

ИЗМЕНЕНИЯ ОБЪЕМНОЙ АКТИВНОСТИ РАДОНА В МНОГОЭТАЖНЫХ ЗДАНИЯХ В ПЕРВЫЕ ГОДЫ ПОСЛЕ ПОСТРОЙКИ

Илья Владимирович Ярмошенко, Алексей Владимирович Васильев,
Георгий Петрович Малиновский, Александра Дмитриевна Онищенко,
Михаил Владимирович Жуковский

Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук (ИПЭ УрО РАН);
г. Екатеринбург, Российская Федерация

В работе представлены результаты масштабного исследования долгосрочной динамики объемной активности (ОА) радона в современных многоэтажных жилых зданиях повышенного класса энергоэффективности в мегаполисах России. Целью исследования был анализ изменений концентрации радона в первые годы эксплуатации зданий и оценка связи этих изменений с деградацией строительных конструкций и снижением энергоэффективности. Исследование базируется на комплексном анализе данных, полученных с помощью двух взаимодополняющих методов: интегрирующих измерений в более чем 500 квартирах (130 в Екатеринбурге и 388 в других крупных городах) и длительного непрерывного мониторинга с часовым разрешением в 11 квартирах, включая три случая повторных измерений с интервалом 5–7 лет.

Была выявлена устойчивая тенденция к снижению ОА радона в первое десятилетие эксплуатации зданий. В г. Екатеринбурге средние значения ОА радона снижаются со 120 Бк/м³ в новостройках до 52 Бк/м³ в зданиях возрастом 11–20 лет. Особое внимание уделено анализу взаимосвязи между изменением ОА радона и параметрами воздухообмена, что позволило установить ключевые факторы, влияющие на этот процесс.

Результаты работы имеют важное практическое значение для двух областей:

- *радиационная безопасность населения: полученные данные позволяют уточнить оценки долгосрочных доз облучения в современных энергоэффективных домах и указывают на необходимость приоритетного контроля радона в новостройках;*
- *строительство и энергосбережение: выявленная обратная связь между возрастом здания, проницаемостью конструкций и концентрацией радона является важным индикатором для оценки реальной долговременной эффективности энергосберегающих технологий и прогнозирования изменения эксплуатационных характеристик зданий.*

Ключевые слова: радон, жилые здания, энергосбережение, воздухообмен

Благодарности. Исследование выполнено за счет субсидий Минобрнауки РФ на выполнение научной темы FUMN-2024-0001.

Для цитирования: Ярмошенко И.В., Васильев А.В., Малиновский Г.П., Онищенко А.Д., Жуковский М.В. Изменения объемной активности радона в многоэтажных зданиях в первые годы после постройки // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2025. № 4. С. 73–82. DOI: 10.22227/2311-1518.2025.4.73-82

RADON CONCENTRATION CHANGES IN MULTI-STOREY BUILDINGS IN THE FIRST YEARS AFTER CONSTRUCTION

Ilya V. Yarmoshenko, Alexey V. Vasilyev, Georgy P. Malinovsky,
Aleksandra D. Onishchenko, Mikhail V. Zhukovsky

Institute of Industrial Ecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IPE UB RAS);
Ekaterinburg, Russian Federation

The paper presents the results of a large-scale study of the long-term dynamics of radon concentration in modern multi-storey residential buildings of increased energy efficiency class in Russian megalopolises. The aim of the study was to analyze changes in radon concentration during the first years of building operation and to assess the relationship between these changes and the degradation of building structures and the reduction of energy efficiency. The research is based on a comprehensive analysis of data obtained using two complementary methods: integrating measurements in more than 500 apartments (130 in Ekaterinburg and 388 in other large cities), and long-term continuous monitoring with hourly resolution in 11 apartments, including three cases of repeated measurements at intervals of 5–7 years.

A stable trend towards a decrease in radon VA in the first decade of building operation was identified. In Ekaterinburg, the average values of radon VA decrease from 120 Bq/m³ in new buildings to 52 Bq/m³ in buildings aged 11–20 years. Particular attention is paid to the analysis of the relationship between changes in radon VA and air exchange parameters, which allowed us to identify the key factors influencing this process.

The obtained results are of crucial practical importance for two areas:

- *radiation safety of the population: the data allow for refining estimates of long-term radiation doses in modern energy-efficient houses and indicate the necessity of priority radon control in new buildings;*
- *construction and energy saving: the revealed inverse relationship between building age, permeability of structures, and radon concentration is an important indicator for assessing the real long-term effectiveness of energy-saving technologies and for predicting changes in the operational characteristics of buildings.*

Keywords: radon, residential buildings, energy efficiency, air exchange

Acknowledgements. The study was carried out at the expense of subsidies from the Ministry of Education and Science of the Russian Federation for the implementation of the scientific topic FUMN-2024-0001.

For citation: Yarmoshenko I.V., Vasilyev A.V., Malinovskiy G.P., Onishchenko A.D., Zhukovsky M.V. Intensification of biological wastewater treatment plants using loading material. *Biosphere Compatibility: Man, Region, Technology*. 2025; 4:73-82. DOI: 10.22227/2311-1518.2025.4.73-82 (rus.).

Введение

Радоновая безопасность в жилых помещениях продолжает оставаться актуальной задачей радиационной гигиены. Как убедительно показано в работах [1, 2], существующие уровни облучения радоном в жилых помещениях вносят существенный вклад в риск развития рака легких, что требует постоянного мониторинга и анализа факторов, влияющих на концентрацию этого радиоактивного газа.

Современные строительные технологии, направленные на повышение энергоэффективности зданий, создают новые вызовы в области радиационной безопасности. Как показано в целом ряде исследований, при одинаковых условиях эксплуатации происходит значительное увеличение объемной активности (ОА) радона в домах повышенного класса энергоэффективности с низкой проницаемостью оболочки здания по сравнению с домами низкого класса энергоэффективности [3–8]. Ключевым фактором, влияющим на радоновую обстановку в зданиях с повышенным классом энергоэффективности, является низкая кратность воздухообмена (КВО) в неконтролируемом режиме эксплуатации здания, когда перекрыты пути естественного притока свежего воздуха и отключены другие системы вентиляции [9]. Российские исследования последних лет [10, 11] демонстрируют, что в зданиях, построенных после 2000 г. с применением энергосберегающих технологий, средние значения ОА радона существенно превышают аналогичные значения для зданий старой постройки. При этом особый интерес представляет изучение динамики ОА радона в первые годы эксплуатации зданий, когда происходят наиболее интенсивные изменения физико-механических характеристик строительных конструкций.

Значение ОА радона внутри зданий непостоянно и может изменяться со временем под воздействием различных факторов. Эти изменения можно разделить на три категории: суточные, среднесрочные и долгосрочные вариации [12]. Суточные вариации

связаны с изменениями климатических параметров и условиями проветривания помещений в течение дня. Среднесрочные сезонные изменения обусловлены теми же факторами, но происходят в течение года. Долгосрочные вариации могут быть связаны как с климатическими изменениями год от года, так и с процессами, происходящими в зданиях. Долгосрочные вариации ОА радона изучаются как в контексте анализа факторов, влияющих на его накопление в жилищах, так и в эпидемиологических исследованиях связи между радоном и раком легкого (например, исследования S. Darby в Канаде и Италии [13]). Анализ долгосрочных изменений ОА радона может быть источником дополнительной информации о процессах, связанных со снижением энергоэффективности зданий после их постройки, связанных с изменением проницаемости ограждающих конструкций здания. Эти процессы включают усадку фундамента, просыхание бетонных конструкций и появление трещин.

В России политика повышения энергоэффективности новых зданий в первую очередь осуществляется в отношении многоэтажных, многоквартирных зданий. Как показало недавнее исследование в крупных мегаполисах, почти все здания, возведенные после 2000 г., могут быть отнесены к повышенному классу энергоэффективности. В этих домах концентрация радона примерно в 1,5 раза выше, чем в многоэтажных домах, возведенных с применением менее развитых энергосберегающих подходов до 2000 г. [9].

Цель настоящего исследования — изучить долгосрочные изменения ОА радона в современных многоэтажных жилых зданиях в первое десятилетие после их постройки и оценить их связь с изменением энергоэффективности зданий со временем. Гипотеза данного исследования предполагает, что деградация строительных материалов и конструкций оказывает прямое влияние на эффективность энергосбережения и условия накопления радона.

Модели и методы

Для проверки гипотезы исследования были проанализированы результаты выборочных радоновых обследований с использованием интегрирующих средств измерения и данных длительных мониторинговых измерений ОА радона в многоквартирных зданиях повышенного класса энергоэффективности. При анализе учитывался возраст здания на момент проведения измерений.

Исследование проводилось с использованием комплексного подхода, сочетающего два взаимодополняющих метода измерения ОА радона.

Первый метод основан на применении радиометров радона типа RSKS венгерского производства, оснащенных твердотельными трековыми детекторами CR-39. Эти приборы экспонировались в жилых помещениях в течение 2–3 месяцев, что позволило охватить исследованиями более 1000 квартир в различных городах России. Для обеспечения точности и воспроизводимости результатов измерений радиометры радона RSKS были также откалиброваны в лаборатории ИПЭ УрО РАН. Для калибровки использовался эталон NIST (SRM 4973–16) с известной скоростью эманирования и активностью радия-226, камера известного объема и радон-монитор AlphaGuard PQ2000Pro. Учет сезонных колебаний концентрации радона осуществлялся на основе ранее разработанной модели [14].

Подходы к формированию квазислучайной выборки для проведения радонового обследования представлены в работе [11]. Радиометры радона передавались участникам обследования лично. В измерительный комплект входило два радиометра, анкета и подробная инструкция по размещению радиометров радона в квартире. В анкете участники измерений указывали характеристики здания и своей квартиры, дату начала и окончания экспонирования радиометров. Время экспозиции радиометров радона в квартирах составляло 2–3 месяца. Расчет среднегодовой ОА радона проводился с учетом модели сезонных вариаций радона в многоквартирных зданиях, представленной в работе [15].

В ходе ранее выполненных научных проектов проведено радоновое обследование квартир в многоквартирных жилых зданиях в Екатеринбурге, Москве, Санкт-Петербурге, Нижнем Новгороде, Челябинске, Краснодаре, Новосибирске, Тюмени и Салехарде. Результаты этих исследований в части частотного распределения ОА радона и факторов, влияющих на ОА радона, представлены в работах [10, 11, 15]. Необходимо отметить, что такой фактор, как возраст здания, на момент измерения ранее не рассматривался.

В 2022–2023 гг. в Екатеринбурге было проведено специальное радоновое обследование в новых зда-

ниях. В выборку включались многоквартирные здания, возведенные не ранее 15 лет до проведения измерений (т.е. после 2008 г.). Всего были получены данные о значениях ОА радона в 130 квартирах. Для дальнейшего анализа результаты радоновых исследований в г. Екатеринбурге, полученные в рамках различных проектов, были объединены.

Статистическая обработка данных включала применение методов множественной нелинейной регрессии для анализа зависимости ОА радона от возраста здания, а также многомерного дисперсионного анализа для сравнения различных групп зданий.

Второй метод предполагал проведение непрерывного длительного мониторинга с помощью профессиональных радон-мониторов AlphaGuard PQ2000Pro, которые обеспечивали регистрацию ОА радона с часовым разрешением [15]. Этот подход был реализован в 11 квартирах, причем в трех случаях удалось провести повторные измерения через 5–7 лет после первоначального обследования (табл. 1). Особое внимание уделялось анализу параметров воздухообмена, в частности расчету эффективной площади натекания (ELA), что позволило количественно оценить изменения проницаемости строительных конструкций.

Таблица 1. Характеристика объектов для непрерывного мониторинга ОА радона

Характеристика	Квартиры		
	Kul-1*	Sem-6*	LR2**
Год постройки	2012	2013	2019
Этажность здания	16	9	19
Этаж	13	2	9
Материал стен	Моно-лит	Моно-лит	Моно-лит
УА Ra-226 в строительных материалах, Бк/кг	33	37	48
Год первого измерения ОА радона	2013	2016	2019
Год повторного измерения ОА радона	2020	2023	2024

Примечание: * — идентификатор указан в соответствии с работой [15]; ** — идентификатор указан в соответствии с работой [16].

Экспозиция радон-мониторов AlphaGuard PQ2000Pro варьировалась от 1 до 7 месяцев (преимущественно не менее 5 месяцев). Данные измерения представляют собой часовые временные серии ОА радона, радон-монитор работал в диффузионном режиме. Для анализа результатов были использованы разработанные ранее подходы к анализу результатов мониторинговых измерений [17]. В частности, анализ часовых временных серий ОА

радона позволяет проанализировать зависимость кратности воздухообмена от температуры и, исходя из этой зависимости, рассчитать эффективную площадь натекания ELA для неконтролируемого режима вентиляции [18].

Результаты исследования и их анализ

Проведенный анализ выявил четкую зависимость ОА радона от времени эксплуатации здания. На рис. 1, 2 показана зависимость среднегодовой ОА радона в квартирах многоквартирных домов, построенных после 2010 г. в Екатеринбурге и других городах России, от возраста здания на момент измерения. В Екатеринбурге эта зависимость описывается убывающей степенной функцией, показатель степени которой статистически значимо отличается от нуля ($p < 0,05$). Регрессионная модель показала, что начальное значение ОА радона в новых зданиях составляет 155 ± 20 Бк/м³, с показателем степени $0,13 \pm 0,03$ год⁻¹. Это соответствует приблизительно двукратному уменьшению ОА радона за девятилетний период. Аналогичная тенденция наблюдается и в других городах России с более низкими средними значениями ОА радона, хотя она статистически незначима ($p > 0,05$). Возраст здания объясняет примерно 17 % вариации ОА радона в Екатеринбурге и менее 2 % в других городах.

Объем выборки в Екатеринбурге позволяет сформировать достаточно большие ($N > 10$ квартир) подгруппы зданий в зависимости от года постройки и возраста на момент измерения. Возрастная динамика демонстрирует последовательное снижение

средних значений ОА радона: от 120 Бк/м³ в зданиях возрастом 0–5 лет до 52 Бк/м³ для зданий 11–20 лет (табл. 2).

Таблица 2. Характеристики ОА радона в выборке зданий в г. Екатеринбурге

Возраст здания на момент измерения, лет	N	AM , Бк/м ³	GM , Бк/м ³	$SD_{\ln}$
0–5	91	120	84	0,75
6–10	74	83	62	0,67
11–20	48	52	37	0,66
0–20 (все данные)	213	92	63	0,77

Примечание: N — размер выборки; AM — среднее арифметическое; GM — среднее геометрическое; $SD_{\ln}$ — стандартное отклонение логарифма.

На рис. 3 представлены средние геометрические значения ОА радона в этих подгруппах с 95 % доверительными интервалами. Общая тенденция снижения ОА радона с возрастом зданий статистически значима (MANOVA, $p < 0,05$). Среднеарифметическая ОА радона в зданиях особенно высока в первые годы после строительства для всех периодов строительства зданий: 138, 127 и 115 Бк/м³ для периодов строительства 2008–2011, 2010–2016 и 2017–2023 гг. соответственно.

Особый интерес представляют результаты мониторинговых измерений. Средние значения ОА радона в квартирах Sem-6 и Kul-1, рассчитанные по температурным интервалам в 3 °С, представлены на рис. 4. Как видно на рисунке, через семь лет после первых измерений наблюдалось значительное сни-

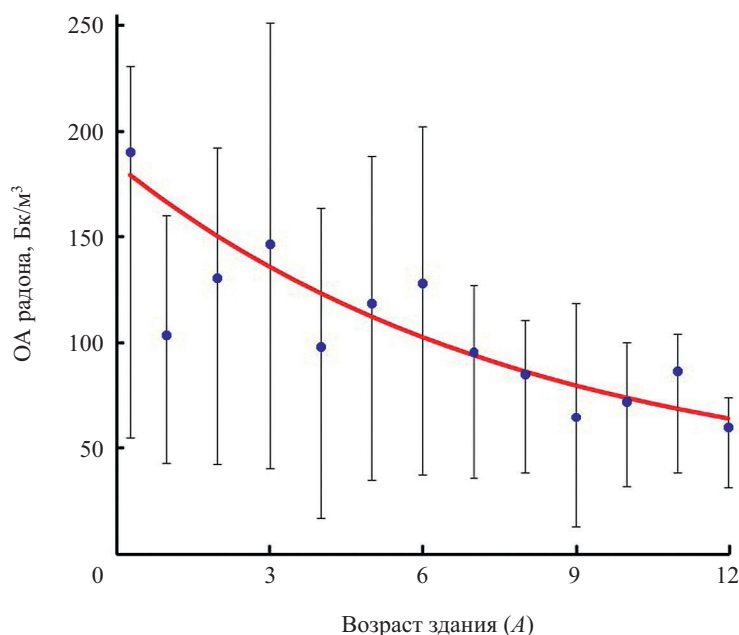


Рис. 1. Зависимость средних арифметических ОА радона в группах по возрасту здания на момент измерения ОА радона от возраста здания в г. Екатеринбурге. Точки — средние арифметические; красная линия — модель: $Rn = 155 \cdot \exp(-0,13 \cdot A) + 30$; усы — интервал от СГ/ГСО до СГ · ГСО (интервал попадания 66,7 % значений ОА радона)

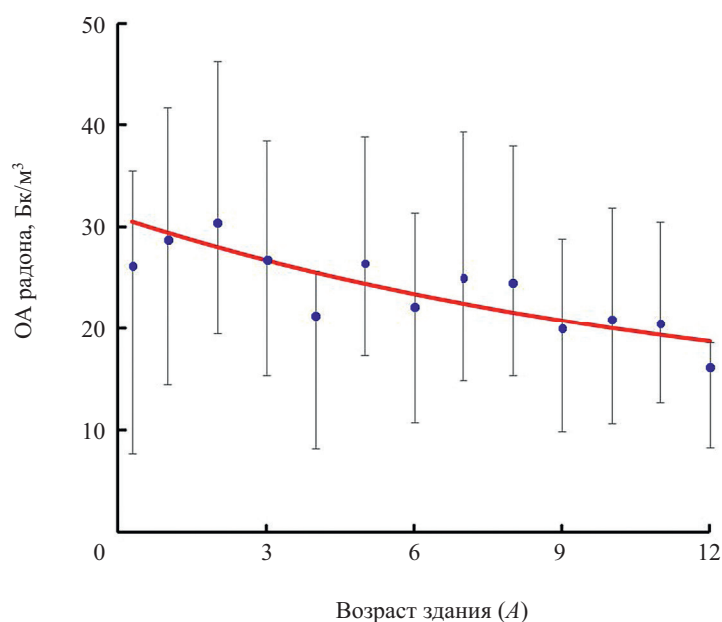


Рис. 2. Зависимость средних арифметических ОА радона в группах по возрасту здания на момент измерения ОА радона от возраста здания. Точки — средние арифметические; красная линия — модель: $Rn = 20 \cdot \exp(-0,08 \cdot A) + 11$; усы — интервал от СГ/ГСО до СГ · ГСО (интервал попадания 66,7 % значений ОА радона)

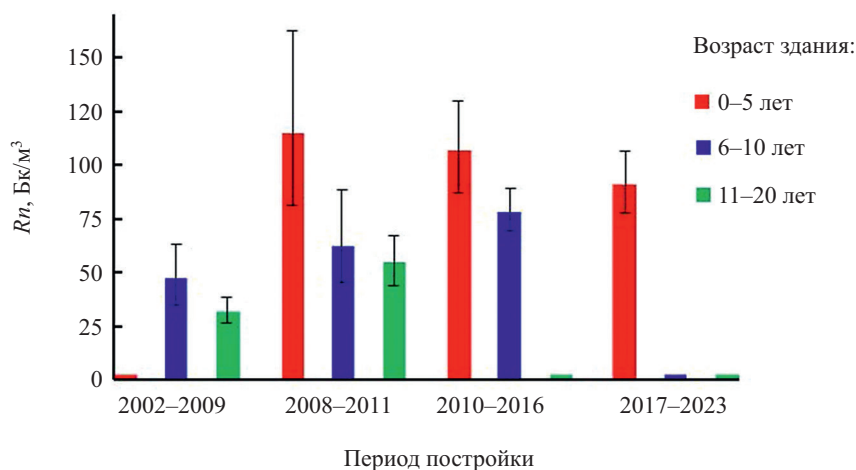


Рис. 3. Средние геометрические значения ОА радона в группах зданий разных лет постройки (с 95%-ными доверительными интервалами)

жение ОА радона в обеих квартирах. В целом, зависимость ОА радона в помещениях от температуры наружного воздуха соответствует закономерностям, наблюдаемым в других многоквартирных многоэтажных домах, и существенно не изменилась за семь лет [15]. При этом температурные зависимости сохранили свой характер (рис. 4), что свидетельствует о неизменности основных механизмов поступления радона.

В квартире LR2 повторные измерения через 5 лет показали 2–3-кратное снижение максимальных значений ОА радона при одинаковых условиях вентиляции (рис. 5). Выбранные графики включают кривые накопления радона при закрытых окнах и примерно одинаковых значениях разницы тем-

ператур наружного и внутреннего воздуха (ΔT). На рис. 5 показано, что максимальные уровни ОА радона, достигаемые через несколько часов после закрытия окон, в 2019 г. были в два-три раза выше, чем в 2024 г. При анализе временных рядов ОА радона мы также рассматривали другие кривые накопления радона, связанные с интервалами неконтролируемого проветривания. Эти интервалы не представлены в данной статье, поскольку в рядах, выполненных в разные годы после строительства, не было обнаружено близких аналогов по длительности и ΔT . Однако следует отметить, что эти ряды в целом подтверждают вывод, что ОА радона в помещениях со временем снижается в многоквартирных энергоэффективных зданиях.

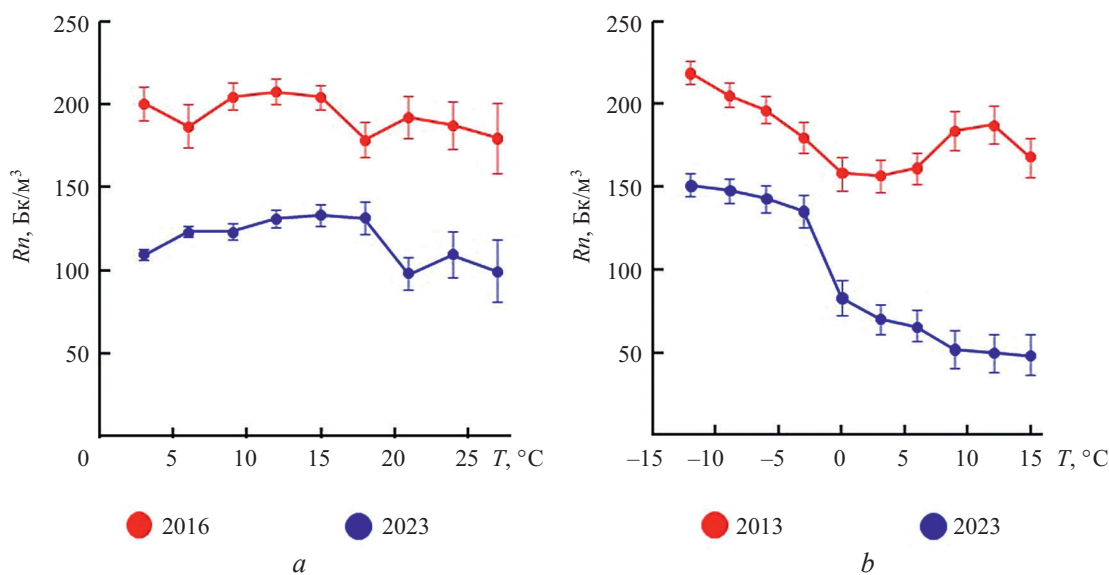


Рис. 4. Средние значения ОА радона в зависимости от температуры наружного воздуха по данным повторных измерений в двух квартирах: *a* — Sem-6; *b* — Kul-1

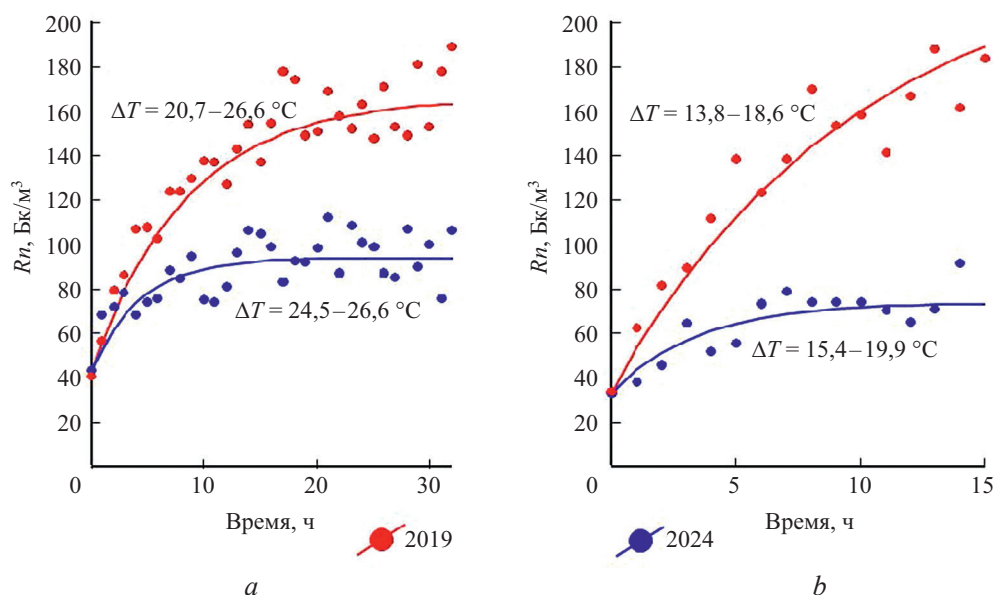


Рис. 5. Временные ряды ОА радона в квартире LR2: *a* — 2019 г.; *b* — 2024 г.

Анализ параметров воздухообмена выявил устойчивую тенденцию к увеличению проницаемости строительных конструкций. Параметр K_{ELA} , характеризующий эффективную площадь натекания, возрос примерно в два раза за десятилетний период (рис. 6), что соответствует увеличению кратности воздухообмена с 0,1 до 0,26 ч⁻¹ при перепаде температур 20 °C.

В рассматриваемой группе возраст здания обуславливает 74 % изменчивости K_{ELA} . Увеличение показателя K_{ELA} в режиме неконтролируемой вентиляции свидетельствует о росте ELA и, соответственно, об увеличении проницаемости ограждающих конструкций.

Полученные результаты позволяют по-новому взглянуть на проблему радоновой безопасности в современных энергоэффективных зданиях. Обнаруженная динамика ОА радона принципиально отличается от наблюдаемой в малоэтажных строениях, где чаще отмечается рост активности в первые годы эксплуатации [19]. Это различие может быть объяснено преобладанием различных механизмов поступления радона: диффузионного — в многоэтажных зданиях и адвективного — в малоэтажных.

Как показано в табл. 2, ОА радона в исследованных новых многоэтажных зданиях Екатеринбурга относительно высока, достигает в среднем 92 Бк/м³, при этом в значительной доле квартир ОА радона превышает 100 Бк/м³. Предыдущие исследования

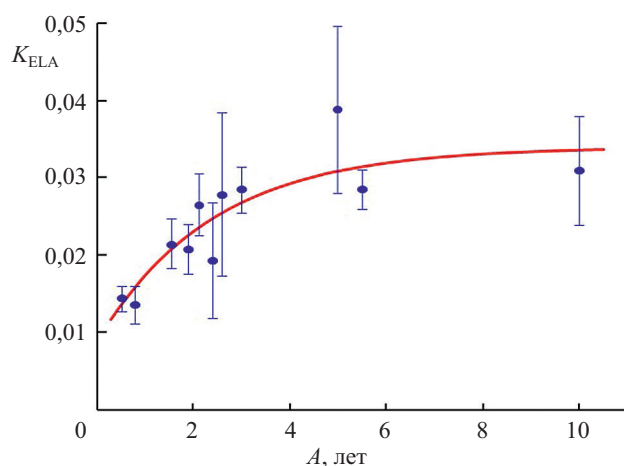


Рис. 6. Зависимость коэффициента K_{ELA} от возраста здания

показали, что уровни радона в новых энергоэффективных зданиях Екатеринбурга, по сравнению с другими городами России, выше из-за относительно более высокой средней удельной активности Ra-226 в строительных материалах и более холодного климата [10, 18].

Следующие результаты анализа свидетельствуют об уменьшении ОА радона в помещениях рассматриваемого типа с течением времени:

- статистически значимая обратная корреляция между ОА радона и возрастом здания на момент измерения в выборке зданий Екатеринбурга и других крупных городов (рис. 1, 2);
- статистически значимая зависимость средней геометрической ОА радона от возраста обнаружена в группах зданий Екатеринбурга одного периода постройки (рис. 3);
- статистически значимое снижение ОА радона при одинаковой температуре воздуха, выявленное при повторных измерениях через семь лет с использованием радонового монитора в двух квартирах (рис. 4);
- статистически значимое снижение уровня максимальной ОА радона при неконтролируемом воздухообмене через ограждающие конструкции (при закрытых окнах) по данным повторных измерений радоновым монитором (рис. 5);
- статистически значимая положительная корреляция между параметром K_{ELA} и возрастом здания по данным измерений радоновым монитором в зданиях г. Екатеринбурга (рис. 6).

По полученным результатам можно также оценить величину и характер уменьшения ОА радона с течением времени после строительства. При достижении ОА радона в помещениях рассматриваемого типа, достигающих значений более 50 Бк/м³, наблюдается значительное снижение ОА радона с течением времени. Результаты анализа измерений ОА радона в выборках зданий г. Екатерин-

бурга, представленные в табл. 1, рис. 1–3, показывают близкую величину скорости уменьшения ОА радона, которая составляет примерно два раза за девять лет. В других городах, где средние значения ОА радона меньше 40 Бк/м³, снижение ОА радона с течением времени менее выражено.

Причину снижения ОА радона в квартирах после строительства здания можно проанализировать на основе данных о зависимости параметра K_{ELA} от возраста здания, рассчитанных на основе анализа временного ряда ОА радона (рис. 6). В период, когда вентиляция осуществляется в неконтролируемом режиме (т.е. при закрытых окнах), параметр K_{ELA} характеризует проницаемость ограждающих конструкций здания. Согласно результатам анализа, представленным в данной статье, параметр K_{ELA} значительно увеличивается в первые несколько лет после строительства. В двух зданиях, обследованных через год после строительства, K_{ELA} составил 0,013, что соответствует КВО 0,1 ч⁻¹ при ΔT между помещением и наружной атмосферой 20 °С. Как показано на рис. 5, можно предположить, что через десять лет после строительства параметр K_{ELA} в рассматриваемом типе зданий увеличится до 0,03–0,035. Это соответствует КВО 0,22–0,26 ч⁻¹ при $\Delta T = 20$ °С. Таким образом, можно предположить, что с течением времени проницаемость ограждающих конструкций многоэтажных зданий высоких классов энергоэффективности увеличивается. Наблюдаемые изменения могут быть связаны с рядом физических процессов: деградацией уплотнительных материалов, образованием микротрещин в бетоне, изменением характеристик теплоизоляционных материалов. Эти процессы требуют дополнительного изучения, так как имеют важное значение для прогнозирования долговременных характеристик зданий.

Заключение

Выявлена статистически значимая устойчивая тенденция к снижению среднегодовой ОА радона в течение первого десятилетия эксплуатации зданий. В Екатеринбурге, где начальные концентрации наиболее высоки, средние значения снижаются со 120 Бк/м³ в новостройках (0–5 лет) до 52 Бк/м³ в зданиях возрастом 11–20 лет. Регрессионная модель демонстрирует приблизительно двукратное уменьшение ОА радона за девятилетний период.

Установлена ведущая роль изменения параметров воздухообмена в наблюдаемой динамике. На основе анализа временных рядов концентрации радона рассчитан параметр (K_{ELA}), характеризующий эффективную площадь натекания (ELA) ограждающих конструкций. Показано, что в течение десяти лет K_{ELA} увеличивается примерно в два раза

(с 0,013 до 0,03–0,035), что соответствует росту кратности воздухообмена с 0,1 до 0,26 ч⁻¹ (при $\Delta T = 20$ °C). Это прямо свидетельствует о прогрессирующем увеличении проницаемости оболочки здания.

Обнаруженная динамика (снижение ОА радона со временем) принципиально отличается от характерной для малоэтажных зданий, где часто наблюдается рост концентрации со временем. Это различие объясняется преобладанием диффузионного

механизма поступления радона из конструкционных материалов в многоэтажных зданиях в отличие от адвективного потока из грунта под малоэтажными строениями. Полученные данные позволяют связать снижение ОА радона с физическими процессами старения зданий. Эти процессы, снижая герметичность, одновременно уменьшают потенциал накопления радона внутри помещений, но могут вести к потере проектной энергоэффективности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Darby S., Hill D., Auvinen A., Barros-Dios J.M., Baysson H. et al. Radon in homes and lung cancer risk: a collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies // *British Medical Journal*. 2005. Vol. 330. Pp. 223–227. DOI: 10.1136/bmj.38308.477650.63
2. Ярмошенко И.В., Малиновский Г.П., Васильев А.В. Обобщение онкоэпидемиологических исследований связи рака легкого с радоном // *Медицина труда и промышленная экология*. 2019. Т. 59. № 2. С. 92–96. DOI: 10.31089/1026-9428-2019-59-2-92-96
3. Meyer W. Impact of constructional energy saving measures on radon levels indoors // *Indoor Air*. 2019. Vol. 29. Pp. 680–685. DOI: 10.1111/ina.12559
4. Pigg S., Cautley D., Francisco P.W. Impacts of weatherization on indoor air quality: A field study of 514 homes // *Indoor Air*. 2018. Vol. 28. Pp. 307–317. DOI: 10.1111/ina.12438
5. Symonds P., Rees D., Daraktchieva Z., McColl N., Bradley J., Hamilton I. et al. Home energy efficiency and radon: An observational study // *Indoor Air*. 2019. Vol. 29. Issue. 5. Pp. 854–864. DOI: 10.1111/ina.12582
6. Collignan B., Le Ponner E., Mandin C. Relationships between indoor radon concentrations, thermal retrofit and dwelling characteristics // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2016. Vol. 165. Pp. 124–130. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2016.09.009
7. Pampuri L., Caputo P., Valsangiacomo C. Effects of buildings' refurbishment on indoor air quality. Results of a wide survey on radon concentrations before and after energy retrofit interventions // *Sustainable Cities and Society*. 2018. Vol. 42. Pp. 100–106. DOI: 10.1016/j.scs.2018.06.034
8. Fojtikova I., Navratilova R.K. Influence of energy-saving measures on the radon concentration in some kindergartens in the Czech Republic // *Radiation Protection Dosimetry*. 2014. Vol. 160. No. 1–3. Pp. 149–153. DOI: 10.1093/rpd/ncu086
9. Ярмошенко И.В., Малиновский Г.П., Онищенко А.Д., Васильев А.В. Проблема облучения радоном в зданиях повышенного класса энергоэффективности // *Радиационная гигиена*. 2019. Т. 12. № 4. С. 56–65. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-4-56-65
10. Yarmoshenko I.V., Malinovsky G.P., Zhukovsky M.V., Izgagin V.S., Onishchenko A.D., Vasilyev A.V. Ra-226 in building materials as a source of indoor radon in high-rise residential buildings in Russian cities // *Science of The Total Environment*. 2024. Vol. 935. P. 173492. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.173492
11. Жуковский М.В., Ярмошенко И.В., Онищенко А.Д., Малиновский Г.П., Васильев А.В., Назаров Е.И. Оценка уровней содержания радона в многоэтажных зданиях на примере восьми крупных городов России // *Радиационная гигиена*. 2022. Т. 15. № 1. С. 47–58. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-1-47-58
12. Киселев С.М. и др. Радон: от фундаментальных исследований к практике регулирования. М. : ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 2016.
13. Darby S., Hill D., Deo H. et al. Residential radon and lung cancer-detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7148 persons with lung cancer and 14,208 persons without lung cancer from 13 epidemiologic studies in Europe // *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*. 2006. Vol. 32. No. 1. Pp. 1–83.
14. Васильев А.В., Жуковский М.В., Онищенко А.Д., Вишневский А.А. Строительные материалы как источник радона в зданиях, построенных по современным технологиям // *Строительные материалы*. 2013. № 4. С. 104–107.
15. Yarmoshenko I., Malinovsky G., Vasilyev A., Onishchenko A. Seasonal Variation of Radon Concentrations in Russian Residential High-Rise Buildings // *Atmosphere*. 2021. Vol. 12. P. 930. DOI: 10.3390/atmos12070930
16. Yarmoshenko I.V., Onishchenko A.D., Malinovsky G.P., Vasilyev A.V., Nazarov E.I., Zhukovsky M.V. Radon concentration in conventional and new energy efficient multi-storey apartment houses: results of survey in four Russian cities // *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10. P. 75274. DOI: 10.1038/s41598-020-74810-6

17. Васильев А.В., Жуковский М.В. Характер и периодичность изменения объемной активности радона в помещении // Аппаратура и новости радиационных измерений. 2015. № 2 (81). С. 42–47.
18. Yarmoshenko I.V., Malinovsky G.P., Zhukovsky M.V., Izgagin V.S., Onishchenko A.D., Vasilyev A.V. Relationship between Ra-226 activity concentration in building materials and indoor radon concentration: An example of Russian high-rise residential buildings // J Environ Radioact. 2024. Vol. 272. P. 107345. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2023.107345
19. Khan S.M., Pearson D.D., Rönnqvist T., Nielsen M.E., Taron J.M., Goodarzi A.A. Rising Canadian and falling Swedish radon gas exposure as a consequence of 20th to 21st century residential build practices // Sci Rep. 2021. Vol. 11. P. 96928. DOI: 10.1038/s41598-021-96628-6

Об авторах: **Илья Владимирович Ярошенко** — канд. физ.-мат. наук, директор; **Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук (ИПЭ УрО РАН)**; 620108, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, д. 20; ORCID: 0000-0002-6591-1513; ivy@ecko.uran.ru;

Алексей Владимирович Васильев — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник; **Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук (ИПЭ УрО РАН)**; 620108, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, д. 20; ORCID: 0000-0003-1916-741X; vav@ecko.uran.ru;

Георгий Петрович Малиновский — канд. биол. наук, зав. лабораторией урбанизированной среды; **Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук (ИПЭ УрО РАН)**; 620108, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, д. 20; georgy@ecko.uran.ru;

Александра Дмитриевна Онищенко — канд. биол. наук, ст. науч. сотрудник; **Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук (ИПЭ УрО РАН)**; 620108, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, д. 20; ORCID: 0000-0003-1832-1059; onischenko@ecko.uran.ru;

Михаил Владимирович Жуковский — д-р техн. наук, профессор, ведущий науч. сотрудник; **Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук (ИПЭ УрО РАН)**; 620108, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, д. 20; ORCID: 0000-0002-5729-6530; michael@ecko.uran.ru.

REFERENCES

1. Darby S., Hill D., Auvinen A., Barros-Dios J.M., Baysson H. et al. Radon in homes and lung cancer risk: a collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *British Medical Journal*. 2005; 330:223-227. DOI: 10.1136/bmj.38308.477650.63
2. Yarmoshenko I.V., Malinovsky G.P., Vasilyev A.V. Review of cancer epidemiological studies of the relationship between lung cancer and radon. *Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology*. 2019; 59(2):92-96. DOI: 10.31089/1026-9428-2019-59-2-92-96 (rus.).
3. Meyer W. Impact of constructional energy saving measures on radon levels indoors. *Indoor Air*. 2019; 29:680-685. DOI: 10.1111/ina.12559
4. Pigg S., Cautley D., Francisco P.W. Impacts of weatherization on indoor air quality: A field study of 514 homes. *Indoor Air*. 2018; 28:307-317. DOI: 10.1111/ina.12438
5. Symonds P., Rees D., Daraktchieva Z., McColl N., Bradley J., Hamilton I. et al. Home energy efficiency and radon: An observational study. *Indoor Air*. 2019; 29(5):854-864. DOI: 10.1111/ina.12582
6. Collignan B., Le Ponner E., Mandin C. Relationships between indoor radon concentrations, thermal retrofit and dwelling characteristics. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2016; 165:124-130. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2016.09.009
7. Pampuri L., Caputo P., Valsangiacomo C. Effects of buildings' refurbishment on indoor air quality. Results of a wide survey on radon concentrations before and after energy retrofit interventions. *Sustainable Cities and Society*. 2018; 42:100-106. DOI: 10.1016/j.scs.2018.06.034
8. Fojtikova I., Navratilova R.K. Influence of energy-saving measures on the radon concentration in some kindergartens in the Czech Republic. *Radiation Protection Dosimetry*. 2014; 160(1-3):149-153. DOI: 10.1093/rpd/ncu086
9. Yarmoshenko I.V., Malinovsky G.P., Onishchenko A.D., Vasilyev A.V. The problem of radon exposure in buildings of high energy efficiency class. *Radiation Hygiene*. 2019; 12(4):56-65. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-4-56-65 (rus.).
10. Yarmoshenko I.V., Malinovsky G.P., Zhukovsky M.V., Izgagin V.S., Onishchenko A.D., Vasilyev A.V. Ra-226 in building materials as a source of indoor radon in high-rise residential buildings in Russian cities. *Science of The Total Environment*. 2024; 935:173492. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.173492
11. Zhukovsky M.V., Yarmoshenko I.V., Onishchenko A.D., Malinovsky G.P., Vasilyev A.V., Nazarov E.I. Assessment of Radon Levels in Multi-Storey Buildings Using the Example of Eight Large Cities in Russia. *Radiation Hygiene*. 2022; 15(1):47-58. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-1-47-58 (rus.).

12. Kiselev S.M. et al. *Radon: From Fundamental Research to Regulatory Practice*. Moscow, A.I. Burnazyan Federal Medical Biophysical Center, 2016. (rus.).
13. Darby S., Hill D., Deo H. et al. Residential radon and lung cancer-detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7148 persons with lung cancer and 14,208 persons without lung cancer from 13 epidemiologic studies in Europe. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*. 2006; 32(1):1-83.
14. Vasilyev A.V., Zhukovsky M.V., Onishchenko A.D., Vishnevsky A.A. Building materials as a source of radon in buildings constructed using modern technologies. *Construction Materials*. 2013; 4:104-107. (rus.).
15. Yarmoshenko I., Malinovsky G., Vasilyev A., Onishchenko A. Seasonal Variation of Radon Concentrations in Russian Residential High-Rise Buildings. *Atmosphere*. 2021; 12(7):930. DOI: 10.3390/atmos12070930
16. Yarmoshenko I.V., Onishchenko A.D., Malinovsky G.P., Vasilyev A.V., Nazarov E.I., Zhukovsky M.V. Radon concentration in conventional and new energy efficient multi-storey apartment houses: results of survey in four Russian cities. *Scientific Reports*. 2020; 10:17724. DOI: 10.1038/s41598-020-74810-6
17. Vasiliev A.V., Zhukovsky M.V. The nature and periodicity of changes in the volumetric activity of radon in a room. *Equipment and news for radiation measurements*. 2015; 2(81):42-47. (rus.).
18. Yarmoshenko I.V., Malinovsky G.P., Zhukovsky M.V., Izgagin V.S., Onishchenko A.D., Vasilyev A.V. Relationship between Ra-226 activity concentration in building materials and indoor radon concentration: An example of Russian high-rise residential buildings. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2024; 272:107345. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2023.107345
19. Khan S.M., Pearson D.D., Rönqvist T., Nielsen M.E., Taron J.M., Goodarzi A.A. Rising Canadian and falling Swedish radon gas exposure as a consequence of 20th to 21st century residential build practices. *Scientific Reports*. 2021; 11:17551. DOI: 10.1038/s41598-021-96628-6

About the authors: **Ilya V. Yarmoshenko** — Ph.D. (Phys.-Math.), Director; **Institute of Industrial Ecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IPE UB RAS)**; 20 S. Kovalevskaya st., Yekaterinburg, 620108, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-6591-1513; ivy@ecko.uran.ru;

Alexey V. Vasilyev — Ph.D. (Eng.), Senior Researcher; **Institute of Industrial Ecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IPE UB RAS)**; 20 S. Kovalevskaya st., Yekaterinburg, 620108, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-1916-741X; vav@ecko.uran.ru;

Georgy P. Malinovsky — Ph.D. (Biol.), Head of the Laboratory of Urbanized Environment; **Institute of Industrial Ecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IPE UB RAS)**; 20 S. Kovalevskaya st., Yekaterinburg, 620108, Russian Federation; georgy@ecko.uran.ru;

Aleksandra D. Onishchenko — Ph.D. (Biol.), Senior Researcher; **Institute of Industrial Ecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IPE UB RAS)**; 20 S. Kovalevskaya st., Yekaterinburg, 620108, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-1832-1059; onishchenko@ecko.uran.ru;

Mikhail V. Zhukovsky — Dr. Sci. (Eng.), Professor, Leading Researcher; **Institute of Industrial Ecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IPE UB RAS)**; 20 S. Kovalevskaya st., Yekaterinburg, 620108, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-5729-6530; michael@ecko.uran.ru.