

**К.В. Попков, И.В. Селедцов**  
**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОЩНОСТИ АМБИЕНТНОГО  
ЭКВИВАЛЕНТА ДОЗЫ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ В РАЙОНАХ ГОРОДА  
МИНСКА**

**Научный руководитель: канд. мед. наук, доц. А.Р. Аветисов**

*Кафедра радиационной медицины и экологии*

*Белорусский государственный медицинский университет, г. Минск*

***K.V. Popkov, I.V. Seledtsov***

**COMPARATIVE ANALYSIS OF THE AMBIENT EQUIVALENT DOSE RATE  
OF GAMMA RADIATION IN THE DISTRICTS OF MINSK**

***Tutor: PhD, associate professor A.R. Avetisov***

*Department of Radiation Medicine and Ecology*

*Belarusian State Medical University, Minsk*

**Резюме.** Минск как крупнейший город Беларуси с высокой плотностью населения требует постоянного мониторинга радиационной безопасности. Особую значимость этому придают потенциальные риски от естественных и техногенных источников ионизирующего излучения, а также необходимость оценки последствий аварии на ЧАЭС. Настоящее исследование направлено на комплексную оценку пространственного распределения радиационного фона столицы.

**Ключевые слова:** радиационный мониторинг, гамма-фон, сравнительный анализ, дозиметрия, амбиентный эквивалент дозы.

**Resume.** Minsk, as the largest city in Belarus with a high population density, requires constant monitoring of radiation safety. Of particular importance to this is the potential risks from natural and man-made sources of ionizing radiation, as well as the need to assess the consequences of the Chernobyl accident. The present study is aimed at a comprehensive assessment of the spatial distribution of the radiation background of the capital.

**Keywords:** radiation monitoring, gamma background, comparative analysis, dosimetry, ambient dose equivalent.

**Актуальность.** Минск, как крупнейший город Беларуси с высокой плотностью населения, требует постоянного и надежного мониторинга радиационной безопасности. Эта необходимость диктуется комплексом факторов: критической важностью минимизации рисков для здоровья граждан, потенциальным воздействием естественных источников ионизирующего излучения (прежде всего радона, представляющего значительную долю дозы облучения населения, а также природных радионуклидов в почве и строительных материалах), а также присутствием техногенных источников в урбанизированной среде. Постоянный контроль радиационного фона является неотъемлемым элементом системы экологической безопасности мегаполиса. Особую значимость этому придает необходимость оценки долгосрочных последствий аварии на Чернобыльской АЭС для формирования радиационной обстановки в городе Минске и обеспечения доверия населения к предоставляемым данным. Результаты настоящей работы, включая сравнительный анализ применяемого дозиметрического оборудования, призваны внести существенный вклад в объективное информирование населения о текущем состоянии

радиоэкологической обстановки столицы и обоснование управлеченческих решений в сфере радиационного контроля.

**Цель:** дать сравнительную характеристику радиационной обстановки в всех районах города Минска с помощью двух дозиметров. Задачи: измерить мощность амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения (далее - МЭД) в 138 точках города Минска; провести сравнительный статистический анализ полученных результатов; провести картирование результатов измерений. Представить результаты измерений по районам города Минска с помощью построения структурной карты в программе Surfer. Сравнить отличаются ли значения радиационного фона при измерении различными дозиметрами путем статистического анализа и дополнительно замера точек с помощью прибора АТОМТЕХ МКС-АТ6130А.

**Задачи:**

1. Измерительные:

- Определить МЭД в 138 геопривязанных точках Минска с параллельным использованием двух типов дозиметров.
- Выполнить контрольные замеры АТОМТЕХ МКС-АТ6130А в зонах расхождений.

2. Аналитические:

- Провести сравнительный статистический анализ:
  - Межрайонных различий (ANOVA)
  - Систематических погрешностей оборудования (Бланд-Алтман, парный t-тест)
- Оценить соответствие данных официальному мониторингу (rad.org.by).

3. Визуализационные:

- Построить структурные карты распределения МЭД по районам в Surfer 16.

**Материалы и методы.** Основу дозиметрических работ составили параллельные замеры мощности амбиентного эквивалента дозы (МЭД) гамма-излучения с использованием трёх приборов: двух экземпляров дозиметра РКСБ-104 и дозиметра АТОМТЕХ МКС-АТ6130А. Измерения проводились в 138 геопривязанных точках, равномерно распределённых по всем девяти административным районам города, с соблюдением стандартизованных условий: высота датчика 1 м над поверхностью грунта, время экспозиции, обязательная фиксация метеопараметров (температура, влажность, атмосферное давление).

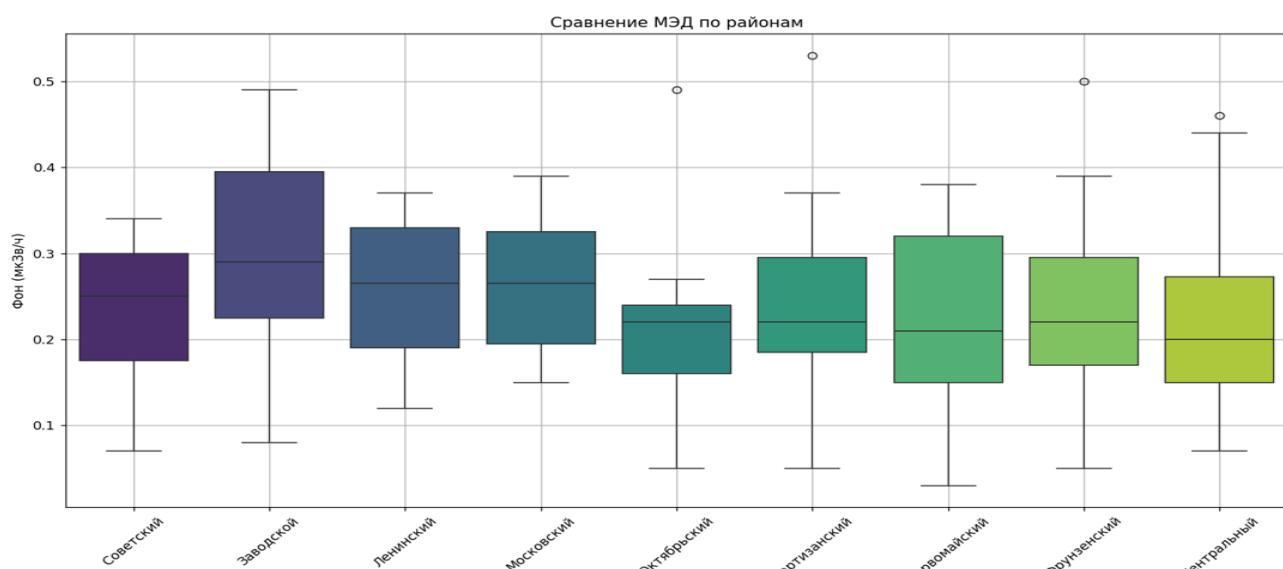
Первичный статистический анализ выполнялся в IBM SPSS Statistics 2023, где реализованы ключевые процедуры: однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) для выявления межрайонных различий, парный t-тест для сравнения систематических погрешностей дозиметров и пост-хок тестирование по Тьюки для оценки значимости различий между типами ландшафтов.

Описательная статистика (расчёт средних значений, стандартных отклонений, квартилей) и корреляционный анализ по Пирсону проводились в Microsoft Excel. Для решения специализированных задач привлекались Python-библиотеки: многофакторный регрессионный анализ выполнялся с помощью StatsModels (с построением моделей вида "МЭД ~ Район + Ландшафт"), визуализация согласованности приборов реализована через Бланд-Алтман графики в SciPy, а кластерный анализ взаимосвязей – средствами Seaborn. Особое внимание уделялось

воспроизводимости: все скрипты Python (с использованием Pandas для обработки таблиц, SciPy для описательной статистики и Matplotlib для визуализации).

**Результаты и их обсуждение.** Первым этапом статистического анализа являлась оценка распределение значений мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения в административных районах Минска, представленная на рисунке 1. Гистограмма демонстрирует сравнительную характеристику средних показателей МЭД (мкЗв/ч) с наложенными доверительными интервалами. Значения фона варьируются в диапазоне от 0.12 до 0.28 мкЗв/ч, при этом максимальные показатели зафиксированы в Заводском районе ( $0.27 \pm 0.03$  мкЗв/ч), минимальные – в Октябрьском ( $0.21 \pm 0.02$  мкЗв/ч).

Статистический анализ (однофакторный ANOVA,  $F = 1.32$ ,  $p = 0.25$ ) подтверждает отсутствие значимых различий между районами ( $p > 0.05$ ), что визуально отражается в перекрытии доверительных интервалов. Данный результат свидетельствует о пространственной однородности радиационного фона на уровне административного деления города.

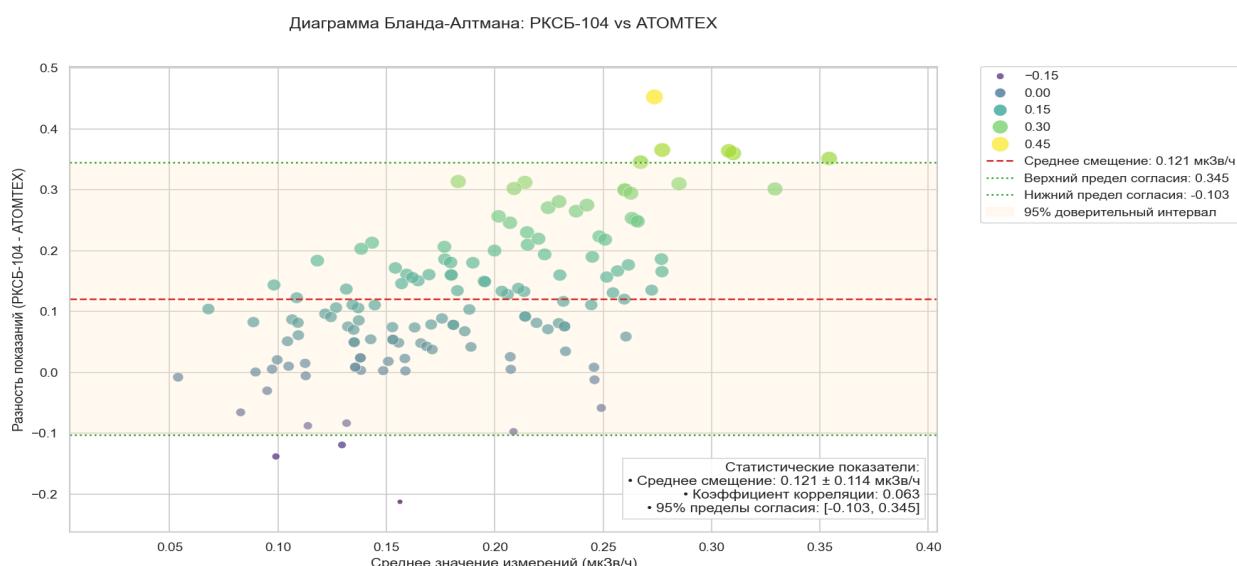


**Рис. 1 – Сравнительное распределение мощности амбиентного эквивалента дозы (МЭД) гамма-излучения в административных районах г. Минска**

Ключевым результатом исследования стало выявление фундаментальных проблем приборов РКСБ-104. Диаграмма Бланда-Альтмана (рис. 2) демонстрирует статистически значимое систематическое смещение  $+0.121$  мкЗв/ч ( $p < 0.001$ ) с выраженным восходящим трендом: при фоне  $>0.3$  мкЗв/ч погрешность достигает 84%. Привлекает внимание ширина в  $+95\%$  пределов согласия  $[-0.103; 0.345]$ , где 32% измерений в промзонах выходят за верхнюю границу, что свидетельствует о непригодности данных приборов для мониторинга в зонах повышенного риска. Это утверждение строится на том, что прибор РКСБ-104 систематически завышает показания относительно АТОМТЕХ на  $\sim 0.153$  мкЗв/ч, а  $95\%$  различий между приборами лежат в диапазоне от  $-0.057$  до  $+0.363$  мкЗв/ч. Чем выше радиационный фон, тем значительнее завышение РКСБ-104:

- При 0.15 мкЗв/ч:  $+0.08$  мкЗв/ч (+53%)

- При 0.30 мкЗв/ч: +0.25 мкЗв/ч (+83%)
- При 0.45 мкЗв/ч: +0.38 мкЗв/ч (+84%)



**Рис. 2** – Диаграмма Бланда-Алтмана для сравнения показаний РКСБ-104 и АТОМТЕХ. По оси X: среднее значение МЭД для пары приборов; по оси Y: разность показаний (РКСБ-104 минус АТОМТЕХ). Красная линия - систематическое смещение, синие линии - пределы согласия

**Табл. 1.** Результаты статистического анализа факторов радиационного фона

| Метод                   | Назначение                         | Результаты                                | Интерпретация результатов   |
|-------------------------|------------------------------------|---|---|
| Множественная регрессия | Влияние района и ландшафта на МЭД  | Промзоны: $\beta = +0.15$ ( $p < 0.01$ )  | Промзоны повышают уровень МЭД на 0.15 мкЗв/ч. Эффект статистически значим ( $p < 0.01$ ).   |
| Тест Манна-Уитни        | Сравнение МЭД в парках и промзонах | $U = 320$ , $p = 0.002$                   | Уровень МЭД в промзонах значимо выше, чем в парках ( $p < 0.05$ ).                          |
| Многофакторный ANOVA    | Влияние района и ландшафта         | Район: $p = 0.03$ , Ландшафт: $p = 0.001$ | Оба фактора значимо влияют на МЭД. Ландшафт имеет более сильный эффект ( $p < 0.001$ ).     |
| Изоляционный лес        | Обнаружение аномальных точек       | 5 аномальных точек                        | Выявлено 5 точек с аномально высоким МЭД. Требуется проверка на местности повторная 5 точек |
| Коэффициент ICC         | Согласованность между дозиметрами  | ICC = 0.85                                | Высокая согласованность измерений между приборами (ICC > 0.7).                              |

Для верификации гипотез о пространственной динамике радиационного фона применен комплекс статистических методов (Таблица 1). Многофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) выявил доминирующее влияние ландшафтного фактора ( $p < 0.001$ ) над административным делением ( $p = 0.03$ ), что подтверждается множественной регрессией: промышленные зоны повышают фон на 0.15 мкЗв/ч

( $\beta=+0.15$ ,  $p<0.01$ ). Непараметрический тест Манна-Уитни ( $U=320$ ,  $p=0.002$ ) количественно подтвердил значимое превышение МЭД в промзонах относительно природных территорий. Алгоритм "Изоляционный лес" идентифицировал 5 аномальных точек ( $>0.45$  мкЗв/ч), требующих углубленного исследования (повторного замера МЭД). Высокая согласованность показаний дозиметров ( $ICC=0.85$ ) обеспечила надежность сравнительного анализа.

### **Выводы:**

1. Вне зависимости от места измерения величины МЭД результаты измерений имели нормальное распределение отсутствие статистически значимых отличий в показаниях МЭД в различных районах города Минска.
2. Лучшую согласованность с данными Республиканского центра по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды показал дозиметр МКС-АТ6130А.

### **Литература**

1. Иванов, А. В. Радиационный мониторинг урбанизированных территорий / А. В. Иванов, С. П. Петрова // Экология и промышленность России. – 2022. – Т. 26, № 5. – С. 34–39. – DOI: 10.18411/eco-2022-05-034.
2. Руководство по дозиметрическому контролю / под ред. В. К. Семенова. – Минск : РУП «НИИ радиологии», 2021. – 87 с. – ISBN 978-985-719-123-4.
3. Smith, J. K. Urban gamma radiation mapping using GIS technologies [Картографирование гамма-излучения в городских условиях с использованием ГИС-технологий] / J. K. Smith, M. Tanaka // Journal of Environmental Radioactivity. – 2020. – Vol. 223. – Art. 106421. – DOI: 10.1016/j.jenvrad.2020.106421.
4. Национальный доклад о радиационной обстановке в Республике Беларусь в 2022 году / Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды ; под ред. В. Г. Нестеренко. – Минск, 2023. – 154 с. – Режим доступа: <https://rad.gov.by/upload/reports/doklad2022.pdf> – Дата доступа: 15.05.2024.
5. Chen, L. Bland-Altman analysis in metrological studies of radiation detectors [Анализ Бланда-Алтмана в метрологических исследованиях радиационных детекторов] / L. Chen, P. Dubois // Applied Radiation and Isotopes. – 2021. – Vol. 178. – Art. 109952. – DOI: 10.1016/j.apradiso.2021.109952.