

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

К. 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, AMBIENT 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 управленческих 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 стандартизированных 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-Альтман 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 ± 0.03 мкЗв/ч), минимальные – в Октябрьском (0.21 ± 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.

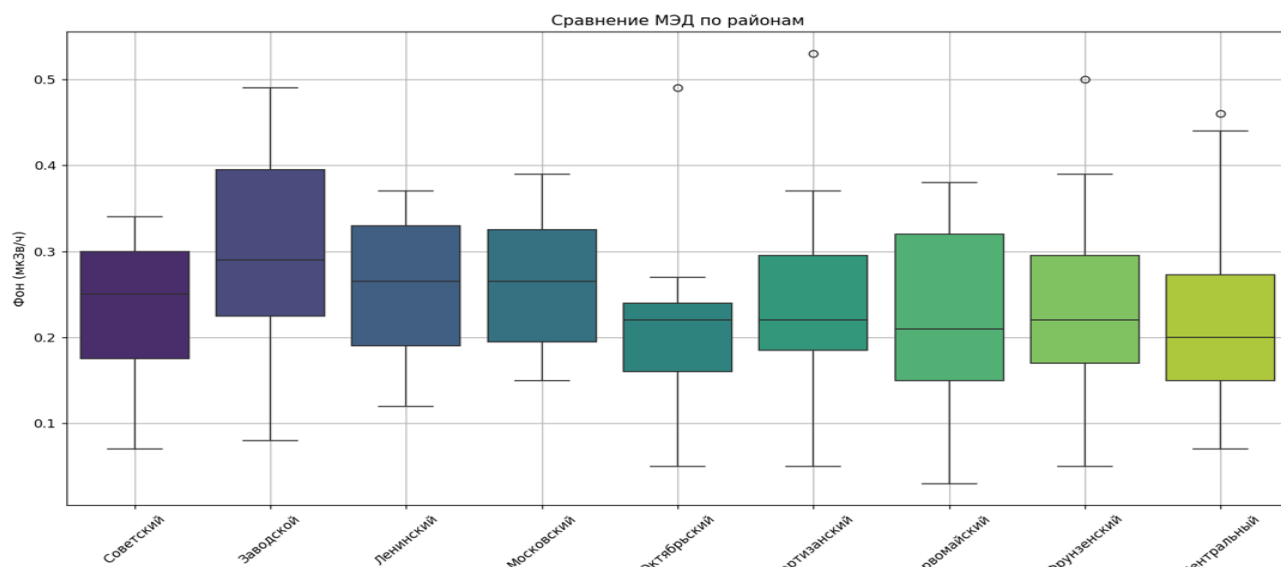


Рис. 1 – Сравнительное распределение мощности амбиентного эквивалента дозы (МЭД) гамма-излучения в административных районах г. Минска

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 ~ 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%)

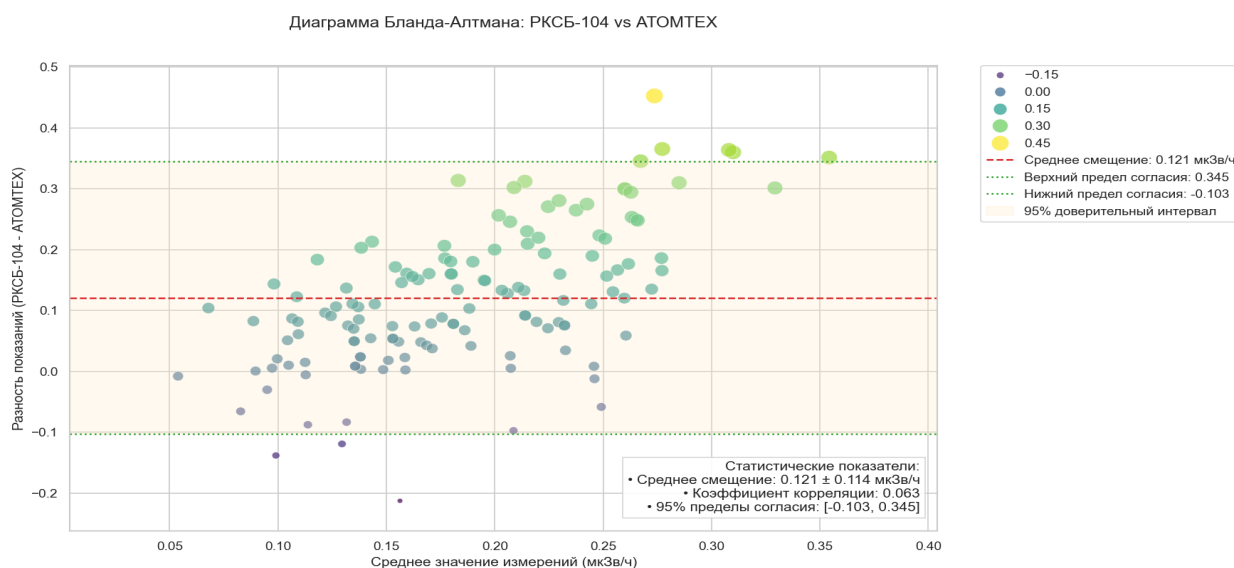


Рис. 2 – Диаграмма Бланда-Алтмана для сравнения показаний РКСБ-104 и АТОМТЕХ. По оси X: среднее значение МЭД для пары приборов; по оси Y: разность показаний (РКСБ-104 минус АТОМТЕХ). Красная линия - систематическое смещение, синие линии - пределы согласия

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 (ИСС=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.