

## Сравнительный анализ накопления радона в зданиях различного класса энергоэффективности на примере пяти российских городов

И.В. Ярмошенко, А.Д. Онищенко, Г.П. Малиновский, А.В. Васильев, Е.И. Назаров, М.В. Жуковский

Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

*Выполнен сравнительный анализ объемной активности радона в современных жилых многоэтажных зданиях повышенного класса энергоэффективности и зданиях массовой типовой застройки городских кварталов XX в. и более раннего периода. Исследование проведено в российских городах, расположенных в различных климатических зонах, — Екатеринбурге, Краснодаре, Санкт-Петербурге, Салехарде, Челябинске. Величина объемной активности радона в зданиях измерялась с использованием интегральных радиометров радона на основе твердотельных трековых детекторов по единой методике. Обследованная выборка включала 498 квартир в многоквартирных зданиях. Среди всех обследованных типов зданий наибольшая средняя арифметическая объемной активности радона наблюдается в современных энергоэффективных домах — 43 Бк/м<sup>3</sup>. В других типах зданий получены следующие средние арифметические объемной активности радона: кирпичные дома этажностью 2–5 этажей — 35 Бк/м<sup>3</sup>, панельные пятиэтажные дома — 32 Бк/м<sup>3</sup>, панельные дома этажностью 7–12 этажей 1970–1990-х гг. постройки — 22 Бк/м<sup>3</sup>, кирпичные дома этажностью более 5 этажей 1970–1980-х гг. постройки — 20 Бк/м<sup>3</sup>, многоэтажные панельные здания, построенные в период с 1990 г. по настоящее время, — 24 Бк/м<sup>3</sup>. Результаты исследования подтверждают предположение о том, что в России в современных многоэтажных энергоэффективных домах объемная активность радона в среднем выше, чем в типовых жилых зданиях советского периода. Относительно повышенное накопление радона в энергоэффективных зданиях связано со снижением воздухопроницаемости оболочки здания и вклада свежего воздуха в общий воздухообмен. Несмотря на то, что в рамках настоящего исследования не выявлены случаи превышения гигиенических нормативов по содержанию радона в воздухе помещений, относительный рост объемной активности радона в зданиях повышенной энергоэффективности требует внимания с точки зрения реализации принципа оптимизации радиационной безопасности. В перспективе массовое строительство энергоэффективных зданий может привести к росту средних и коллективных доз облучения городского населения Российской Федерации.*

**Ключевые слова:** радон, обследование, радиационная безопасность, строительство, энергоэффективность.

### Введение

Радиоактивный газ радон образуется повсеместно в земной коре, породах, строительных материалах, имеет возможность мигрировать по газопроницаемым средам, а также диффундировать в пористом пространстве. Поступая из грунта и строительных материалов, радон накапливается в замкнутом объеме помещений, при этом его объемная активность (ОА) колеблется в очень широком диапазоне — от десятков до тысяч Бк/м<sup>3</sup>. Среднемировая ОА радона в жилых зданиях составляет, по разным данным, 40–50 Бк/м<sup>3</sup>, при этом наблюдается значительная вариабельность уровней накопления в различных жилищах. По данным работы [1], средняя арифметическая ОА радона в жилых зданиях регионов России варьирует от 20 до 230 Бк/м<sup>3</sup>. По нашим оценкам, при-

мерно в одном проценте жилищ России ОА радона превышает 400 Бк/м<sup>3</sup> [2].

Негативный эффект облучения радоном для здоровья человека показан в целом спектре эпидемиологических исследований. Наблюдения за состоянием здоровья шахтеров, подвергавшихся высоким уровням экспозиции на рабочих местах, показали, что радон является одной из значимых причин рака легкого. При этом онкологический риск может реализоваться через значительный период времени после облучения [3]. Тщательно спланированные исследования по принципу случай — контроль позволили численно оценить дополнительный относительный риск рака легкого при невысоких экспозициях в жилых зданиях [4, 5]. Экологические географически коррелированные исследования подтвердили статистическую

**Малиновский Георгий Петрович**

Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук

Адрес для переписки: 620990, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, д. 20; E-mail: georgy@ecko.uran.ru

связь онкологического риска и радона [6]. С учетом распространённости, уровней воздействия и негативного эффекта радон относится к глобальным факторам риска. По данным авторитетного международного научного издания Lancet [7], радон занимает пятое место среди факторов риска, связанных с загрязнением окружающей среды, и ответственен суммарно на планете за более чем 1 млн потерянных лет жизни ежегодно.

Облучение радоном в жилищах занимает особое место среди проблем радиационной безопасности. С учетом того, что защита населения от радона обеспечивается в контексте обращения с природной радиоактивностью при строительстве и эксплуатации зданий, важным аспектом проблемы радона является постоянное изменение строительных технологий и влияние этих изменений на процессы поступления радона в здание. Первые поселения человечества начали строить примерно 10 000 лет назад в эпоху неолитической революции и перехода к оседлому образу жизни. Неолитические дома представляли собой примитивные конструкции из саманного кирпича или глины, в которых жилое помещение располагалось непосредственно на грунте. Развитие строительных технологий включало появление фундамента, капитальных стен, систем отопления и вентиляции, многоэтажных строений, остекленных окон и т.д. Каждое из нововведений непосредственно или косвенным образом влияло на поток радона в системе грунт – здание. С началом использования минерального сырья в здании появился новый источник поступления радона – строительные материалы.

В современном обществе одним из требований к строительной отрасли является повышение энерго- и теплосбережения при эксплуатации зданий. Снижение энергопотребления достигается такими архитектурно-строительными решениями, как применение монолитных бетонных и железобетонных конструкций в сочетании с использованием эффективных утеплителей, герметичных стеклопакетов и внешних изоляционных панелей, а также специальных требований к планировке. В Российской Федерации меры по энергосбережению при строительстве новых зданий внедряются с конца 1990-х гг.

Использование решений, повышающих энергоэффективность здания, приводит к созданию условий для накопления радона в воздухе жилищ за счет снижения кратности воздухообмена. В рамках исследований, проведенных в Екатеринбурге, была показана низкая кратность воздухообмена в энергоэффективных многоэтажных зданиях в пассивном режиме эксплуатации, когда перекрыты пути естественного притока свежего воздуха и отключены другие системы вентиляции (порядка 0,1–0,2 час<sup>-1</sup>) [8, 9, 10]. Несмотря на то, что в активном режиме при открытых форточках или окнах обеспечивается приток свежего воздуха и воздухообмен соответствует установленным санитарным требованиям (не менее 0,35 час<sup>-1</sup>), в среднем кратность воздухообмена в энергоэффективных зданиях ниже, чем в других типах многоэтажных зданий. Влияние мер по энергосбережению и снижению воздухообмена в здании в режиме неконтролируемой вентиляции (пассивном режиме) на ОА радона было обнаружено в ряде исследований в различных странах мира. Как показано в работе [8], ОА радона в новых энергоэффективных зданиях в среднем не менее чем на 27% выше, чем в

обычных зданиях, в зависимости от климатических условий. В отдельных зданиях было обнаружено превышение санитарно-гигиенических нормативов.

Пример города Екатеринбурга продемонстрировал важность проблемы изучения накопления радона в энергоэффективных зданиях. Однако полученных данных недостаточно для обоснованных обобщающих выводов о степени влияния современных подходов к энергосбережению в жилищно-коммунальном хозяйстве на облучение радоном населения России и обоснования соответствующих мер защиты населения.

Задача настоящего исследования – оценить актуальность проблемы повышенного накопления радона в многоэтажных энергоэффективных зданиях в различных регионах России. Исследование проведено на примере пяти городов Российской Федерации с высокими темпами застройки и наибольшим потенциалом энергосбережения. В рамках исследования проведено радоновое обследование представительного числа помещений в зданиях различного класса энергоэффективности, построенных в различных климатических зонах и по различным технологиям.

## Материалы и методы

### Места проведения исследования

Для проведения радонового обследования отобраны пять городов Российской Федерации, расположенные в различных климатических зонах, в которых были достигнуты достаточно высокие темпы жилищного строительства в последние десятилетия. Четыре города являются крупными административными центрами с числом жителей около или более миллиона – Екатеринбург, Краснодар, Санкт-Петербург, Челябинск. Застройка этих городов включает исторический центр и прилегающие микрорайоны массового типового многоэтажного строительства XX и XXI вв. Также проведено обследование в городе Салехард, расположенном в арктической зоне РФ, в котором меры по энергосбережению принимались во все исторические периоды. Климатические характеристики обследованных городов представлены в таблице 1.

### Выборочное обследование

Основным методом исследования являлось обследование уровней накопления радона в специализированных выборках зданий. Базовые требования к организации и проведению радонового обследования выдвигались основоположником исследований по радоновой тематике в России Э.М. Крисиоком в 1980-х гг. [11, 12] и другими учеными за рубежом (обзор методов представлен в докладе МАГАТЭ [13]). Эти требования включают необходимость создания представительной выборки жилищ и проведение измерений среднегодовой ОА радона в жилищах с использованием единой методики.

В настоящем исследовании в каждом городе формировались две подвыборки. В первую включались квартиры в многоэтажных домах с повышенным классом энергоэффективности; во вторую – многоэтажные многоквартирные здания, относящиеся к пониженным классам энергоэффективности.

Выборки формировались на основе следующих способов:

Население и климатические характеристики обследованных городов

Таблица 1

Population and climatic conditions of the cities surveyed]

[Table 1

Город [City]	Население в 2019 г.* [Population in 2019]	Климат** [Climate]	Среднегодовая температура** [Average annual temperature]	Среднемесячная температура января** [Average temperature in January]	Среднемесячная температура июля** [Average temperature in July]
Екатеринбург [Ekaterinburg]	1 483 119	Умеренно-континентальный / континентальный [Temperate continental / continental]	3,0	-12,6	19,0
Челябинск [Chelyabinsk]	1 200 719	Умеренно-континентальный / резко-континентальный [Temperate continental / strongly continental]	3,2	-14,1	19,3
Санкт- Петербург [St. Petersburg]	5 383 890	Умеренно-континентальный / умеренно-морской [Temperate continental / mod- erately marine]	5,8	-5,5	18,8
Краснодар [Krasnodar]	918 145	Умеренно-континентальный / субтропический [Temperate continental / subtropical]	12,1	0,6	24,1
Салехард [Salekhard]	50 064	Умеренно-континентальный / субарктический [Temperate continental/ subarctic]	-5,7	-23,2	14,8

\* – по данным Федеральной службы государственной статистики на 1 января 2019 г.

[\*according to the Federal service on state statistics on 1st of January 2019];

\*\* – по данным Справочно-информационного портала «Погода и климат» <http://www.pogodaiklimat.ru/>

[\*\*according to the Information portal "Weather and climate"]

– приглашение добровольцев из интернет-сообществ жильцов зданий, относящихся к одному из требуемых типов;

– привлечение организованных групп населения – сотрудников научных и образовательных учреждений;

– использование личных контактов сотрудников ИПЭ УрО РАН.

Для распространения информации об исследовании и привлечения добровольцев среди жителей Челябинска, Санкт-Петербурга и Краснодара была создана специальная группа в социальной сети ВКонтакте и интернет-сайт.

В Челябинске из числа представителей организованных групп к участию в исследовании привлекались сотрудники ФГБУН УНПЦРМ ФМБА России, учителя школ и школьники; в Санкт-Петербурге – сотрудники ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, в Краснодаре – сотрудники ФГБНУ ВНИИБЗР и Кубанского государственного университета. В среднем две трети сформированных выборок составляли добровольцы, одну треть – сотрудники различных учреждений. В Салехарде в исследовании принимали участие только сотрудники ГКУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики».

В г. Екатеринбурге подвыборки были сформированы по результатам исследований, выполненных ранее в рамках других научно-исследовательских работ. В настоящее исследование были включены данные об измерениях интегральными трековыми радиометрами радона в много-

квартирных многоэтажных жилых домах, для которых имелась полная информация по объекту. В число участников исследования в г. Екатеринбурге вошли учителя школ, сотрудники Министерства общественной безопасности Свердловской области и добровольцы, набранные по личным контактам сотрудников ИПЭ УрО РАН.

Группы исследования формировались с некоторым запасом по числу участников с тем, чтобы получить необходимое число измерений с учетом возможных потерь радиометров радона, а также утраты контакта с участниками.

На этапе формирования выборок класс энергоэффективности оценивался экспертно с учетом года постройки, данных о характеристиках жилого фонда и баз данных ЖКХ, размещенных в сети Интернет, а также визуального анализа с использованием функций панорамных видов улиц городов в картографических приложениях Google, Яндекс, 2ГИС и др.

В каждой подвыборке проводились измерения с целью установить параметры распределения ОА радона – среднее арифметическое, среднее геометрическое и параметр, характеризующий рассеяние. В каждом городе экспонирование радиометров радона проводились одновременно в обеих подвыборках.

#### Метод измерения

Измерения ОА радона выполнялись с использованием интегрирующих радиометров радона типа RSKS на ос-

нове твердотельных трековых детекторов CR-39 фирмы Radosys (Венгрия). В каждой квартире устанавливали два радиометра радона, при наличии возможности – по одному в разных жилых комнатах. Радиометры радона экспонировались в атмосфере помещений в среднем 3 месяца. Лабораторная обработка и подсчет треков проводились в ИПЭ УрО РАН.

Участники обследования самостоятельно заполняли регистрационную карточку жилища. С учетом задач исследования, помимо обычных для радонового обследования характеристик (год постройки, материал стен и перекрытий, этажность и др.), регистрировались данные о типе вентиляции, частоте проветривания, типе окон.

Для метрологического обеспечения надежности проводимых измерений было проведено экспонирование радиометров радона в атмосфере с контролируемой величиной ОА. В качестве источников радона использовались источники NIST (Национальный институт стандартов и технологий США) с известной скоростью эманации и активностью радия-226. Экспонирование проводилось в камере известного объема. Величина ОА радона контролировалась с помощью радон-монитора AlphaGuard RQ2000 Pro. Проведенные калибровочные измерения использованы для уточнения коэффициента чувствительности радиометров радона.

### Результаты и обсуждение

Всего для экспонирования в жилищах участникам исследования было передано 553 комплекта радиометров радона. В анализ включены результаты измерений в 498 квартирах. Часть выданных комплектов радиометров не были возвращены участниками по разным причинам, кроме того, по инициативе граждан часть радиометров была экспонирована в домах коттеджного типа, офисах и других помещениях, не рассматривавшихся в настоящем исследовании. Средняя температура за период экспонирования радиометров радона составила:

Екатеринбург	– 4,7 °С,
Краснодар	5,0 °С
Салехард	– 11,0 °С,
Санкт-Петербург	5,6 °С,
Челябинск	8,8 °С.

По результатам анализа регистрационных карт и дополнительной информации об обследованных зданиях весь жилой фонд был поделен на следующие основные категории:

1. Кирпичные здания от двух до пяти этажей. Дома данного типа возводились преимущественно в 1930–1960-е гг. Основной строительный материал – кирпич; перекрытия – железобетонные или деревянные. Внешние стены частично или полностью оштукатурены. Система вентиляции естественная. Вентилирование помещений производится под действием гравитационного и ветрового напора, обустроены вытяжные каналы вентиляции на кухне и в санузле. Лестничные пролеты обустроены единой системой от входа в подъезд до последнего этажа. В данную группу включены кирпичные «хрущевки», которые вместе с аналогичными панельными пятиэтажками составляли основной тип зданий периода массового жилищного строительства в 1950–1960-е гг.

2. Панельные пятиэтажные здания, «хрущевки». Дома данного типа возводились в 1950–1970-е гг. Внешние

стены, внутренние перегородки и перекрытия представляют собой сборные железобетонные панели. Система вентиляции естественная, обустроены вытяжные каналы вентиляции на кухне и в санузле. Лестничные пролеты обустроены единой системой от входа в подъезд до последнего этажа.

3. Панельные здания этажностью 7–12 этажей. Проекты домов данного типа использовались при массовой застройке микрорайонов в 1970–1980-е гг. Внешние стены, внутренние перегородки и перекрытия представляют собой сборные железобетонные панели. Лестничная клетка представляет собой единый объем по всей высоте здания. Кроме того, в подъезде размещена шахта лифта, часто есть мусоропровод. Вентиляция – приточная, вытяжная или приточно-вытяжная. Вентиляция помещений производится под действием гравитационного и ветрового напора.

4. Кирпичные дома этажностью более пяти этажей. Возведены в основном в 1970–1980-е гг. Межэтажные перекрытия – железобетонные. Лестничная клетка также формирует единый объем по всей высоте здания с примыкающей шахтой лифта, есть мусоропровод. Внешние стены многих зданий оштукатурены или имеют плиточное покрытие. В зданиях этого типа первые этажи часто отведены под нежилые помещения.

5. Панельные здания, возведенные в период с 1980-х гг. по настоящее время. Этот тип зданий отличается от панельных домов более ранних годов постройки повышенной этажностью (10 этажей и более), а также планировочными решениями. В частности, лестница может быть вынесена за внешнюю оболочку здания, шахта лифта изолирована.

6. Современные многоэтажные энергоэффективные здания. К этому типу отнесены здания более 8 этажей, возведенные в период с 2005 г. по настоящее время с применением энергосберегающих архитектурных решений и строительных технологий. Во всех помещениях здания используются пластиковые стеклопакеты, производится остекление лоджий. Внешняя оболочка здания дополнительно утеплена. Входные группы, лифтовые и переходы на пожарную лестницу оборудованы тамбурами и дверьми с доводчиками.

Помимо перечисленных категорий зданий, в отдельных городах в подвыборки были включены следующие здания: в Санкт-Петербурге – дома дореволюционной постройки, многоэтажные многоквартирные кирпичные; в Салехарде – одно- и двухэтажные деревянные многоквартирные дома, построенные во второй половине XX в. Измерения были проведены в нескольких малоэтажных (пять этажей) многоквартирных современных энергоэффективных зданиях: в Санкт-Петербурге – 8, Екатеринбурге и Краснодаре – по одному.

По результатам измерений для каждого типа зданий рассчитывались такие параметры распределения, как среднее геометрическое и среднее арифметическое, стандартное отклонение логарифма ОА радона, а также 95-я перцентиль (табл. 2).

В настоящем исследовании проведен сравнительный анализ уровней ОА радона в современных многоквартирных многоэтажных зданиях повышенного класса энергоэффективности и типичных зданиях массовой типовой застройки городских кварталов СССР и РФ в XX в. В пяти

Таблица 2

Параметры распределения ОА радона в зданиях различного типа

[Table 2

Parameters of radon concentration distribution for different types of buildings]

Тип зданий [Type of buildings]	N	Среднее арифметическое, Бк/м <sup>3</sup> [Arithmetic mean, Bq/m <sup>3</sup> ]	Среднее геометрическое, Бк/м <sup>3</sup> [Geometric mean, Bq/m <sup>3</sup> ]	Стандартное отклонение логарифма [Logarithmic stan- dard deviation]	95-я перцентиль [95th percentile]
Екатеринбург [Ekaterinburg]					
Кирпичные 2–5 этажные [brick houses 2–5 floors]	11	39	28	0,97	138
Панельные 5-этажные [panel buildings 5 floors]	15	36	29	0,63	82
Панельные 7-12 этажные 1970–1990-х гг. [panel buildings 7–12 floors 1970–1990]	13	25	21	0,59	55
Кирпичные > 5 этажей 1970–1980-х гг. [brick houses >5 floors 1970–1980-s]	12	28	26	0,41	52
Панельные с 1990-х гг. по настоящее время [panel buildings 1990– present time]	16	34	29	0,60	78
Энергоэффективные >8 этажей [energy efficient buildings > 8 floors]	35	82	66	0,67	199
Челябинск [Chelyabinsk]					
Кирпичные 2–5 этажные [brick houses 2–5 floors]	17	36	32	0,49	70
Панельные 5-этажные [panel buildings 5 floors]	16	27	25	0,38	47
Панельные 7–12-этажные 1970–1990-х гг. [panel buildings 7–12 floors 1970–1990]	17	21	20	0,27	32
Кирпичные > 5 этажей 1970–1980-х гг. [brick houses >5 floors 1970–1980-s]	3	19	19	0,02	19
Панельные с 1990-х гг. по настоящее время [panel buildings 1990– present time]	62	25	23	0,39	45
Энергоэффективные >8 этажей [energy efficient buildings > 8 floors]	14	32	29	0,47	62
Санкт-Петербург [St. Petersburg]					
Дореволюционные [built before 1917]	14	12	10	0,65	30
Кирпичные 2–5 этажные [brick houses 2–5 floors]	14	26	21	0,67	63
Панельные 5-этажные [panel buildings 5 floors]	9	23	21	0,47	45
Панельные 7-12 этажные 1970–1990-х гг. [panel buildings 7–12 floors 1970–1990]	6	18	16	0,43	33
Кирпичные > 5 этажей 1970–1980-х гг. [brick houses >5 floors 1970–1980-s]	16	15	14	0,35	25
Панельные с 1990-х гг. по настоящее время [panel buildings 1990– present time]	23	17	15	0,45	32
Малозэтажные энергоэффективные [low-rise energy efficient buildings]	8	38	37	0,24	55
Энергоэффективные >8 этажей [energy efficient buildings > 8 floors]	62	31	27	0,57	68
Краснодар [Krasnodar]					
Кирпичные 2–5 этажные [brick houses 2–5 floors]	10	42	36	0,53	86
Панельные 5-этажные [panel buildings 5 floors]	10	41	34	0,62	94

Тип зданий [Type of buildings]	N	Среднее арифметическое, Бк/м <sup>3</sup> [Arithmetic mean, Bq/m <sup>3</sup> ]	Среднее геометрическое, Бк/м <sup>3</sup> [Geometric mean, Bq/m <sup>3</sup> ]	Стандартное отклонение логарифма [Logarithmic standard deviation]	95-я процентиль [95th percentile]
Панельные 7–12-этажные 1970–1990-х гг. [panel buildings 7–12 floors 1970–1990]	7	21	20	0,36	36
Кирпичные > 5 этажей 1970–1980-х гг. [brick houses >5 floors 1970–1980-s]	6	19	18	0,34	32
Панельные с 1990-х гг. по настоящее время [panel buildings 1990– present time]	24	20	18	0,45	38
Энергоэффективные >8 этажей [energy efficient buildings > 8 floors]	36	28	27	0,29	43
Салехард [Salekhard]					
Многоквартирные деревянные [multi-family wooden]	7	29	28	0,29	46
Энергоэффективные >8 этажей [energy efficient buildings > 8 floors]	13	54	49	0,41	96
По пяти городам [in five cities]					
Кирпичные 2–5 этажей [brick houses 2–5 floors]	52	35	28	0,70	90
Панельные 5-этажные [panel buildings 5 floors]	50	32	27	0,56	67
Панельные 7–12-этажные 1970–1990-х гг. [panel buildings 7–12 floors 1970–1990]	43	22	20	0,43	40
Кирпичные > 5-этажные 1970–1980-х гг. [brick houses >5 floors 1970–1980-s]	37	20	18	0,44	38
Панельные с 1990-х гг. по настоящее время [panel buildings 1990– present time]	125	24	21	0,49	47
Энергоэффективные >8 этажей [energy efficient buildings > 8 floors]	147	43	33	0,66	98

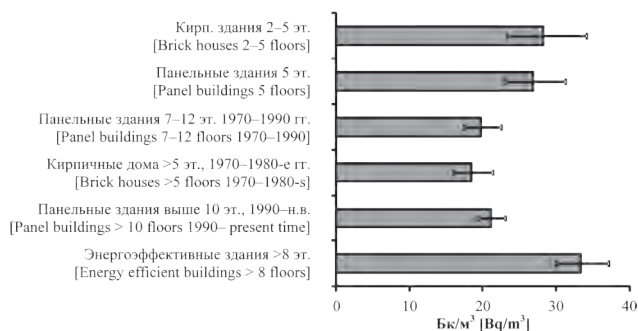
русских городах создавались выборки квартир в зданиях различного типа. Во всех зданиях по единой методике проводилось радоновое обследование. Измерения ОА радона выполнены с использованием радиометров радона RSKS, которые продемонстрировали высокую степень однородности результатов, прошли калибровку, как на предприятии-изготовителе, так и в рамках внутреннего лабораторного контроля. В каждом городе радиометры экспонировались одновременно во всех типах зданий. Температура атмосферного воздуха в период экспонирования примерно соответствовала среднегодовой, поэтому измеренные значения рассматривались в качестве среднегодовых.

По результатам проведенного анализа наименьший средний уровень ОА радона наблюдается в панельных и кирпичных домах этажностью выше пяти этажей, возведенных по типовым проектам 1970–1990-х гг. В этих типах зданий средняя арифметическая ОА радона составила 21 Бк/м<sup>3</sup>. Относительно более высокие уровни ОА радона зарегистрированы в малоэтажных (2–5 этажей) зданиях типовой застройки 1930–1960-х гг.; средняя арифметическая ОА радона составила 35 Бк/м<sup>3</sup>. Средние уровни ОА радона в этих типах зданий различаются по городам России незначительно. Среди всех обследованных типов зданий наибольшая средняя арифметическая ОА радона

наблюдается в современных энергоэффективных зданиях (43 Бк/м<sup>3</sup>). Уровень ОА радона в этом типе зданий выше, чем в многоэтажных панельных и кирпичных домах во всех городах (рис. 1).

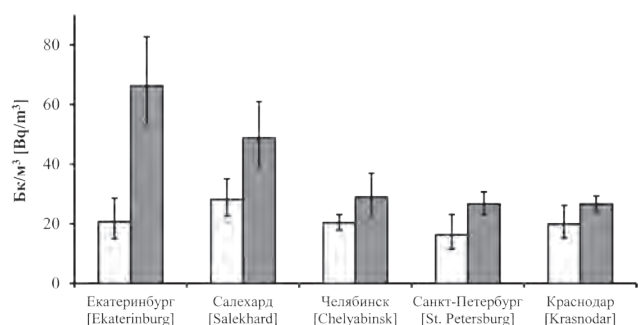
Таким образом, подтверждается предположение о том, что в России в современных многоэтажных энергоэффективных домах ОА радона в среднем выше, чем в типовых жилых зданиях советского периода. В наибольшей степени это различие проявляется при сравнении новых домов повышенного класса энергоэффективности и панельных зданий 7–12 этажей класса энергоэффективности не выше «С» (рис. 2).

Рост энергоэффективности в домах после 2000 г. постройки обусловлен использованием непрерывной изолирующей оболочки здания из высокоэффективных теплоизоляционных материалов, отсутствием мостиков холода, герметичностью, а также большой площадью остекления лоджий, отсутствием балконов. Как показал анализ архитектурных и строительных характеристик обследованной выборки энергоэффективных зданий, эти дома характеризуются меньшим отношением жилой площади к общей площади помещений здания. При этом места общественного пользования (лифтовые, общедомовые площадки, колясочные и пр.) и офисные помещения в новых домах, как правило, отличает низкий



**Рис. 1.** Среднее геометрическое ОА радона в отдельных типах зданий (с 95% доверительным интервалом)

**[Fig. 1.** Geometric mean of radon concentration in certain types of buildings (with 95% confidence interval)]



**Рис. 2.** Сравнение средних геометрических ОА радона в панельных зданиях 7–12 этажей 1970–1990-х гг. постройки (в Салехарде – многоквартирные деревянные дома) – столбик белого цвета и многоэтажных энергоэффективных зданиях – столбик серого цвета

**[Fig. 2.** Comparison of the geometric means of radon concentrations in panel buildings 7–12 floors 1970–1990 (in Salekhard – multi-family wooden buildings) – white column, and multi-storey energy-efficient buildings – gray column]

воздухообмен помещений, в особенности в холодный период года. Такие меры позволяют значительно снизить затраты на подогрев поступающего воздуха. С другой стороны, снижение воздухопроницаемости существенно уменьшает вклад свежего воздуха в общий воздухообмен жилых помещений, что приводит к повышенному накоплению радона. Как показали предыдущие исследования в г. Екатеринбурге, в отдельных квартирах может наблюдаться превышение норматива по среднегодовой ЭРОА радона [8].

Наблюдаются определенные различия среднего уровня ОА радона в энергоэффективных зданиях в различных городах. Максимальное среднее арифметическое значение ОА радона в таком типе зданий выявлено в Екатеринбурге (82 Бк/м³), минимальное – в Краснодаре (28 Бк/м³). Различия могут быть связаны как с климатическими факторами, так и с различной удельной активностью радия-226 в строительных материалах. В городе Екатеринбурге измерения проводились в основном в более холодный период времени, в течение которого воздухообмен, организованный жильцами, как правило, ниже. Важным фактором является естественная радиоактивность строительных материалов, которые служат основным источником радона в помещениях многоэтажных зда-

ний, особенно на верхних этажах. Ранее в г. Екатеринбурге в отдельных квартирах проводились измерения удельной активности радия-226 в строительных материалах, и было показано относительно высокое значение этой величины (до 90 Бк/кг). Моделирование показало, что при такой удельной активности и низкой кратности воздухообмена ОА радона в помещении может достигать нескольких сотен Бк/м³ и превышать норматив [14].

Относительный рост ОА радона в зданиях, относящихся к повышенному классу энергоэффективности, требует внимания с точки зрения обеспечения радиационной безопасности населения. Массовое строительство энергоэффективных зданий, которое сейчас происходит в больших городах Российской Федерации, в перспективе может привести к росту средних и коллективных доз облучения городского населения. Потенциальный рост доз облучения необходимо анализировать с учетом принципа оптимизации. В то же время превышение действующего гигиенического норматива по содержанию радона в воздухе помещений в основном происходит в малоэтажных зданиях на территориях с повышенной радоноопасностью вследствие конвективного переноса радона в системе грунт – здание. Поэтому на радоноопасных территориях увеличение доли многоэтажных домов в жилом фонде потенциально будет приводить к положительному эффекту.

### Заключение

Результаты обследования уровней накопления радона в зданиях различного типа в ряде городов России показали следующее:

- в домах повышенного класса энергоэффективности ОА радона в среднем превышает величину, характерную для зданий массовой многоэтажной застройки второй половины XX века;
- повышенная энергоэффективность является фактором, снижающим радоновую безопасность здания;
- в современных многоэтажных зданиях энергоэффективность не предопределяет превышение радиационно-гигиенического норматива по среднегодовой ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений;
- относительно более высокие уровни ОА радона в энергоэффективных зданиях могут быть связаны с повышенной удельной активностью радия-226 в строительных материалах или режимом содержания помещения с недостаточной средней кратностью воздухообмена;
- изменение ситуации облучения населения радоном с учетом внедрения технологий строительства энергоэффективных зданий требует анализа с применением принципов обоснования и оптимизации.

*Авторы выражают благодарность жителям городов Екатеринбурга, Краснодара, Санкт-Петербурга, Салехарда и Челябинска за активное участие в исследовании.*

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-19-00191).*

### Литература

1. Кононенко Д.В. Анализ распределений значений объемной активности радона в воздухе по-

- мещений в субъектах Российской Федерации // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 1. С. 85-103. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-1-85-103
2. Ярмошенко И.В., Малиновский Г.П., Васильев А.В., Жуковский М.В. Восстановление формы и параметров распределения объемной активности радона в жилищах России на основе данных 4-ДОЗ // АНРИ. 2015. №3(82). С. 41-46.
  3. Lubin J.H., Boice J.D., Edling C. et al. Radon and lung cancer risk: A joint analysis of 11 underground miner studies. Bethesda, MD: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, National Institutes of Health, 1994. (NIH Publication no. 94-3644).
  4. Darby S., Hill D., Auvinen A., Barros-Dios J.M. et al. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies // Br. Med. J. 2005. Vol. 330(7485). P. 223-227. <https://doi.org/10.1136/bmj.38308.477650.63>
  5. Malinovsky G., Yarmoshenko I., Vasilyev A. Meta-analysis of case-control studies on the relationship between lung cancer and indoor radon exposure // Radiat. Environ. Biophys. 2019. Vol. 58, N 1. P. 39-47. <https://doi.org/10.1007/s00411-018-0770-5>
  6. Малиновский Г.П., Ярмошенко И.В., Жуковский М.В. Радон, курение и вирус папилломы человека как факторы риска рака легкого в эпидемиологическом исследовании экологического типа // Радиационная гигиена. 2017. Т. 10, № 2. С. 106-114. <https://doi.org/10.21514/1998-426x-2017-10-2-106-114>
  7. GBD 2017 Risk Factor Collaborators. Global, regional, and national comparative risk assessment of 84 behavioural, environmental and occupational, and metabolic risks or clusters of risks for 195 countries and territories, 1990-2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017 // Lancet. 2018. Vol. 392. 1923-94. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)32225-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)32225-6)
  8. 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. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-4-56-65>
  9. Vasilyev A.V., Yarmoshenko I.V., Zhukovsky M.V. Low air exchange rate causes high indoor radon concentration in energy-efficient buildings // Radiat. Prot. Dosimetry. 2015. Vol. 164, N 4. P. 601-605. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncv319>
  10. Yarmoshenko I.V., Vasilyev A.V., Onishchenko A.D. et al. Indoor radon problem in energy efficient multi-storey buildings // Radiat. Prot. Dosimetry. 2014. Vol. 160, N 1-3. P. 53-6. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncu110>. Epub 2014 Apr 9.
  11. Крисюк Э.М., Маренный А.М., Павлов И.В. и др. Методические вопросы организации и проведения радиационного контроля зданий и сооружений // АНРИ. 1996/97. №3. С. 31-36.
  12. Крисюк Э.М. Новая стратегия обеспечения радиационной безопасности населения // АНРИ. 1998. № 1(12). С. 4-11.
  13. National and Regional Surveys of Radon Concentration in Dwellings: Review of Methodology and Measurement Techniques (IAEA/AQ/33). IAEA: Vienna, 2013.
  14. Zhukovsky M.V., Vasilyev A.V. Mechanisms and sources of radon entry in buildings constructed with modern technologies // Radiat. Prot. Dosimetry. 2014. Vol. 160, N 1-3. P. 48-52, <https://doi.org/10.1093/rpd/ncu111>

Поступила: 27.03.2020 г.

**Ярмошенко Илья Владимирович** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, заместитель директора Института промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

**Онищенко Александра Дмитриевна** – кандидат биологических наук, научный сотрудник Института промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

**Малиновский Георгий Петрович** – кандидат биологических наук, научный сотрудник Института промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук. **Адрес для переписки:** 620990, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, д. 20; E-mail: georgy@ecko.uran.ru

**Васильев Алексей Владимирович** – кандидат технических наук, заведующий радиационной лабораторией Института промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

**Назаров Евгений Игоревич** – младший научный сотрудник Института промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

**Жуковский Михаил Владимирович** – доктор технических наук, профессор, директор, главный научный сотрудник Института промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

**Для цитирования:** Ярмошенко И.В., Онищенко А.Д., Малиновский Г.П., Васильев А.В., Назаров Е.И., Жуковский М.В. Проблема облучения радоном в зданиях повышенного класса энергоэффективности // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 2. С. 47-56. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-2-47-56



## Comparative analysis of radon concentrations in buildings of different energy efficiency classes on example of five Russian cities

Ilya V. Yarmoshenko, Aleksandra D. Onishchenko, Georgy P. Malinovsky, Aleksey V. Vasilyev, Evgeniy I. Nazarov, Mikhail V. Zhukovsky

Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

*A comparative analysis of the radon concentrations in modern multi-storey residential buildings of high energy efficiency class and buildings typical for urban areas of the twentieth century was carried out. The study was conducted in Russian cities located in various climatic zones – Ekaterinburg, Krasnodar, St. Petersburg, Salekhard, Chelyabinsk. The radon concentration in samples of buildings was measured using integrated radon radiometers based on nuclear track detectors according to a single method. The surveyed sample included 498 apartments in multi-apartment buildings. Among all the examined building types, the highest average radon concentration is observed in modern energy-efficient houses – 43 Bq/m<sup>3</sup>. In other types of buildings, the following average radon concentrations were obtained: brick 2–5 floors – 35 Bq/m<sup>3</sup>; panel 5 floors – 32 Bq/m<sup>3</sup>; panel 7–12 floors 1970–1990 years of construction – 22 Bq/m<sup>3</sup>; brick > 5 floors 1970–1980 years of construction – 20 Bq/m<sup>3</sup>; panel, built since 1990 – 24 Bq/m<sup>3</sup>. The results of the study confirm the assumption that radon concentration in modern multi-storey energy-efficient houses is on average higher than in typical residential buildings of the Soviet period. The increased accumulation of radon in energy-efficient buildings is associated with a decrease in the building envelope permeability and the contribution of fresh air to the general air exchange. Despite the fact that there were no cases of exceeding hygienic standards for the indoor radon concentration in the framework of this study, the higher radon concentration in buildings of increased energy efficiency requires attention from the point of view of implementing the principle of optimization of radiation protection. In the future, extensive construction of energy-efficient buildings may increase the average and collective doses to the urban population in the Russian Federation.*

**Key words:** radon, survey, radiological protection, building construction, energy efficiency.

### References

1. Kononenko DV. Analysis of distributions of indoor radon concentrations in the regions of the Russian Federation. *Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(1): 85–103. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-1-85-103>
2. Yarmoshenko I, Malinovsky G, Vasilyev A, Zhukovsky M. Reconstruction of indoor radon distribution pattern and its parameters in Russia using data of 4-DOZ reports. *ANRI*. 2015;3(82): 41–46. (In Russian)
3. Lubin JH, Boice JD, Edling C, et al. Radon and lung cancer risk: A joint analysis of 11 underground miner studies. Bethesda, MD: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, National Institutes of Health, 1994. (NIH Publication no. 94-3644).
4. Darby S, Hill D, Auvinen A, Barros-Dios JM, et al. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *Br. Med. J.* 2005;330(7485): 223227. <https://doi.org/10.1136/bmj.38308.477650.63>
5. Malinovsky G, Yarmoshenko I, Vasilyev A. Meta-analysis of casecontrol studies on the relationship between lung cancer and indoor radon exposure. *Radiat. Environ. Biophys.* 2019;58(1): 3947. <https://doi.org/10.1007/s00411-018-0770-5>
6. Malinovsky GP, Yarmoshenko IV, Zhukovsky MV. Radon, smoking and human papilloma virus as risk factors for lung cancer in an environmental epidemiological study. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(2): 106–114. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2017-10-2-106-114>.
7. GBD 2017 Risk Factor Collaborators. Global, regional, and national comparative risk assessment of 84 behavioural, environmental and occupational, and metabolic risks or clusters of risks for 195 countries and territories, 1990–2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017. *Lancet* 2018; 392: 192394. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)32225-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)32225-6)
8. Yarmoshenko IV, Malinovsky GP, Onishchenko AD, Vasilyev AV. Problem of radon exposure in energy-efficient buildings: a review. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(4): 56–65. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-4-56-65>
9. Vasilyev AV, Yarmoshenko IV, Zhukovsky MV. Low air exchange rate causes high indoor radon concentration in energy-efficient buildings. *Radiat. Prot. Dosimetry*. 2015;164(4): 601605. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncv319>
10. Yarmoshenko IV, Vasilyev AV, Onishchenko AD, Kiselev SM, Zhukovsky MV. Indoor radon problem in energy efficient multi-storey buildings. *Radiat. Prot. Dosimetry*. 2014;160(1-3): 53–6. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncu110>. Epub 2014 Apr 9.
11. Krisyuk EM, Marenny AM, Pavlov IV, Stamat IP, Terentiev MV. Methodological issues of the organization and conducting of radiation monitoring of buildings and structures. *ANRI*. 1996/97;3: 31–36. (In Russian)
12. Krisyuk EM. A new strategy for ensuring radiation safety of the population. *ANRI*. 1998;1: 4–11. (In Russian)

**Georgy P. Malinovsky**

Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

**Address for correspondence:** Sofia Kovalevskaya str., 20, Ekaterinburg, 620990, Russia; E-mail: georgy@ecko.uran.ru

13. National and Regional Surveys of Radon Concentration in Dwellings: Review of Methodology and Measurement Techniques (IAEA/AQ/33). IAEA: Vienna, 2013.
14. Zhukovsky MV, Vasilyev AV. Mechanisms and sources of radon entry in buildings constructed with modern technologies.

*Radiat. Prot. Dosimetry.* 2014;160(1-3): 4852. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncu111>

Received: March 27, 2020

**Ilya V. Yarmoshenko** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Deputy Director, Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

**Aleksandra D. Onishchenko** – Candidate of Biological Sciences, Researcher, Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia.

**For correspondence: Georgy P. Malinovsky** – Candidate of Biological Sciences, Researcher, Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Sofia Kovalevskaya str., 20, Ekaterinburg, 620990, Russia; E-mail: georgy@ecko.uran.ru)

**Aleksey V. Vasilyev** – Candidate of Technical Sciences, Head of the Radiation Laboratory, Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

**Evgeniy I. Nazarov** – Junior Researcher, Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

**Mikhail V. Zhukovsky** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Director, Head Researcher, Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

**For citation: Yarmoshenko I.V., Onishchenko A.D., Malinovsky G.P., Nazarov E.I., Vasilyev A.V., Zhukovsky M.V. Comparative analysis of radon concentrations in buildings of different energy efficiency classes on example of five Russian cities. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene.* 2020. Vol. 13, No. 2. pp. 47-56. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-2-47-56**