельных годов измерения (рисунок 3). В настоящее время отсутствуют достоверные гипотезы, которые могли бы объяснить этот феномен.

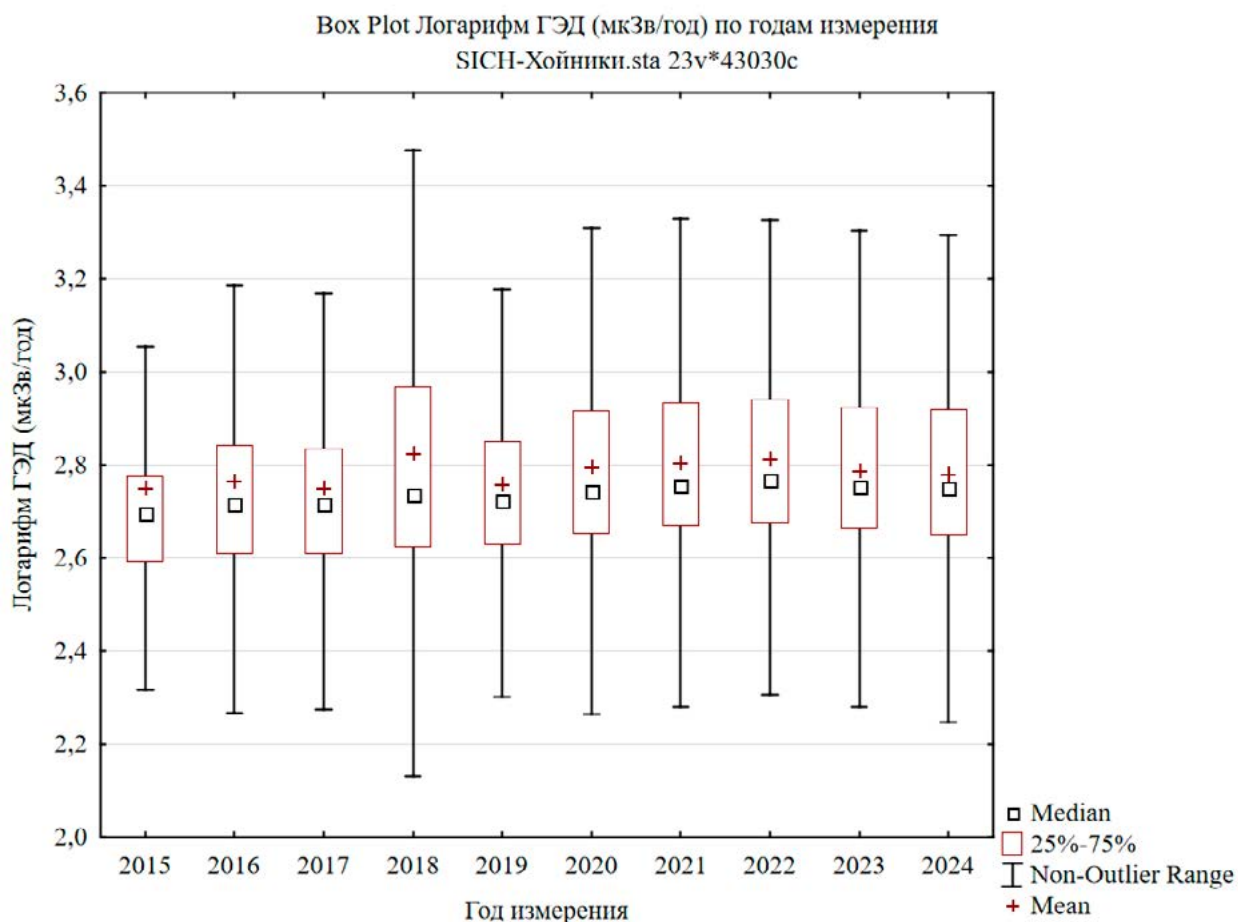


Рисунок 3 – Логарифм значений ГЭД населения Хойникского района в 2015–2024 гг.

Далее мы проводили сравнение между значениями логарифма ГЭД, полученными в 2015–2024 гг. Во многих случаях существуют достоверные отличия, что подтверждается критерием Краскела – Уоллиса (таблица 2).

Таблица 2 – Множественное сравнение значений логарифма ГЭД за 2015–2024 гг. по критерию Краскела – Уоллиса

Год	p-значения между различными годами наблюдения									
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
2015	–	p < 0,01	p < 0,01	p < 0,01	p < 0,01	p < 0,01	p < 0,01	p < 0,01	p < 0,01	p < 0,01
2016	p < 0,01	–	p > 0,05	p < 0,01	p > 0,05	p < 0,01	p < 0,01	p < 0,01	p < 0,01	p < 0,01
2017	p < 0,01	p > 0,05	–	p < 0,01	p > 0,05	p < 0,01	p < 0,01	p < 0,01	p < 0,01	p < 0,01
2018	p < 0,01	p < 0,01	p < 0,01	–	p < 0,01	p > 0,05	p < 0,01	p < 0,01	p < 0,05	p > 0,05
2019	p < 0,01	p > 0,05	p > 0,05	p < 0,01	–	p < 0,01	p < 0,01	p < 0,01	p < 0,01	p < 0,01
2020	p < 0,01	p < 0,01	p < 0,01	p > 0,05	p < 0,01	–	p < 0,01	p < 0,01	p > 0,05	p > 0,05
2021	p < 0,01	p < 0,01	p < 0,01	p < 0,01	p < 0,01	p < 0,01	–	p > 0,05	p > 0,05	p < 0,05
2022	p < 0,01	p < 0,01	p < 0,01	p < 0,01	p < 0,01	p < 0,01	p > 0,05	–	p < 0,02	p < 0,01
2023	p < 0,01	p < 0,01	p < 0,01	p < 0,02	p < 0,01	p > 0,05	p > 0,05	p < 0,02	–	p > 0,05
2024	p < 0,01	p < 0,01	p < 0,01	p > 0,05	p < 0,01	p > 0,05	p < 0,05	p < 0,01	p > 0,05	–

При сравнении эффективных доз внутреннего облучения, формируемых у женщин и мужчин, было выявлено следующее:

- средние величины ГЭД внутреннего облучения почти не отличались (0,0170 и 0,0171 мЗв/год);
- медианные значения ГЭД внутреннего облучения у женщин оказались на 2,65 % выше, чем у мужчин;
- выявлена достоверная разница в величине ГЭД внутреннего облучения у мужчин и женщин по критерию Манна – Уитни (рисунок 4, таблицы 3 и 4).

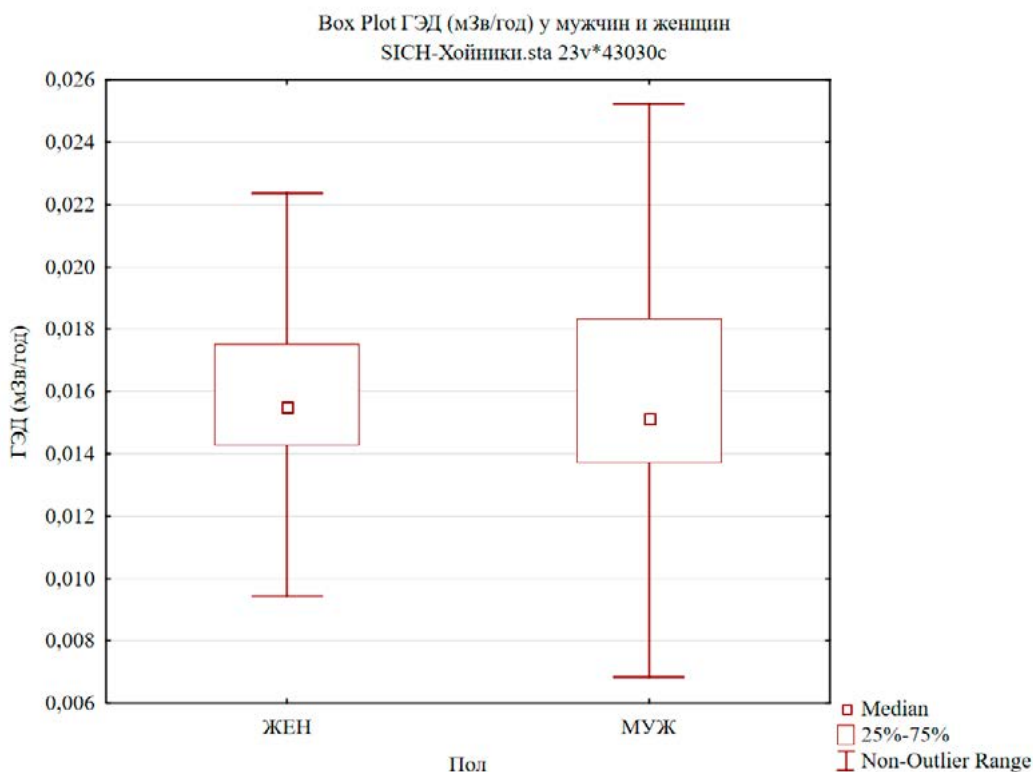


Рисунок 4 – ГЭД населения Хойникского района

Таблица 3 – Отличия в ГЭД внутреннего облучения населения Хойникского района по критерию Манна – Уитни

Переменная	Сумма рангов		U	Z	p	Z скорректир.	p
	Женщины	Мужчины					
ГЭД, мЗв/год	492401467	433410498	219113745	9,323361	p < 0,01	9,323362	p < 0,01

Таблица 4 – Описательная статистика ГЭД населения Хойникского района

Переменная	Объем выборки	Среднее	Медиана	Минимум	Максимум	Стд. откл.
ГЭД, женщины, мЗв/год	22328	0,017012	0,015503	0,006740	0,903573	0,014079
ГЭД, мужчины, мЗв/год	20702	0,017106	0,015127	0,005292	0,274794	0,009958

Объяснение гендерных различий в ГЭД внутреннего облучения не имеет однозначной трактовки, но может быть связано с пищевым поведением и/или особенностями обмена веществ, т. к. у женщин он в популяции в целом ниже, что объясняет различия в скорости выведения и уровне накопления ¹³⁷Cs. Другие предположения в частности гендерных различий в потреблении даров леса в силу профессиональных или индивидуальных особенностей представляются менее состоятельными, т. к. потребление продуктов питания как у взрослого населения, так и у детей обычно не имеет достаточно значимых гендерных различий, а определяется общественным питанием или семейным потреблением, что нивелирует возможности принципиальных различий в поступлении ¹³⁷Cs. Как было указано выше, в целом по району эти отличия невысоки (ГЭД внутреннего облучения у женщин выше примерно в 1,0265 раза, т. е. уровень ГЭД мужчин составляют 97,4 % от ГЭД у женщин).

В дальнейшем нами был проведен анализ распределения данных ГЭД внутреннего облучения в зависимости от возраста обследованных лиц. Возрастные группы были сформированы в соответствии с рекомендациями МКРЗ и упомянутой выше инструкцией по применению [1]. Графическая характеристика медианных значений ГЭД внутреннего облучения в зависимости от возрастной группы представлена на рисунке 5.

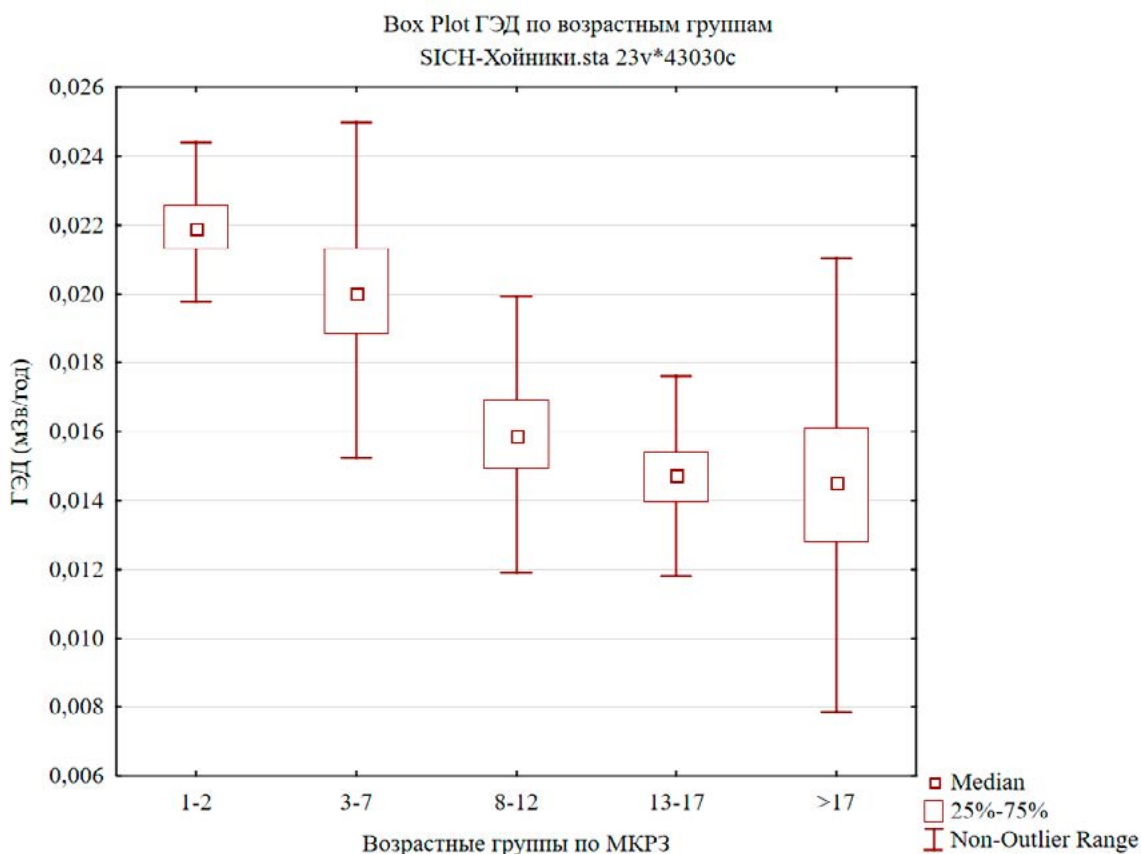


Рисунок 5 – Изменения медианных значений ГЭД внутреннего облучения по возрастным группам населения Хойникского района

Графическая характеристика распределения данных подтверждается критерием Краскела – Уоллиса с высокой достоверностью. Можно отметить также наличие достоверных отличий между всеми представленными возрастными группами (таблица 5).

Таблица 5 – Множественное сравнение ГЭД по возрастным группам по критерию Краскела – Уоллиса

Возраст	p-значения между различными возрастными группами				
	1–2 года	3–7 лет	8–12 лет	13–17 лет	Взрослые
1–2 года	–	p < 0,01	p < 0,01	p < 0,01	p < 0,01
3–7 лет	p < 0,01	–	p < 0,01	p < 0,01	p < 0,01
8–12 лет	p < 0,01	p < 0,01	–	p < 0,01	p < 0,01
13–17 лет	p < 0,01	p < 0,01	p < 0,01	–	p < 0,05
Взрослые	p < 0,01	p < 0,01	p < 0,01	p < 0,05	–

На следующем этапе мы проанализировали связь ГЭД внутреннего облучения с данными о плотности загрязнения территории, выраженной в кБк/м². Результаты статистического анализа представлены в таблице 6 и на рисунке 6. Сравнялась ГЭД в районном центре (74,37 кБк/м² по состоянию на начало измерений в 2015 г.) и в населенных пунктах, где уровень загрязнения выше и ниже этого значения.

Таблица 6 – Множественное сравнение ГЭД по критерию Краскела – Уоллиса для лиц, проживающих на территориях с различной плотностью загрязнения ¹³⁷Cs

¹³⁷ Cs, кБк/м ²	p-значения между территориями с различной плотностью загрязнения ¹³⁷ Cs		
	74,37	> 74,37	< 74,37
74,37	–	p < 0,01	p < 0,01
> 74,37	p < 0,01	–	p > 0,05
< 74,37	p < 0,01	p > 0,05	–

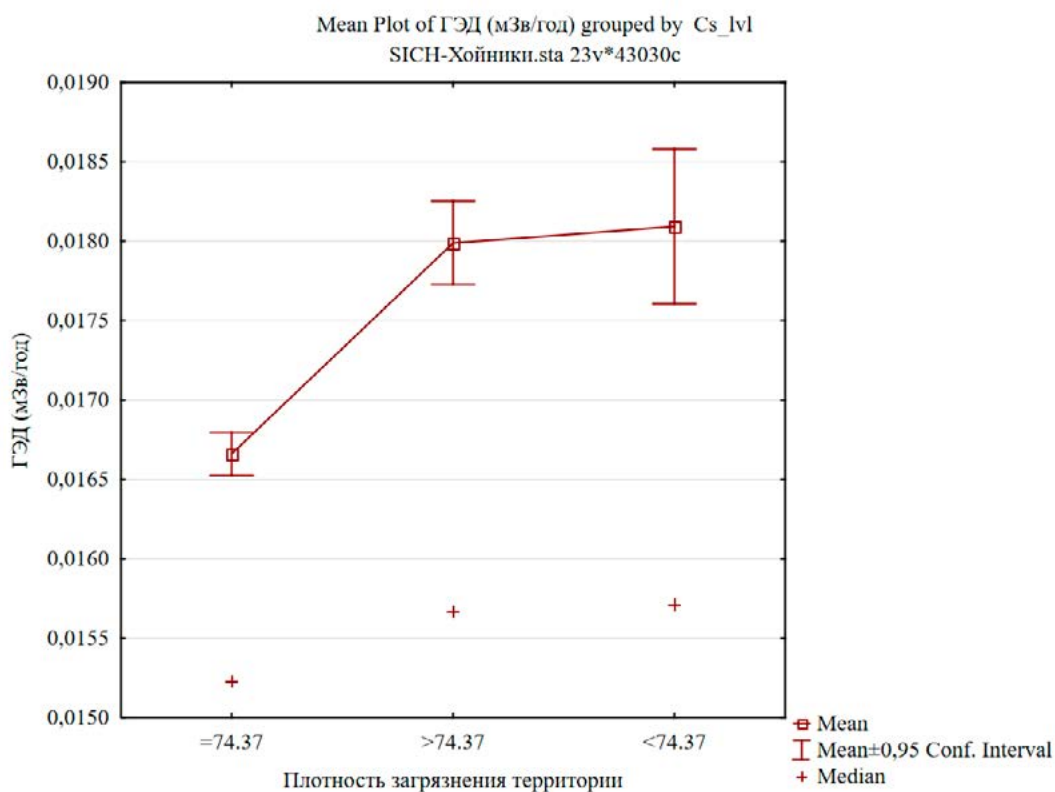


Рисунок 6 – Средняя ГЭД и медиана внутреннего облучения у лиц, проживающих в г. Хойники (74,37 кБк/м²), в сравнении с загрязненными в большей и меньшей степени территориями Хойникского района

Было выявлено, что у лиц, проживающих в г. Хойники, ГЭД внутреннего облучения достоверно ниже, чем у жителей как менее загрязненных, так и более загрязненных территорий. К тому

же не наблюдается достоверных различий в ГЭД внутреннего облучения между более и менее загрязненными территориями района, что подтверждается критерием Краскела – Уоллиса, т. е. в населенных пунктах с загрязнением по ^{137}Cs более $74,37 \text{ кБк/м}^2$ и менее $74,37 \text{ кБк/м}^2$ различия в ГЭД внутреннего облучения недостоверны, в то время как в районном центре ГЭД достоверно ниже на 3,3 %.

Согласно литературным данным известно [4], что на формирование дозы может влиять площадь леса вокруг населенного пункта или размер сельского населенного пункта. Эти особенности могут быть применимы к райцентру, т. к. г. Хойники, возможно, отличается меньшей окружающей лесистостью местности в сравнении с другими населенными пунктами района, а также относится к понятию «город», что должно уменьшать риски внутреннего облучения. Но даже беглый взгляд на карту района показывает, что г. Хойники окружает с севера большой лесной массив, в то время как многие населенные пункты района не имеют в непосредственной близости значительных лесных угодий, а к югу от районного центра располагается Полесский радиационно-экологический заповедник, который не предусматривает прямого влияния на дозу внутреннего облучения населения в связи с ограничениями в использовании даров леса. Следует также учесть, что причину различий в ГЭД внутреннего облучения необходимо искать и в других особенностях, касающихся жителей г. Хойники и района в целом. К ним, возможно, относятся и более выраженная централизация пунктов общественного питания, и значительное большее число точек продаж продуктов питания, в которых широко представлены товары из других районов и областей Республики Беларусь.

Нам удалось также показать, что возраст жителей районного центра достоверно выше, чем в других населенных пунктах района, что, вероятно, связано с большим числом работников трудоспособного возраста. Учитывая обнаруженные закономерности уменьшения ГЭД с возрастом (рисунок 5), одним из объяснений такого феномена может быть именно медианный возраст, который достоверно отличается в анализируемых группах. Если у взрослого населения доза внутреннего облучения минимальна, то несколько меньшие значения ГЭД в связи с большим медианным и средним возрастом становятся вполне объяснимы.

Заключение. В результате исследования было выявлено, что данные СИЧ и результаты расчетов дозы внутреннего облучения имеют распределение, отличное от нормального: среднее значение ГЭД отличается от среднего геометрического (в 1,06 раза), медианы (в 1,11 раза), значение моды превышает среднее значение в 1,17 раза, а при логарифмировании мода превышает среднее значение ГЭД в 1,08 раза. При анализе данных была выявлена выраженная асимметрия как величины ГЭД внутреннего облучения, так и логарифма значений ГЭД, что требует отдельного тщательного изучения. В период наблюдения за 2015–2024 гг. распределение значений логарифмов эффективных доз внутреннего облучения показало разнонаправленные изменения ГЭД внутреннего облучения с тенденцией к росту. Между большинством годов существует достоверная разница значений эффективных доз внутреннего облучения, подтвержденная критерием Краскела – Уоллиса ($p < 0,001$). При сравнении эффективных доз внутреннего облучения, формируемых у женщин и мужчин, была выявлена достоверная разница. Между представленными возрастными группами также существует достоверная разница. У лиц, проживающих в г. Хойники, ГЭД внутреннего облучения оказалась достоверно ниже, чем у жителей как менее загрязненных, так и более загрязненных территорий. При этом не наблюдается достоверных различий в ГЭД внутреннего облучения между более и менее загрязненными территориями района. Графический анализ и данные статистики убедительно показывают, что население районного центра достоверно старше и это может влиять на формирование ГЭД.

Литература

1. Метод оценки средней годовой эффективной дозы облучения жителей населенных пунктов, расположенных на территории, загрязненной радионуклидами в результате аварии на Чернобыльской АЭС: инструкция по применению: утв. М-вом здравоохранения Респ. Беларусь 12.12.2014. – Гомель: ГУ «Республиканский научно-практический центр радиационной медицины и экологии человека», 2014. – 9 с.
2. Власова, Н. Г. Корректная статистическая оценка суммарной дозы облучения жителей сельского населенного пункта / Н. Г. Власова, А. М. Скрябин // Материалы III международного симпозиума Актуальные проблемы дозиметрии, 15 лет после Чернобыльской катастрофы. – Минск: Триолета, 2001.
3. Власова, Н. Г. Концепция репрезентативного лица в системе радиационной защиты: от рекомендаций МКРЗ к практическому применению / Н. Г. Власова // Медико-биологические проблемы жизнедеятельности. – 2020. – № 2(24). – С. 33–39.

4. Власова Н. Г., Висенберг Ю. В., Евтушкова Г. Н., Дрозд Е. А. Оценка доз облучения населения в отдаленном периоде после чернобыльской аварии // Проблемы здоровья и экологии. – 2014. – № 4 (42). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-doz-oblucheniya-naseleniya-v-otdalennom-periodе-posle-chernobylskoj-avarii> (дата обращения: 08.02.2023).

Avetisov A. R., Sosnovskaya E. A.

ANALYSIS OF INTERNAL RADIATION EXPOSURE TO CESIUM-137 OF THE POPULATION OF THE KHOINIKI DISTRICT BASED ON DATA FROM A WHOLE BODY COUNTER

Educational institution «Belarusian State Medical University», Minsk, Belarus

The results of ^{137}Cs activity measurements using a whole body counter for the period 2015–2024 were analyzed. Effective doses of internal exposure were calculated, and 22 parameters that could influence the radiation dose were assessed. The distribution of internal exposure doses was found to be close to lognormal. Significant gender- and age-related differences in radiation dose were identified, as well as the influence of place of residence on the internal exposure of residents of the Khoyniki District.

Keywords: annual effective dose, human radiation spectrometer.

References

1. Vlasova N. G., Rozhko A. V., Visenberg Y. V., Evtushkova G. N., Mataras A. N., Eventova L. N., Drozd E. A. Method for assessing the average annual effective radiation dose for residents of settlements located in areas contaminated with radionuclides as a result of the Chernobyl NPP accident: instructions for use: instrukciya po primeneniyu № 094-0914. Ministry of Health of the Republic of Belarus 12.12.2024. In: Med.by: healthcare and medical science of the Republic of Belarus. Available at: <http://med.by/methods/pdf/full/094-0914.pdf> (accessed 08 September 2025). (in Russian)

2. Vlasova N. G., Skryabin A. M. Correct statistical assessment of the total radiation dose for residents of a rural settlement. In: Milutin A. A. et al., eds. *Aktual'nye problemy dozimetrii. 15 let posle Chernobyl'skoj katastrofy* [Actual problems of dosimetry. 15 years after the Chernobyl catastrophe]: materialy III mezhdunar. simpoziuma, Minsk, 24–26 okt. 2001 g., Minsk; 2001: 149–52. (in Russian)

3. Vlasova N. G. The concept of a representative person in the radiation protection system: from the ICRP recommendations to practical application. *Mediko-biologicheskie problemy zhiznedeyatel'nosti* [Medical and Biological Problems of Life Activity]. 2020; 2: 33–9. (in Russian)

4. Vlasova N. G., Visenberg Yu. V., Evtushkova G. N., Drozd E. A. Distant dose assessment of population after the Chernobyl accident. *Problemy zdorov'ya i ekologii* [Health and Ecology Issues]. 2014; 4: 129–34. (in Russian)

e-mail для переписки: avetisov@tut.by

Поступила 11.09.2025

ISSN 2076-3778

МИНИСТЕРСТВО ЗДРАВООХРАНЕНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«РЕСПУБЛИКАНСКИЙ ЦЕНТР ГИГИЕНЫ, ЭПИДЕМИОЛОГИИ
И ОБЩЕСТВЕННОГО ЗДОРОВЬЯ»

ЗДОРОВЬЕ И ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА

Сборник научных трудов

Выпуск 35

Гомель
Редакция газеты «Гомельская праўда»
2025