

Проблема облучения радоном в зданиях повышенного класса энергоэффективности

И.В. Ярмошенко, Г.П. Малиновский, А.Д. Онищенко, А.В. Васильев

Институт промышленной экологии Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия

В настоящей статье представлен обзор международной научно-технической литературы по проблеме накопления радона в новых энергоэффективных зданиях и в домах, реконструированных с учетом требований энергосбережения. Энергоэффективность является важным условием перехода к экологически устойчивому развитию. Значительным потенциалом энергосбережения обладает жилищно-коммунальное хозяйство. В России строительство зданий наивысших классов энергоэффективности происходит ускоренными темпами и достигло в 2017 г. 75% от общего числа сданных в эксплуатацию многоквартирных домов. Внедрение современных технологий, снижающих теплотери, сопровождается снижением кратности воздухообмена, что приводит к ухудшению качества воздуха помещений, в частности – к накоплению радона. В международной литературе приводятся примеры роста объемной активности радона в несколько раз после реконструкции здания, средняя объемная активность радона в модернизированных зданиях повышалась на 22–120%. В новых домах, построенных с соблюдением требований к энергосбережению, также может происходить значительное увеличение объемной активности радона по сравнению с домами низкого класса энергоэффективности. В отдельных помещениях, в том числе в России, обнаружено превышение санитарно-гигиенических нормативов. Облучение радоном жильцов энергоэффективных зданий в значительной степени определяется режимом содержания помещения. На основе данных обзора можно предполагать, что в условиях интенсивного строительства энергоэффективных зданий в России средний уровень облучения населения радоном может повыситься.

Ключевые слова: радон, энергоэффективность, вентиляция, микроклимат помещения.

Введение

Начиная с 1980–1990-х гг., в России и других странах мира энергосбережение и повышение энергетической эффективности рассматриваются в качестве важных условий, обеспечивающих устойчивое развитие общества. Глобальная необходимость снижения потребления энергии в экономике и других сферах человеческой деятельности обусловлена целым рядом причин. Человечество ускоренными темпами расходует запасы невозобновляемых энергоресурсов. Несмотря на то, что к настоящему времени израсходовано не более 40% имевшихся на Земле запасов углеводородов, разведанных месторождений угля хватит немногим более чем на 100 лет, нефти и газа – на 50 лет. Сжигание углеводородов на электростанциях является источником поступления в атмосферу большого количества поллютантов, в том числе большей части диоксида серы, оксидов азота, мышьяка и ртути антропогенного происхождения. Использование ископаемого топлива приводит к повышению содержания парниковых газов в атмосфере. Так, с начала XX в. концентрация CO₂ выросла с менее чем 300 до 400 ppm и при сохранении текущих темпов роста к 2050 г. превысит величину 450 ppm. Повышающаяся стоимость энергоресурс-

сов ложится тяжелым бременем на экономику, снижает темпы экономического роста, особенно в развивающихся странах. По данным исследований структуры расходов домохозяйств, оплата отопления составляет значительную часть трат наименее обеспеченных семей, снижая расходы на образование, медицинское обслуживание и другие социально важные нужды.

На строительство и эксплуатацию зданий в развитых странах расходуется около половины всей энергии. В общей структуре энергопотребления значительную долю занимает жилищно-коммунальное хозяйство – в развитых странах до 40%. По оценкам экспертов Правительства РФ, эта сфера экономики страны обладает наибольшим потенциалом энергосбережения [1]. Снижение энергопотребления и повышение энергоэффективности зданий является одной из задач стратегии энергетической эффективности Российской Федерации [2]. Основные потери в типовом многоэтажном жилом здании приходятся на горячее водоснабжение (47%) и на нагрев infiltrирующегося воздуха (31%). Теплотери через ограждающие конструкции (стены, окна, крышу и пр.) составляют около 22%.

Увеличение доли многоквартирных зданий наивысших классов энергоэффективности происходит в России ускоренными темпами. Так, в 2017 г. из пример-

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

но 9000 введенных в эксплуатацию многоквартирных домов более 75% были отнесены к классам В, А, А+, А++ [2]. В значительном числе существующих зданий выполнена реконструкция с повышением класса энергоэффективности с применением соответствующих технологий, например замены окон.

Разработанные к настоящему времени меры по энергосбережению и снижению затрат на отопление зданий в значительной мере базируются на снижении потерь тепла через наружные ограждающие конструкции за счет теплопроводности и конвекции. Одним из основных методов ограничения теплопотребления является существенное снижение неконтролируемого воздухообмена с наружной атмосферой в пассивном режиме эксплуатации. Внедрение современных технологий, снижающих теплопотери, сопровождается определенной трансформацией микроклимата помещений. В частности, при снижении кратности воздухообмена (КВО) может происходить ухудшение качества воздуха помещений.

Среди вредных веществ, снижающих качество воздуха, особое место занимает радиоактивный газ радон. Основные закономерности поступления радона в здания подробно изучены [3–6]. Факторы, которые в комплексе обуславливают степень радоноопасности территорий и отдельных зданий, могут быть отнесены к одной из двух больших групп: геогенный радоновый потенциал и антропогенные факторы, включающие конструкцию здания и режим содержания помещений. В среде с низкой проницаемостью перенос радона происходит вследствие диффузии. В газопроницаемой среде необходимо учитывать перенос радона за счет градиента давления. В ситуации преимущественно диффузионного механизма поступления объемная активность (ОА) радона обратно пропорциональна КВО (рис. 1а). При конвективном поступлении соотношение свежего воздуха и воздуха, обогащенного радоном, в общем воздухообмене может нелинейно зависеть от КВО (рис. 1б). В общем случае в зданиях с пониженным воздухообменом ОА возрастает.

В настоящей статье представлен обзор опубликованных в международной научно-технической литературе результатов исследований накопления радона в домах, реконструированных с учетом требований энергосбережения, и в новых энергоэффективных зданиях. Выполнен анализ собранных литературных данных с целью выявить закономерности накопления радона в энергоэффективных зданиях и определить масштаб проблемы облучения населения радоном в условиях дальнейшего внедрения требований и стандартов энергосбережения в строительстве и жилищно-коммунальной сфере.

Изменение ОА радона в результате реконструкции зданий

При ремонте и реконструкции жилых зданий могут применяться следующие технические решения, повышающие энергосбережение с целью снижения затрат на отопление:

- замена окон, например установка пластиковых стеклопакетов;
- установка новых входных групп с плотными автоматически закрывающимися дверями и обустройством дополнительных тамбуров;
- дополнительная термоизоляция оболочки здания и др.

В некоторых странах при реконструкции зданий рекомендуется устанавливать механическую приточную вентиляцию с рекуперацией тепла.

Сравнение результатов измерений ОА радона в конкретных зданиях до и после реконструкции с повышением энергоэффективности проведено в Чехии [7]. С учетом высокого геогенного радонового потенциала большей части территории в этой стране уделяется значительное внимание проблеме защиты населения от радона и проводится большое число измерений. На рисунке 2 показаны примеры отдельных зданий, в которых были проведены повторные измерения с интервалом около 20 лет и выявлено значительное увеличение ОА радона. Во всех

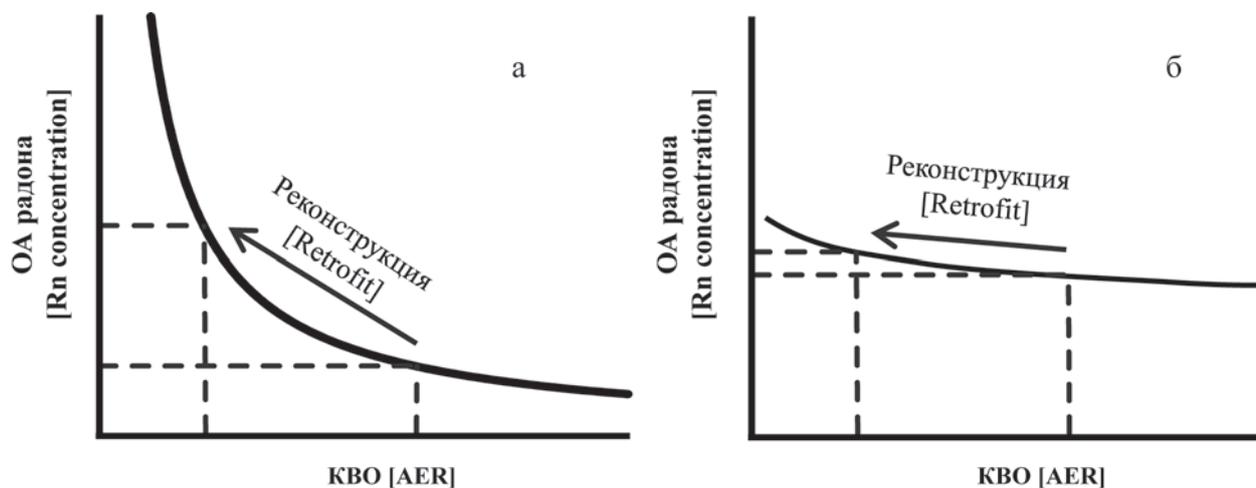


Рис. 1. Зависимость ОА радона от КВО при различных механизмах поступления радона: а – скорость поступления не зависит от КВО (диффузионный механизм), б – скорость поступления зависит от КВО

[Fig. 1. The dependence of radon concentration on the air exchange rate (AER) with different radon entry mechanisms: on the left – radon entry rate doesn't depend on the air exchange rate (diffusion mechanism), on the right – radon entry rate depends on the air exchange rate]

этих зданиях была проведена реконструкция с установкой новых пластиковых окон, а также сменились жильцы.

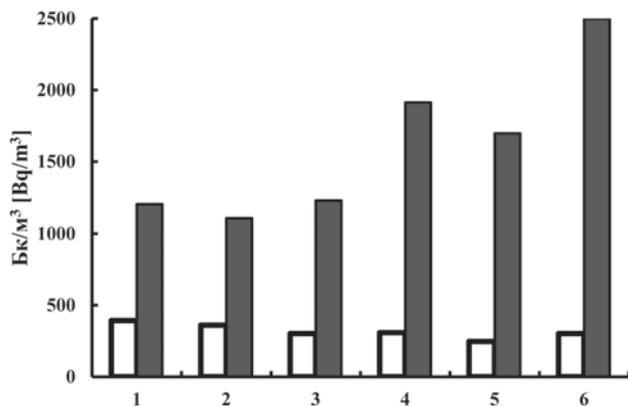


Рис. 2. ОА радона до реконструкции (левые столбцы) и после реконструкции с повышением энергоэффективности (правые столбцы) в некоторых зданиях в Чехии [7]

[Fig. 2. Radon concentration before reconstruction (left columns) and after reconstruction with energy efficiency increase (right columns) in some buildings in the Czech Republic [7]

В литературе представлены результаты сравнения средних значений ОА радона в выборках зданий без изменения класса энергоэффективности после возведения и реконструированных с повышением энергоэффективности (рис. 3). Как видно на рисунке 3, после проведения модернизации происходит увеличение средней ОА радона на 22–120%. Например, в детских дошкольных учреждениях Свердловской области с установленными пластиковыми стеклопакетами ОА радона составляет в среднем 87 Бк/м³, что в 1,6 выше, чем в зданиях с традиционными деревянными рамами [9]. В Чехии, также в детских учреждениях, замена окон и дополнительная теплоизоляция ограждающих конструкций привели к росту средней ОА также примерно в 1,6 раза [15].

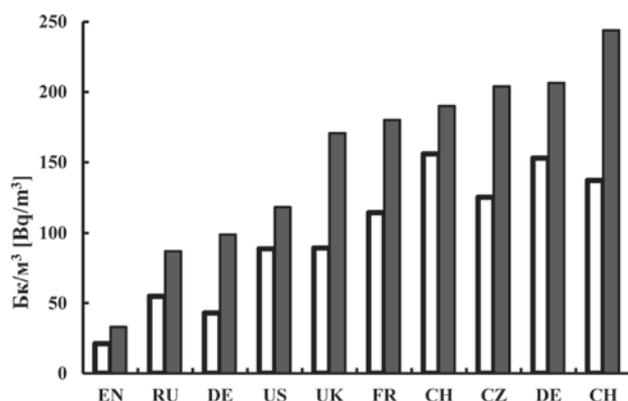


Рис. 3. Средняя ОА радона в выборках модернизированных (правые столбцы) и немодернизированных зданий (левые столбцы) в различных странах [8–17]

[Fig. 3. The average radon concentration in samples of retrofitted buildings (right columns) and non-retrofitted buildings (left columns) in different countries [8–17]

В Англии меры по снижению проницаемости оболочки односемейных домов привели к снижению неконтролируемой вентиляции в среднем примерно в 1,9 раза и увеличению ОА радона в 1,6 раза до 33 Бк/м³ [8], при этом в регионах повышенного радонового потенциала ОА радона в реконструированных зданиях в среднем достигала 170 Бк/м³ [12]. В США рост ОА радона на 33% до 118 Бк/м³ в среднем наблюдался в домах, вошедших в национальную программу энергосбережения, в зоне с повышенным геогенным радоновым потенциалом [11]. В то же время в зоне с наименьшим радоновым потенциалом ОА радона не изменилась (30 Бк/м³) [11]. Во Франции, по данным обследования, те или иные технические меры повышения теплосбережения были предприняты в более чем половине зданий, в том числе в 39% зданий были установлены пластиковые окна, что привело к увеличению ОА радона в среднем в 1,6 раза до 180 Бк/м³ (среднее геометрическое) [13]. Также рост ОА радона наблюдался в реконструированных домах в Швейцарии [14, 17] и Германии [16].

Показательным представляется пример радонового обследования сельских населенных пунктов на реке Теча в Курганской и Челябинской областях, выполненного в 2014–2015 гг. [18]. По результатам обследования 450 жилых домов (одноэтажных, одно- и двухсемейных) было обнаружено, что более чем в половине из них установлены новые пластиковые окна. В модернизированных домах, расположенных в геологической зоне пониженной проницаемости грунта, произошло увеличение ОА радона в среднем на 50% до 135 Бк/м³. При этом в геологической зоне с повышенной проницаемостью ОА радона почти не изменилась. Результаты обследования на реке Теча показывают различия изменения соотношения вкладов почвенного и атмосферного воздуха в общем воздухообмене здания при изменении КВО на различных территориях. Аналогичный результат получен в США при сравнении двух зон радонового потенциала [11].

В Литве и Финляндии было проведено сравнение величин ОА радона в многоквартирных зданиях, подвергшихся реконструкции с увеличением класса энергоэффективности, и нереконструированных зданий [19]. При этом в Финляндии в зданиях устанавливалась также механическая приточная вентиляция с рекуперацией тепла. По результатам проведенного анализа в Литве наблюдалось увеличение ОА радона после повышения энергосбережения в 1,6 раза до 44 Бк/м³. В Финляндии в многоквартирных домах с механической вентиляцией ОА радона не изменилась (74 Бк/м³).

Таким образом, реконструкция зданий с целью снижения затрат на отопление приводит к определенному увеличению ОА радона. В отдельных зданиях наблюдался рост в несколько раз обратно пропорционально изменению КВО. В целом, изменение ОА радона происходило в разной степени в зависимости от условий поступления и соотношения вкладов диффузионного и конвективного механизмов переноса радона. Максимальный рост ОА радона можно ожидать при преимущественно диффузионном характере поступления. В опубликованных исследованиях средняя ОА радона в модернизированных зданиях повышалась не более чем на 80%.

ОА радона в новых зданиях с повышенным классом энергоэффективности

Повышение требований к энергосбережению во вновь возводимых зданиях является одним из основных положений стратегий энергоэффективности в различных странах. В России требования к строительству энергосберегающих зданий были впервые введены в 1996 г. Правила определения класса энергетической эффективности многоквартирных домов, утвержденные Минстроем РФ, установили базовые значения удельного годового расхода энергетических ресурсов в многоквартирных домах и требования по внедрению ключевых энергоэффективных технологий [1]. В Европейском Союзе принята Директива об энергоэффективности зданий (The Energy Performance in Buildings Directive), которая обязывает к 2021 г. перейти к возведению в европейских странах только зданий с нулевым потреблением энергии (near zero energy buildings). Директива определяет такие здания в широком смысле как здания с высокими показателями энергоэффективности. Воздухопроницаемость таких домов должна соответствовать скорости воздухообмена менее $0,6 \text{ ч}^{-1}$ при разности давлений 50 Па, обеспечиваемого контролируемой сбалансированной механической вентиляцией, при необходимости с рекуперацией тепла.

Сокращение энергопотребления в новых зданиях достигается такими архитектурно-строительными решениями, как применение монолитных бетонных и железобетонных конструкций в сочетании с использованием эффективных утеплителей, внешних изоляционных панелей и герметичных стеклопакетов, а также специальных требований к планировке. Кроме того, при проектировании здания может быть запланировано применение высокоэффективных систем отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха и водонагревательных систем.

В международной научно-технической литературе имеется меньшее количество публикаций результатов изучения накопления радона в новых домах, спроектированных и возведенных с учетом требований к энергосбережению, чем в реконструированных зданиях. Основные результаты сравнения ОА радона в выборках новых зданий и ранее возведенных домах представлены на рисунке 4. Как видно на рисунке 4, в приведенных примерах величина средней ОА радона во всех новых энергоэффективных зданиях выше, чем в подобранных авторами группах сравнения.

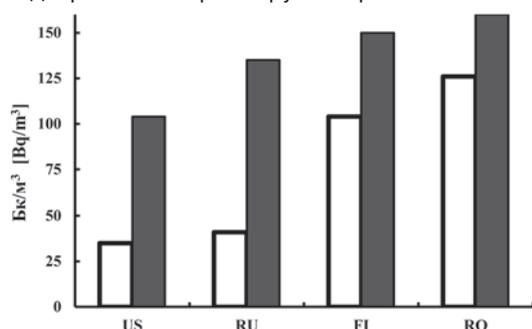


Рис. 4. Средняя ОА радона в выборках новых зданий, не оборудованных механической вентиляцией (правые столбцы), и зданий с пониженным классом энергоэффективности (левые столбцы) в различных странах [20–23]

[Fig. 4. The average radon concentration in samples of new buildings not equipped with mechanical ventilation (right columns) and buildings with low energy efficiency classes (left columns) in different countries [20–23]]

В России исследования проблемы радона в новых энергоэффективных зданиях проведены в г. Екатеринбурге [21, 24]. По результатам измерений в большой выборке, включавшей 65 жилых домов, средняя ОА радона составляет 135 Бк/м^3 в зданиях класса энергоэффективности В, В+, В++ [21]. Для заключения о степени увеличения ОА радона в новых зданиях проведено сравнение с результатами радонового обследования случайной выборки, в которую вошли здания различных типов. В этом обследовании было получено, что средняя ОА радона в пяти- и девятиэтажных панельных зданиях постройки 1960–1980-х гг. прошлого века, формирующих существенную часть жилого фонда г. Екатеринбурга, составляет 35 Бк/м^3 . Таким образом, применение энергоэффективных технологий строительства привело к почти трехкратному увеличению ОА радона в воздухе жилых помещений новых многоэтажных зданий по сравнению с домами подобной конструкции, построенными ранее. В исследованиях в г. Екатеринбурге было показано, что основной причиной роста содержания радона является снижение КВО в неконтролируемом пассивном режиме эксплуатации. При этом диффузионное поступление из материалов строительных конструкций является основным источником поступления радона в современных многоэтажных зданиях. Близкие результаты были получены в США (штат Нью-Йорк) при проведении измерений в односемейных одно-двухэтажных домах в начале 1980-х гг. [20]. В относительно небольшой выборке домов с низкой воздухопроницаемостью ограждающих конструкций ОА радона была выше почти в 3 раза, чем в других домах региона.

В Финляндии меры по системному увеличению энергоэффективности зданий начали применяться с 1980-х гг. В результате этих мер воздухопроницаемость односемейных домов снизилась с 7 ч^{-1} при разности давления 50 Па до 4 ч^{-1} в 2000 г. [22]. В 2003 г. начали вводиться новые строительные правила, повысившие требования к защите от поступления радона. Позже было установлено требование по оборудованию зданий механической приточно-вытяжной вентиляцией. С 2006 г. большинство новых односемейных зданий соответствуют требованиям защиты от радона и оборудованы необходимыми системами вентиляции. Такие подходы к регулированию в строительстве привели к соответствующим изменениям накопления ОА радона в зданиях. Если в домах, построенных в 1955–1964 гг., средняя ОА радона была 104 Бк/м^3 , к концу 1990-х гг. эта величина выросла до 150 Бк/м^3 , а в зданиях, построенных в 2006–2008 гг., средняя ОА радона снизилась до 95 Бк/м^3 [22]. Аналогичная картина наблюдалась в Норвегии [25], Австрии [26] и Швейцарии [27], в которых средняя ОА радона в новых односемейных домах, оборудованных механической приточно-вытяжной вентиляцией, была наименьшей по сравнению с группами зданий, построенных ранее.

В Румынии проведены измерения в одноэтажных домах, возведенных с учетом требований к энергосбережению, начиная с 2000 г., в регионе с высоким геогенным радоновым потенциалом. Было получено, что в новых зданиях ОА радона на 27% выше, чем в традиционных домах [23].

Таким образом, в новых домах, построенных с соблюдением требований к энергосбережению, при отсутствии механической приточно-вытяжной вентиляции происхо-

дит значительное увеличение ОА радона по сравнению с домами низкого класса энергоэффективности и с высокой проницаемостью оболочки здания. В северных регионах, например в Финляндии, где меры энергосбережения в частных домах применялись повсеместно и ранее, ОА радона увеличилась в меньшей степени. Изменение ОА радона в энергоэффективных зданиях также зависит от режима содержания помещений. По-видимому, в Румынии, стране с относительно теплым климатом, дома реже находятся в состоянии неконтролируемой пассивной вентиляции, и КВО в среднем выше, чем в аналогичных зданиях, построенных в северных регионах.

Роль антропогенных факторов в формировании радоновой обстановки в энергоэффективных зданиях

В целом ряде исследований показано, что ключевым фактором, влияющим на радоновую обстановку в зданиях с повышенным классом энергоэффективности, является снижение КВО в пассивном режиме эксплуатации здания, когда перекрыты пути естественного притока свежего воздуха и отключены другие системы вентиляции [3–5, 28]. При ожидаемой пониженной воздухопроницаемости и типичной разности давлений между внутренним объемом помещений и наружной атмосферой, равной 5 Па, воздухообмен в таких зданиях может снижаться ниже величины $0,1 \text{ ч}^{-1}$. По результатам анализа временных серий ОА радона в новых энергоэффективных зданиях в Екатеринбурге было показано, что в пассивном режиме эксплуатации средняя КВО составляет примерно $0,2 \text{ ч}^{-1}$ [29]. При этом в активном режиме при открытых форточках или окнах и периодически открываемых дверях обеспечивается доступ свежего воздуха и устанавливается КВО на комфортном для жителей уровне.

Для анализа влияния режима содержания помещения на ОА радона при различных уровнях неконтролируемого воздухообмена проведено моделирование накопления радона с шагом 1 ч. Пример двух модельных недельных серий ОА радона в зданиях с высоким и низким классом энергоэффективности показан на рисунке 5. Верхняя кривая на этом рисунке относится к энергоэффективному зданию, в котором КВО составляет $0,2$ и $1,0 \text{ ч}^{-1}$ в пассивном и активном режиме эксплуатации соответственно. Нижняя кривая соответствует временной серии ОА радона в здании с втрое большей КВО в пассивном режиме эксплуатации. Моделируется чисто диффузионный режим поступления с одинаковой скоростью в каждом из помещений и одновременной сменой пассивного и активного режимов эксплуатации жилищ. Как видно из представленной модели, только за счет низкого воздухообмена в здании высокого класса энергоэффективности происходит рост ОА радона более чем в 2 раза.

В реальных условиях может наблюдаться более сложный режим содержания жилых помещений. На рисунке 6 представлены трехдневные временные серии ОА радона, полученные с помощью радон-монитора в двух квартирах многоэтажного здания класса энергоэффективности В в г. Екатеринбурге. Видно, что в квартире №1, которой соответствует верхняя кривая, ОА радона в течение трех суток практически не менялась и находилась на относительно высоком уровне (выше 200 Бк/м^3), что свидетельствует об отсутствии активного проветривания. В квартире № 2

проветривание проводилось регулярно, и ОА радона периодически снижалась до уровня ниже 50 Бк/м^3 . Анализ продолжительных временных серий ОА радона показал, что скорость поступления радона в квартирах этого здания одинаковая.

На рисунке 7 показан пример трехдневной вре-

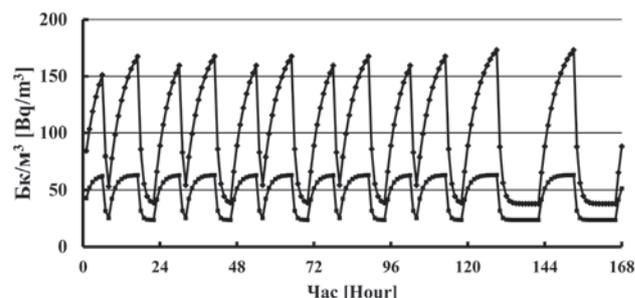


Рис. 5. Моделирование временной серии ОА радона с шагом 1 ч в здании с КВО в пассивном режиме $0,2 \text{ ч}^{-1}$ (верхняя кривая) и $0,6 \text{ ч}^{-1}$ (нижняя кривая)

[Fig. 5. Simulation of radon time series with 1 hour increment in a building with the air exchange rate in passive mode 0.2 h^{-1} (upper curve) and 0.6 h^{-1} (lower curve)]

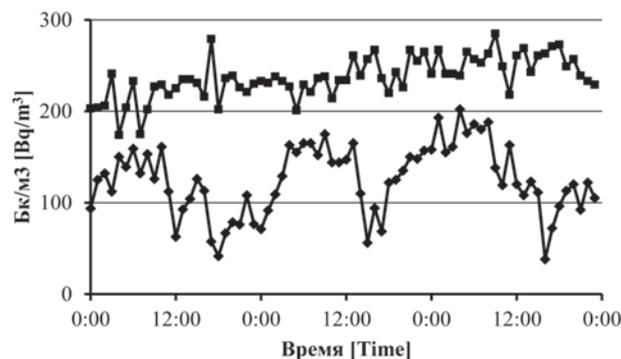


Рис. 6. Временные серии ОА радона, измеренной с помощью радон-монитора с интервалом в 1 ч, в квартире № 1 (верхняя кривая) и квартире № 2 (нижняя кривая)

[Fig. 6. The time series (1 hour increment) of radon concentration values measured with a radon monitor in apartment No. 1 (upper curve) and apartment No. 2 (lower curve)]

менной серии в квартире, в которой была обнаружена максимальная ОА радона для многоквартирных домов г. Екатеринбурга. Многоэтажный монолитный дом относится к классу энергоэффективности В. Среднегодовая ОА радона в квартире составляла 370 Бк/м^3 . Для выяснения причин повышенного накопления радона были проведены измерения с использованием радон-монитора и отобрана проба материалов строительных конструкций. Анализ временной серии показал, что проветривание в помещении проводится регулярно. Минимальная КВО, соответствующая пассивному режиму эксплуатации, составила $0,12 \text{ ч}^{-1}$. Удельная активность радия-226 в образцах бетона межэтажного перекрытия составила 90 Бк/кг . Согласно исследованиям естественной радиоактивности строительных материалов, применяемых в

городе Екатеринбурге, средняя удельная активность радия-226 в монолитном бетоне была 55 Бк/кг [30]. Таким образом, максимально наблюдавшаяся ОА радона в квартире многоквартирного здания была обусловлена сочетанием двух факторов: низкой КВО в пассивном режиме и относительно высокой удельной активностью радия-226 в строительных материалах.

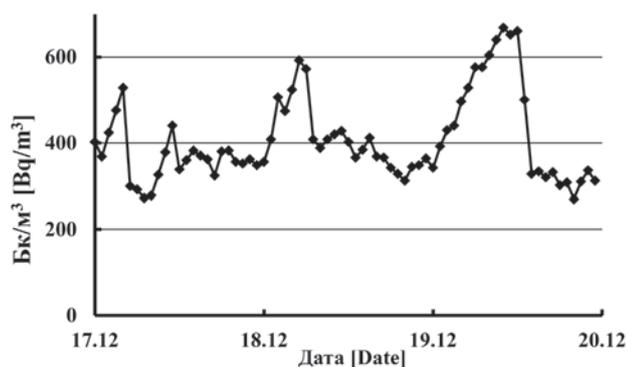


Рис. 7. Временная серия ОА радона, измеренной с помощью радон-монитора с интервалом в 1 ч, в квартире с максимальной измеренной ОА радона

[Fig. 7. The time series (1 hour increment) of radon concentration values measured with a radon monitor in apartment with maximum radon concentration]

Одной из тенденций в современной урбанизированной среде является коттеджное строительство в пригородах крупных городов. Как показывает пример России и других стран, в индивидуальном строительстве предъявляются высокие требования к энергосбережению и организации вентиляции помещений. Правильно спроектированные и устроенные системы приточно-вытяжной вентиляции обеспечивают как энергетическую эффективность дома, так и комфортный микроклимат. В то же время при проектировании, монтаже и эксплуатации вентиляционных систем могут возникать ошибки, неисправности и отказы. Примеры влияния ошибок проектирования и отказов систем вентиляции, созданных по индивидуальным проектам, на накопление радона в современных односемейных домах приведены на рисунке 8. В коттедже № 1 (рис. 8а) при открытой двери в подвальное помещение происходит подсос воздуха, содержащего высокую ОА радона, в жилые помещения. В коттедже № 2 (рис. 8б) происходит периодическое отключение системы вентиляции подвального помещения, и радон также поступает в жилые помещения. В этих случаях в обоих коттеджах происходил резкий рост ОА радона на два порядка величины. Необходимо отметить, что в рассмотренных примерах источником радона является грунт под зданием. Обнаруженные экстремально высокие значения ОА радона, по-видимому, связаны с высоким геогенным радоновым потенциалом территории. Тем не менее, в условиях низкого геогенного потенциала ошибки в проектировании системы вентиляции также могут привести к увеличению поступления радона за счет активации конвективного переноса в системе грунт – здание.

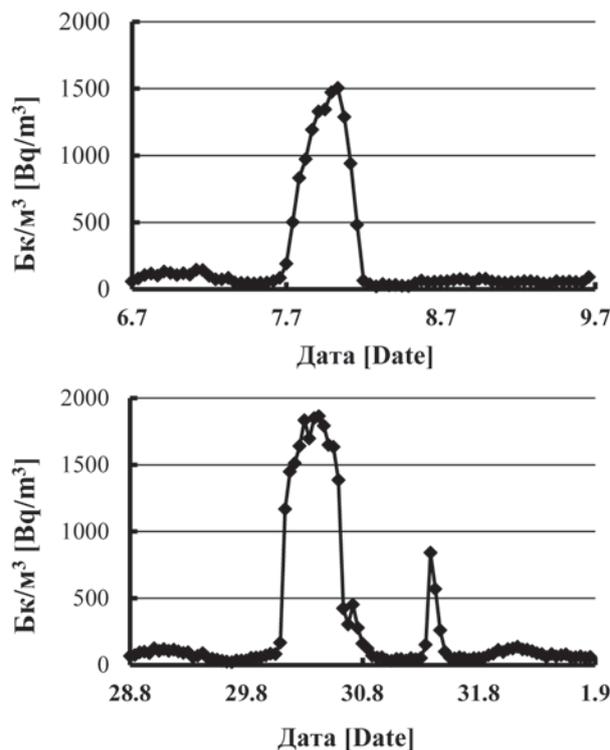


Рис. 8. Временная серия ОА радона, измеренной с помощью радон-монитора с интервалом в 1 ч, в: а) коттедже № 1 и б) коттедже № 2

[Fig. 8. The time series (1 hour increment) of radon concentration values measured with a radon monitor in a) cottage No. 1 and b) cottage No. 2]

В г. Екатеринбурге было проведено исследование накопления радона в многоквартирном доме с наивысшим классом энергоэффективности А [21]. Отопление в доме осуществляется с помощью теплых электрических полов. В доме смонтирована общедомовая система механической вентиляции с рекуперацией тепла и отсутствует центральное паровое отопление. Вентилирование квартир регулируют жильцы. По результатам мониторирующих измерений, среднее значение ОА радона в обследованной квартире составило 130 Бк/м³, что близко среднему значению ОА радона в зданиях классов энергоэффективности В, В+, В++. Обследование этого дома показало, что в условиях относительно холодного климата Среднего Урала применение современных систем вентиляции не дает очевидного преимущества с точки зрения качества микроклимата помещений. Как указано в работе [21], зачастую требуемый воздухообмен не обеспечивается жильцами как по соображениям комфорта (в холодное время года), так и по соображениям экономии электроэнергии (в случае применения приточно-вытяжных систем вентиляции).

Таким образом, уровни облучения радоном жильцов энергоэффективных зданий в значительной степени определяются такими антропогенными факторами, как режим содержания помещения, продолжительность пассивного режима вентиляции, частота проветривания в активном режиме. В зданиях, оборудованных системами приточно-вытяжной вентиляции, могут возникать ситуации с резким ростом поступления радона при некорректной работе или отключении системы.

Заключение

Проанализированные данные научной литературы говорят о том, что проблеме накопления радона в энергоэффективных зданиях в мире уделяется определенное внимание. На большом количестве примеров показано, что как реконструкция существующих зданий с увеличением класса энергоэффективности, так и строительство новых энергосберегающих зданий приводит к относительно увеличению ОА радона в воздухе жилищ. В ряде случаев рост может быть многократным обратно пропорционально снижению КВО. В том числе в отдельных помещениях обнаружено превышение санитарно-гигиенических нормативов.

В ряде развитых стран мира для снижения ОА радона в энергоэффективных зданиях с пониженной проницаемостью ограждающих конструкций успешно используется приточно-вытяжная вентиляция с рекуперацией тепла. В то же время опыт показывает, что решение проблемы облучения радоном в энергоэффективных зданиях на основе применения таких систем вентиляцией является неполным. Подобные сложные технические системы подвержены отказам, и их функционирование зависит от повседневной деятельности человека, нерегулярно и не в равной степени влияющего на воздушно-тепловое состояние помещений в своем жилище.

С учетом того, что повышение энергоэффективности жилищно-коммунального хозяйства является целью стратегии энергоэффективности в РФ, доля зданий с условиями для повышенного накопления радона будет увеличиваться. На основе полученных данных можно говорить о том, что в условиях интенсивного строительства новых энергоэффективных зданий может происходить увеличение среднего уровня облучения радоном населения отдельных регионов России. Такая тенденция будет противоречить принципу оптимизации радиационной безопасности.

Накопленные в мире данные по проблеме облучения населения радоном при внедрении энергосберегающих технологий в строительстве и при эксплуатации зданий имеют ряд ограничений. Большая часть экспериментальных данных относятся к односемейным малоэтажным домам, в которых происходит преимущественно конвективный перенос почвенного воздуха в системе грунт – подвал – жилые помещения. Недостаточное внимание уделяется многоэтажному строительству. В то же время в таком типе зданий в связи с преимущественно диффузионным механизмом поступления радона из строительных конструкций наблюдается наибольший рост ОА радона. В России данная ситуация потенциально затрагивает значительную часть городского населения.

Ограниченность имеющихся данных делает актуальным развитие исследований по разработке основ защиты человека от радона в условиях энергосберегающей урбанизированной среды. Целью таких исследований может быть дальнейшее формирование междисциплинарного научного задела на основе решения следующих задач: 1) обследование представительного числа помещений в зданиях различного класса энергоэффективности в различных климатических зонах; 2) экспериментальное изучение закономерностей поступления и накопления радона в типичных жилищах энергоэффективных зданий;

3) изучение архитектурно-строительных, поведенческих и других факторов, влияющих на формирование радоновой обстановки помещений энергоэффективных зданий; 4) прогнозирование степени актуальности проблемы облучения радоном как фактора радиационного риска для здоровья человека при различных сценариях развития строительного сектора.

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

Литература

1. Государственный доклад о состоянии энергосбережения и повышении энергетической эффективности в Российской Федерации в 2017 году. – М.: Министерство экономического развития Российской Федерации, 2018.
2. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года: утв. распоряжением Правительства РФ от 13 ноября 2009 г. № 1715-р.
3. Крисюк, Э.М. Радиационный фон помещений / Э.М. Крисюк. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 120 с.
4. Nazaroff, W.W. Radon transport from soil to air, Rev. Geophys., 1992, Vol. 30, pp. 137–160.
5. Sherman, M.H. Simplified Modeling for Infiltration and Radon Entry. Lawrence Berkeley National Laboratory, 1998. LBL-31305.
6. Киселев, С.М. Радон: От фундаментальных исследований к практике регулирования / С.М. Киселев, М.В. Жуковский, И.П. Стамат [и др.] – М.: Изд-во «ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России», 2016. – 432 с.
7. Slezakova M., Navratilova Rovenska K., Tomasek L. [et al.] Short- and long-term variability of radon progeny concentration in dwellings in the Czech Republic. Radiat. Prot. Dosimetry, 2013, Vol. 153(3), pp. 334–341.
8. Milner J., Shrubsole C., Das P. [et al.] Home energy efficiency and radon related risk of lung cancer: modelling study. BMJ, 2014, Vol. 348, pp. 1–12.
9. Онищенко, А.Д. Влияние строительных характеристик зданий на накопление радона в детских дошкольных учреждениях Свердловской области / А.Д. Онищенко, А.В. Васильев, Г.П. Малиновский [и др.] // Радиационная гигиена. – 2018. – Т. 11, № 2. – С. 28–36.
10. Meyer, W. Impact of constructional energy saving measures on radon levels indoors. Indoor Air, 2019, Vol. 29, pp. 680–685.
11. 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.
12. Symonds P., Rees D., Daraktchieva Z., McColl N., Bradley J., Hamilton I., Davies M. Home energy efficiency and radon: An observational study. Indoor Air, 2019 (в печати).
13. Collignon B., Ponner E.Le, Mandin C. Relationships between indoor radon concentrations, thermal retrofit and dwelling characteristics. J. Environ. Radioact., 2016, Vol. 165, pp. 124–130.
14. 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.
15. Fojtikova I., Navratilova Rovenska K. Influence of energy-saving measures on the radon concentration in some kindergartens in the Czech Republic. Radiat. Prot. Dosimetry, 2014, Vol. 160, pp. 149–153.
16. Hoffmann, M. [et al.] Radon und Gebäudesanierung. Fachgespräch Radon. BfS (2012).
17. Burkart W., Wemli C., Brunner H.H. Matched pair analysis of the influence of weather-stripping on indoor radon concen-

- tration in Swiss dwellings. *Radiat. Prot. Dosimetry*, 1984, Vol. 7(1-4), pp. 299–302.
18. Yarmoshenko I., Malinovsky G., Vasilyev A. [et al.] Geogenic and anthropogenic impacts on indoor radon in the Techa River region. *Science of the Total Environment*, 2016, Vol. 571, pp. 1298–303.
 19. Du L., Leivo V., Prasauskas T. [et al.] Effects of energy retrofits on Indoor Air Quality in multifamily buildings. *Indoor Air*, 2019, Vol. 29 (4), pp. 686–697.
 20. Fleischer R.L., Mogro-Campero A., Turner L.G. Indoor radon levels in the northeastern U.S.: effects of energy-efficiency in homes. *Health Physics*, 1983, Vol. 45(2), pp. 407–412.
 21. Васильев, А.В. Радоновая безопасность современных многоэтажных зданий различных классов энергетической эффективности / А.В. Васильев, И.В. Ярмошенко, М.В. Жуковский // *Радиационная гигиена*. – 2018. – Т. 11, № 1. – С. 80–84.
 22. Arvela H., Holmgren O., Reisbacka H. Radon prevention in new construction in Finland: a nationwide sample survey in 2009. *Radiat. Prot. Dosimetry*, 2012, Vol. 148, pp. 465–474.
 23. Cucuș (Dinu) A., Dicu T., Cosma C. Indoor radon exposure in energy-efficient houses from Romania. *Rom. Journ. Phys.*, 2015, Vol. 60 (9-10), pp. 1574–1580.
 24. 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(4), pp. 601–605.
 25. Finne I.E., Kolstad T., Larsson M. Significant reduction in indoor radon in newly built houses. *J. Environ. Radioact.*, 2019, Vol. 196, pp. 259–263.
 26. Ringer, W. Monitoring trends in civil engineering and their effect on indoor radon. *Radiat. Prot. Dosimetry*, 2014, Vol. 160(1-3), pp. 38–42.
 27. Goyette Pernot J., Hager-Jörin C., Pampuri L. Indoor radon and air quality investigations in new or renovated energy-efficient Swiss single-family dwellings. *PLEA 2015 – Architecture in revolution September 2015, Bologna, Italy*.
 28. Nero A.V., Boegel M.L., Hollowell C.D., Ingersoll J.G. and Nazaroff W.W. Radon concentrations and infiltration rates measured in conventional and energy-efficient houses. *Health Phys.*, 1983, Vol. 45(2), pp. 401–405.
 29. Yarmoshenko I.V., Vasilyev A.V., Onishchenko A.D., Kiselev S.M., Zhukovsky M.V. Indoor radon problem in energy efficient multi-storey buildings. *Radiat. Prot. Dosimetry*, 2014, Vol. 160(1-3), pp. 53–56.
 30. Васильев, А.В. Строительные материалы как источник радона в зданиях, построенных по современным технологиям / А.В. Васильев, М.В. Жуковский, А.Д. Онищенко, А.А. Вишневский // *Строительные материалы*. – 2013. – № 4. – С. 104–107.

Поступила: 22.05.2019 г.

Ярмошенко Илья Владимирович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, заместитель директора Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института промышленной экологии Уральского отделения Российской Академии наук, Екатеринбург, Россия

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

Онищенко Александра Дмитриевна – кандидат биологических наук, научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института промышленной экологии Уральского отделения Российской Академии наук, Екатеринбург, Россия

Васильев Алексей Владимирович – кандидат технических наук, заведующий радиационной лабораторией Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института промышленной экологии Уральского отделения Российской Академии наук, Екатеринбург, Россия

Для цитирования: 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

Problem of radon exposure in energy-efficient buildings: a review

Ilya V. Yarmoshenko, Georgy P. Malinovsky, Aleksandra D. Onishchenko, Aleksey V. Vasilyev

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

The paper presents an overview of the international scientific and technical publications on a problem of radon accumulation in new energy efficient buildings and in houses reconstructed according to requirements of energy saving. Energy efficiency is an important requirement of the environmentally sustainable development. Housing and communal services have significant potential for energy saving. In Russia, the construction of highest energy efficiency classes buildings occurs at an accelerated rate and reached 75% of all multi-apartment houses built in 2017. The applying of modern technologies that reduce heat loss is accompanied by a decrease in the air exchange rate, which leads to deterioration of indoor air quality, in particular, the accumulation of radon. In the international literature, there are examples of the several times growth of radon concentration after the reconstruction of the building, the average radon concentration in retrofitted buildings increased by 22–120%. In new houses built to meet energy saving requirements, there can also be a significant increase in radon concentration compared to low-energy efficiency classes houses. Excess of sanitary and hygienic norms was found in some countries, including Russia. Radon exposure of dwellers of energy-efficient buildings is largely determined by the living habits. Based on the review data, it can be assumed that the average level of Russian population exposure to radon can increase under conditions of intensive construction of energy-efficient buildings.

Key words: radon, energy efficiency, ventilation, indoor air quality.

References

1. State report on the state of energy conservation and energy efficiency in the Russian Federation in 2017. Moscow: Ministry of Economic Development of the Russian Federation; 2018. (In Russian)
2. Energy strategy of Russia for the period up to 2030 (approved by decree of the Government of the Russian Federation dated November 13, 2009 N 1715-p) (In Russian)
3. Krisyuk E.M. Radiation background of premises. Moscow, Energoatomizdat, 1989, 120 p. (In Russian)
4. Nazaroff, W.W. Radon transport from soil to air, Rev. Geophys., 1992, Vol. 30, pp. 137–160.
5. Sherman M.H. Simplified Modeling for Infiltration and Radon Entry. Lawrence Berkeley National Laboratory, 1998. LBL-31305.
6. Kiselev S.M., Zhukovsky M.V., Stamat I.P., Yarmoshenko I.V. Radon: From fundamental research to regulation practice. Moscow, Publishing house «FGBU SRC Burnasyan FMBC, FMBA of Russia», 2016, 432 p. (in Russian)
7. Slezakova M., Navratilova Rovenska K., Tomasek L. [et al.] Short- and long-term variability of radon progeny concentration in dwellings in the Czech Republic. Radiat. Prot. Dosimetry, 2013, Vol. 153(3), pp. 334–341.
8. Milner J., Shrubsole C., Das P. [et al.] Home energy efficiency and radon related risk of lung cancer: modelling study. BMJ, 2014, Vol. 348, pp. 1–12.
9. Onishchenko A.D., Vasilyev A.V., Malinovsky G.P., Zhukovsky M.V. Influence of building features on radon accumulation in kindergartens of the Sverdlovsk region. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene. 2018; 11(2):28–36. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2018-11-2-28-36>
10. Meyer, W. Impact of constructional energy saving measures on radon levels indoors. Indoor Air, 2019, Vol. 29, pp. 680–685.
11. 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.
12. Symonds P., Rees D., Daraktchieva Z., McColl N., Bradley J., Hamilton I., Davies M. Home energy efficiency and radon: An observational study. Indoor Air, 2019 (в печати).
13. Collignon B., Ponner E.Le, Mandin C. Relationships between indoor radon concentrations, thermal retrofit and dwelling characteristics. J. Environ. Radioact., 2016, Vol. 165, pp. 124–130.
14. Pampuri L., Caputo P., Valsangiacomoa 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.
15. Fojtikova I., Navratilova Rovenska K. Influence of energy-saving measures on the radon concentration in some kindergartens in the Czech Republic. Radiat. Prot. Dosimetry, 2014, Vol. 160, pp. 149–153.
16. Hoffmann, M. [et al.] Radon und Gebäudesanierung. Fachgespräch Radon. BfS (2012).
17. Burkart W., Wemli C., Brunner H.H. Matched pair analysis of the influence of weather-stripping on indoor radon concentration in Swiss dwellings. Radiat. Prot. Dosimetry, 1984, Vol. 7(1-4), pp. 299–302.
18. Yarmoshenko I., Malinovsky G., Vasilyev A. [et al.] Geogenic and anthropogenic impacts on indoor radon in the Techa River region. Science of the Total Environment, 2016, Vol. 571, pp. 1298–303.
19. Du L., Leivo V., Prasauskas T. [et al.] Effects of energy retrofits on Indoor Air Quality in multifamily buildings. Indoor Air, 2019, Vol. 29 (4), pp. 686–697.
20. Fleischer R.L., Mogro-Campero A., Turner L.G. Indoor radon levels in the northeastern U.S.: effects of energy-efficiency in homes. Health Physics, 1983, Vol. 45(2), pp. 407–412.
21. Vasilyev A.V., Yarmoshenko I.V., Zhukovsky M.V. Radon safety of modern multi-storey buildings with different energy efficiency classes. Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene, 2018, Vol. 11, No 1, pp. 80–84. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-1-80-84.

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

22. Arvela H., Holmgren O., Reisbacka H. Radon prevention in new construction in Finland: a nationwide sample survey in 2009. *Radiat. Prot. Dosimetry*, 2012, Vol. 148, pp. 465–474.
23. Cucuș (Dinu) A., Dicu T., Cosma C. Indoor radon exposure in energy-efficient houses from Romania. *Rom. Journ. Phys.*, 2015, Vol. 60 (9-10), pp. 1574–1580.
24. 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(4), pp. 601–605.
25. Finne I.E., Kolstad T., Larsson M. Significant reduction in indoor radon in newly built houses. *J. Environ. Radioact.*, 2019, Vol. 196, pp. 259–263.
26. Ringer, W. Monitoring trends in civil engineering and their effect on indoor radon. *Radiat. Prot. Dosimetry*, 2014, Vol. 160(1-3), pp. 38–42.
27. Goyette Pernot J., Hager-Jörin C., Pampuri L. Indoor radon and air quality investigations in new or renovated energy-efficient Swiss single-family dwellings. *PLEA 2015 – Architecture in revolution* September 2015, Bologna, Italy.
28. Nero A.V., Boegel M.L., Hollowell C.D., Ingersoll J.G. and Nazaroff W.W. Radon concentrations and infiltration rates measured in conventional and energy-efficient houses. *Health Phys.*, 1983, Vol. 45(2), pp. 401–405.
29. Yarmoshenko I.V., Vasilyev A.V., Onishchenko A.D., Kiselev S.M., Zhukovsky M.V. Indoor radon problem in energy efficient multi-storey buildings. *Radiat. Prot. Dosimetry*, 2014, Vol. 160(1-3), pp. 53–56.
30. Vasilyev A.V., Zhukovsky M.V., Onishchenko A.D., Vishnevsky A.A. Building materials as a radon source in buildings constructed with modern technologies. *Stroitelnyye materialy = Construction Materials*, 2013, Vol. 4, pp. 104–107. (In Russian)

Received: May 22, 2019

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

For correspondence: Georgy P. Malinovsky – Candidate of Biological Science, 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)

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

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

For citation: Yarmoshenko I.V., Malinovsky G.P., Onishchenko A.D., Vasilyev A.V. Problem of radon exposure in energy-efficient buildings: a review. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene, 2019, Vol. 12, No. 4, pp. 56-65. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-4-56-65