ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 550.35

Научная статья

Искажение радиационного фона городской среды вследствие агрессивного влияния техносферы. 1 этап: радон и альфа-фон

Г. А. Яковлев¹, В. С. Яковлева²

¹ Томский государственный университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, Россия

² Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия

E-mail: vsyakovleva@tpu.ru

Работа посвящена проверке возможности замены промышленно выпускаемых радиометров радона более экономичными детекторами альфа- и/или бета-излучения для проведения круглогодичного и периодического мониторинга радона в городской атмосфере. Выявлена значимая корреляция между интегральными (средними за месяц) значениями ЭРОА радона и плотности потока альфа-излучения. Это подтверждает, что мониторинг альфа-фона в городской среде может надежно заменить мониторинг величины ЭРОА радона, которая является нормируемой и характеризует внутреннее облучение населения альфа-излучением. Получено, что при известной сезонной закономерности в динамике коэффициента радиоактивного равновесия между радоном и дочерними продуктами его распада также можно будет осуществить замену мониторинга радона в городской атмосфере мониторингом плотности потока альфа-излучения.

Ключевые слова: альфа-излучение, бета-излучение, радон, радиационный фон, городская среда, техносфера

DOI: 10.26117/2079-6641-2020-32-3-154-164

Поступила в редакцию: 05.09.2020

В окончательном варианте: 04.10.2020

Для цитирования. Яковлев Г. А., Яковлева В. С. Искажение радиационного фона городской среды вследствие агрессивного влияния техносферы. 1 этап: радон и альфа-фон // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2020. Т. 32. № 3. С. 154-164. DOI: 10.26117/2079-6641-2020-32-3-154-164

Контент публикуется на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)

© Яковлев Г. А., Яковлева В. С., 2020

Введение

Радиационный (гамма-, бета-, альфа-, и др. виды ионизирующего излучения) фон городской среды является значительно искаженным, по сравнению с загородным, вследствие влияния таких техногенных факторов, как уплотнение застройки, преобладание многоэтажных зданий, создающих закрытые пространства, наличие пешеходно-транспортных коммуникаций, клумбы и парковые зоны, строительный мусор, содержащийся в верхних слоях грунта придомовой территории, размещение

Финансирование. Исследование выполнялось без финансирования

энергетических объектов внутри города, и пр. Все упомянутые факторы приводят, с одной стороны, к увеличению дополнительных источников ионизирующего излучения, радиоактивных газов и аэрозолей в городской атмосфере, что может представлять угрозу переоблучения населения. С другой стороны, с развитием техносферы происходит перераспределение источников радиации, изменение динамики воздушных и тепловых потоков, искажение пространственно-временного распределения характеристик полей ионизирующих излучений, естественной радиоактивности, что приводит к значительному изменению радиационной ситуации в городской среде.

Источниками радиационного фона приземной атмосферы являются радионуклиды, содержащиеся в грунте, в строительных материалах зданий и сооружений, в атмосферном воздухе, а также космическая радиация. Соответственно, изменение концентрации радионуклидов ведет к изменению радиационного фона городской атмосферы. К основным радионуклидам, влияющим на суточный ход потоков α -, β - и γ -излучений, относятся радиоактивные газы радон и торон, концентрация которых в верхнем слое грунта и в атмосфере города может существенно варьировать под действием метеоусловий, а также короткоживущие дочерние продукты их распада в атмосфере. Суммарная активность изотопов радона и дочерних продуктов их распада в городской среде определяется плотностью потоков радона и торона с поверхностей грунта и зданий, а вертикальный профиль активности — текущими метеоусловиями.

Уплотнение городской застройки, многоэтажные здания, создающие закрытые пространства, техногенно измененный во время строительных работ поверхностный слой грунта, энергетические объекты внутри города повышают общий радиационный фон. Пешеходно-транспортные коммуникации, площадки для отдыха, наоборот, снижают или полностью задерживают поступление радиоактивных газов и ионизирующего излучения из грунта в городскую атмосферу. Это приводит к значительному перераспределению источников радиации внутри городской среды, которое не известно, систематически не исследуется, и даже не принимается во внимание при анализе результатов радиационного мониторинга.

Плотная застройка высотными зданиями приводит также к существенным изменениям характеристик турбулентных потоков воздуха и тепла между зданиями, во внутренних дворах, что существенно влияет на перенос изотопов радона и продуктов их распада и, таким образом, приводит к скоплению радиоактивных газов в областях с малоподвижной атмосферой. В итоге, такие комфортные городские внутренние дворы могут обернуться для их обитателей источником повышенного облучения, а проветривание помещений может привести к потенциальной опасности не снизить уровни радона внутри помещений, а наоборот — повысить их, в зависимости от конструктивных особенностей здания, погодных условиях и времени суток.

Актуальность исследования вопросов искажения радиационного фона в городской среде возрастает в связи с Указом Президента РФ от 13 октября 2018 г. № 585 об утверждении «Основ государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу», где сделан упор на снижение рисков от облучения природными радионуклидами.

Итак, исследование степени искажения радиационного фона городской среды вследствие агрессивного влияния техносферы должно вестись одновременно по нескольким направлениям: а) радиационный фон; б) радоновое поле; в) приборное обеспечение.

При решении указанной проблемы особое внимание должно быть уделено исследованию динамики характеристик радонового поля, как основного дозообразующего фактора. Здесь возникает основная проблема, связанная с выбором приборов для постоянного или периодического уличного мониторинга. Анализ производимых в РФ радиометров радона показал, что они не пригодны для измерений характеристик радонового поля в приземной атмосфере в жестких климатических условиях (при температурах 0°C ниже). Зарубежные радиометры радона и/или дочерних продуктов распада радона также имеют ограничения по условиям эксплуатации и не могут быть использованы в зимний период. Другим, ограничивающим исследование уровней радона в городской среде, фактором является высокая стоимость радиометров. В том числе и по этой причине, практически отсутствуют исследования вертикального переноса радона в атмосфере.

В связи с вышеизложенным целью данной работы проверка возможности замены промышленно выпускаемых радиометров радона более экономичными детекторами альфа- и/или бета-излучения для проведения круглогодичного и периодического мониторинга радона в городской атмосфере.

Приборы и методы

Для проведения исследования был использован приборный парк Томской обсерватории радиоактивности и ионизирующих излучений (ТОРИИ) ТПУ. Приборы были размещены на экспериментальной площадке геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН (рис. 1).

Рис. 1. Внешний вид метеорологической мачты с установленными на высоте 1 м детекторами α - и β -излучения ТОРИИ

Схема расположения оборудования приведена в [1]. Для мониторинга заряженной компоненты радиационного фона использовали сцинтилляционные детекторы β -излучения БДПБ-01 с тактом измерения плотности потока (ПП) частиц – 1 мин. и α -излучения БДПА-01 с тактом 10 мин. (производства АТОМТЕХ, Республика Беларусь). Детекторы были установлены на высоте 1 м от земной поверхности.

Непрерывный мониторинг характеристик радоновых полей осуществляли с конца 2016 с использованием радиометра EFQ (SARAD, Германия). Для определения объемной активности дочерних продуктов распада радона и торона в этом радиометре используется метод прокачки воздуха через мембранный фильтр с параллельной

α -спектрометрией полупроводниковым детектором. Процесс мониторинга полностью автоматизирован, прокачка воздуха производится непрерывно. Время одного измерения составляет 30 мин. Высота установки прибора 1 м над земной поверхностью. Непрерывно измеряются следующие характеристики радонового поля: объемная активность (ОА) радона (^{222}Rn) и торона (^{220}Rn); эквивалентная равновесная объемная активность (ЭРОА) радона; скрытая энергия дочерних продуктов распада радона и торона в воздухе; количество импульсов от изотопов полония. Изотопы ^{218}Po и ^{216}Po являются продуктами распада радона, а ^{214}Po и ^{212}Po – торона.

Результаты и их анализ

Возможность замены мониторинга радона измерением плотности потока α -, и/или β -излучения будем проверять по значимости корреляционной зависимости между этими характеристиками на различных временных масштабах (разного периода усреднения данных) в зависимости от сезона года.

Распространение радона в атмосфере после его выделения из почвы обусловлено, главным образом, турбулентной диффузией, и ограничено только радиоактивным распадом. В отличие от радона и его продуктов распада, на торон сильное влияние оказывает удаление от земной поверхности.

Средние за месяц значения. Динамика средних за месяц значений характеристик полей радона и α -, β -излучений в приземной атмосфере на высоте 1 м приведена на рис. 2.

Рис. 2. Сезонные вариации характеристик поля радона и плотность потока α - и β -излучений

Хорошо видно, что сезонная динамика средних за месяц характеристик радонового поля, и потоков α -, β -излучений существенно различается. Тем не менее, довольно схожая динамика наблюдается между плотностью потока α -излучения и ОА альфа-излучающих аэрозольных дочерних продуктов распада радона (ЭРОА).

Рис. 3. Регрессионные зависимости между: а) ОА радона и ОА торона, Бк/м³; б) между ОА радона и ЭРОА радона, Бк/м³

Построим регрессионные зависимости между ОА радона и торона (Рис. 3а), а также между ОА радона и ЭРОА радона по средним за месяц значениям (Рис. 3б), и рассчитаем коэффициенты корреляции. Результаты анализа показали, что значимая ($K = 0.86$) положительная корреляция наблюдается между среднемесячными значениями ОА радона и ЭРОА радона. Связи между радоном и тороном на этом временном масштабе не было выявлено.

Рис. 4. Регрессионные зависимости между характеристиками радонового поля и плотностью потока α -, β -излучения

На рис. 4 а-е приведены в алфавитном порядке регрессионные зависимости между измеренными в приземной атмосфере средними за месяц значениями:

- ОА радона и плотностью потока α -излучения;
- ЭРОА и плотностью потока α -излучения;
- ОА торона и плотностью потока α -излучения;
- ОА радона и плотностью потока β -излучения;
- ЭРОА радона и плотностью потока β -излучения;
- ОА торона и плотностью потока β -излучения.

По результатам анализа получена значимая положительная корреляция (0.71) между средними за месяц значениями ЭРОА радона и плотности потока α -излучения. Это позволяет сделать вывод о том, что измеряемую радиометром величину ЭРОА радона можно заменить величиной плотности потока α -излучения, измеряемой в нашем эксперименте детектором БДПА-01 при рассмотрении динамики средних за месяц значений. Другие характеристики радонового поля показали слабую корреляцию с α - и β -фоном, либо ее отсутствие.

Средние за сезон значения. Рассчитанные коэффициенты между средними за сезон года значениями рассматриваемых радиационных величин приведены в виде гистограммы на рис. 5.

Рис. 5. Коэффициенты корреляции между характеристиками радонового поля и плотностью потоков α -, β -излучения в разные сезоны года

Значимая корреляция между ЭРОА радона и плотностью потока α -излучения наблюдается в весенний, летний и осенний периоды, кроме зимнего. Других закономерностей не было обнаружено.

Только весной 2017 года была выявлена значимая ($K = 0.68$) положительная корреляция между объемной активностью торона и плотностью потока β -излучения.

Масштаб от мгновенных до среднесуточных значений. На рис. 6 представлены регрессионные зависимости между мгновенными (длительность одного измерения 30 мин.) значениями ЭРОА радона и плотностью потока α -излучения в разные сезоны года, с указанием рассчитанных коэффициентов корреляции.

Рис. 6. Регрессионные зависимости между ЭРОА радона и ПП α -излучения

Анализ результатов подтвердил значимую положительную связь между величиной ЭРОА радона и плотностью потока α -излучения, которая проявляется сильнее в весенний период года.

Корреляционный анализ между ОА радона, торона и плотностью потока α -излучения позволил выявить значимую связь только в апреле и июле (для торона – только в июле), и то при большом усреднении данных за 2 суток (рис. 7).

Рис. 7. Регрессионные зависимости между ПП α -излучения и ОА: а) радона; б) торона

При рассмотрении мгновенных значений, а также усредненных за 1–3 часа, значимой корреляции не наблюдается ни для одной из характеристик поля радона с альфа или бета-фоном в городской атмосфере. При увеличении периода усреднения от 1 часа до суток и более коэффициент корреляции слегка увеличивается. В целом, значимые корреляции между ОА радона и плотностью потока α -излучения можно

обнаружить только в отдельные периоды года длительностью от нескольких дней до нескольких недель, характеризующиеся отсутствием атмосферных осадков.

Значимой связи между характеристиками радонового поля и плотностью потока β -излучения не было обнаружено. Объяснением этого может служить тот факт, что измерения производились на высоте 1 м от земной поверхности, где еще велико влияние на суммарный β -фон потока β -излучения почвенных радионуклидов. Возможно, на больших высотах может быть обнаружена искомая связь, что требует отдельной проверки.

Закончим рассмотрением связи между двумя характеристиками – объемной активностью радона и объемной активностью дочерних продуктов его распада, характеризующей величиной ЭРОА. Собственно, связь между ними следует из определения через коэффициент радиоактивного равновесия между радоном и его ДПР.

Результаты измерений коэффициента равновесия хорошо вписываются в общие представления о циркуляции атмосферы. В ночное время наблюдается снижение турбулентности атмосферы, что приводит к восстановлению радиоактивного равновесия между радоном и ДПР на высоте измерения. Нарушение нормального суточного хода и снижение ОА аэрозольных ДПР радона происходит вследствие выпадения атмосферных осадков. Динамику коэффициента равновесия за период исследования можно видеть на рис. 8, значения которого изменяются от 0.2 – в мае до 0.6 – в декабре.

Рис. 8. Изменение коэффициента радиоактивного равновесия между радоном и его ДПР

Нарушение равновесия хорошо объясняет связь между величинами ОА радона и ЭРОА радона, которая показана на рис. 9.

Рис. 9. Изменение коэффициентов корреляции между часовыми значениями ОА радона и ЭРОА радона

Корреляция между средними за месяц значениями ОА радона и ЭРОА радона изменяется от слабой до значимой в течение всего периода наблюдения, однако, не превышающая 0.7 (в январе 2017).

Динамика коэффициента радиоактивного равновесия (рис. 8) и коэффициента корреляции (рис. 9) сильно схожа. В теплый сезон года наблюдается слабая связь между ОА и ЭРОА радона, а в холодный период года, когда турбулентность атмосферы снижается, увеличивается коэффициент равновесия и усиливается связь между активностью α -излучающего радона и α -, β -излучающими аэрозольными продуктами распада.

После многолетней проверки, при подтверждении неизменного сезонного хода коэффициента радиоактивного равновесия, можно будет определить возможность замены мониторинга радона мониторингом плотности потока альфа-излучения с соответствующей корректировкой.

Заключение

Анализ результатов проверки возможности замены промышленно выпускаемых радиометров радона более экономичными детекторами альфа- и/или бета-излучения для проведения круглогодичного и периодического мониторинга радона в городской атмосфере позволил сделать следующие выводы.

1. Выявлена синхронность в динамике интегральных значений ОА, ЭРОА атмосферного радона и плотности потока альфа-излучения на годовом масштабе.

2. Регрессионный и корреляционный анализы результатов измерений ОА изотопов радона характеристик радонового поля и плотности потоков альфа- и бета-излучений в городской атмосфере позволили определить:

- значимые корреляции между мгновенными значениями ОА радона и ПП альфа-излучения в отдельные периоды года длительностью от нескольких дней до нескольких недель;

- значимую корреляцию между интегральными (средними за месяц) значениями ЭРОА радона и плотности потока альфа-излучения.

3. При подтверждении сезонной закономерности в динамике коэффициента радиоактивного равновесия между радоном и дочерними продуктами его распада можно будет осуществить замену мониторинга радона в городской атмосфере мониторингом плотности потока альфа-излучения с соответствующей корректировкой.

4. Измерение альфа-фона в городской среде может надежно заменить мониторинг величины ЭРОА радона, которая является нормируемой и характеризует внутреннее облучение населения альфа-излучением.

Использование более экономичных, по сравнению с радиометрами, детекторов альфа-излучения для мониторинга (периодических измерений) радона и его продуктов распада на территории города позволит на порядки увеличить объем измерений, производить синхронные исследования на дистанционно разнесенных участках городской территории. Продолжение исследований в этом направлении позволит получить оценки доз облучения населения при их пребывании на территориях различных типов застройки и назначения. Результаты исследования покажут пути устранения потенциальных угроз повышенного облучения населения и повышения качества городской среды, соответствующие современным мировым тенденциям в науке и инженерии, и могут быть востребованы в структурах градостроительства для исключения техногенных угроз для общества.

Конкурирующие интересы. Конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.

Авторский вклад и ответственность. Автор участвовал в написании статьи и полностью несет ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать.

Список литература/References

- [1] Нагорский П. М., Зенченко Т. А., Пустовалов К. Н., Черепнев М. С., Яковлев Г. А., Яковлева В. С., “Влияние города (техносферы) на вариации электрофизических радиационных величин”, *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 2017, № 4(20), 64-75. [Nagorskiy P. M., Zenchenko T. A., Pustovalov K. N., Cherepnev M. S., Yakovlev G. A., Yakovleva V. S., “Vliyaniye goroda (tekhnosfery) na variatsii elektrofizicheskikh radiatsionnykh velichin”, *Vestnik KRAUNTS. Fiz.-mat. nauki*, 2017, № 4(20), 64-75].

Список литературы (ГОСТ)

- [1] Нагорский П. М., Зенченко Т. А., Пустовалов К. Н., Черепнев М. С., Яковлев Г. А., Яковлева В. С. Влияние города (техносферы) на вариации электрофизических радиационных величин // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2017. № 4(20). С. 64-75. DOI: 10.18454/2079-6641-2017-20-4-64-75

Distortion of radiation background in urban environment due to aggressive influence of technosphere. Stage 1: radon and alpha-background

G. A. Yakovlev¹, V. S. Yakovleva²

¹ Tomsk State University, Tomsk, Lenina avenue, 36, Russia

² Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Lenina avenue, 30, Russia

E-mail: vsyakovleva@tpu.ru

The work is devoted to testing the possibility of replacing industrially produced radon radiometers with more economical detectors of alpha and/or beta-radiation for conducting year-round and periodic monitoring of radon in the urban atmosphere. A significant correlation was revealed between the integral (monthly average) values of the EEC of radon and the flux density of alpha radiation. This confirms that the monitoring of the alpha background in the urban environment can reliably replace the monitoring of the EEC of radon, which is normalized and characterizes the internal exposure of the population to alpha radiation. It was found that with a known seasonal pattern in the dynamics of the coefficient of radioactive equilibrium between radon and its daughter decay products, it will also be possible to replace monitoring of radon in the urban atmosphere by monitoring the flux density of alpha radiation.

Key words: alpha-radiation, beta-radiation, radon, background radiation, urban environment, technosphere.

DOI: 10.26117/2079-6641-2020-32-3-154-164

Original article submitted: 05.09.2020

Revision submitted: 04.10.2020

For citation. Yakovlev G. A., Yakovleva V. S. Distortion of radiation background in urban environment due to aggressive influence of technosphere. Stage 1: radon and alpha-background. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2020, **32**: 3, 154-164. DOI: 10.26117/2079-6641-2020-32-3-154-164

Competing interests. The authors declare that there are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

Contribution and Responsibility. All authors contributed to this article. Authors are solely responsible for providing the final version of the article in print. The final version of the manuscript was approved by all authors.

The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)

© Yakovlev G. A., Yakovleva V. S., 2020

Funding. This research received no specific grant from any funding agency in the public, commercial, or not-for-profit sectors