

СОВРЕМЕННЫЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЕСТЕСТВЕННОЙ ЭМАНАЦИИ ИЗОТОПОВ РАДОНА: ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

© 2020 г. В. А. Карпин

БУ ВО ХМАО – Югры «Сургутский государственный университет», г. Сургут

Природное излучение является основным источником облучения населения, составляя около 70 % всей суммарной дозы естественного радиоактивного фона. При этом среди всех природных источников от 40 до 90 % приходится на долю радона и его дочерних продуктов распада. Главная опасность для здоровья населения в жилых помещениях и на рабочих местах – развитие злокачественных заболеваний органов дыхания. Основная цель радоновой стратегии – снижение заболеваемости и смертности от радон-индуцированного рака легких. Необходимо учитывать, что радон является конкурирующей причиной возникновения рака легкого наряду с табакокурением. Уровень объемной активности радона зависит от двух основных факторов – геолого-географической среды и конструктивных особенностей зданий. Стратегической задачей, направленной на снижение радонового риска, является применение современных технологий защиты зданий от радона на стадии их строительства и реконструкции. Современное состояние радоновой проблемы свидетельствует о необходимости постоянного контроля и внедрения новых современных мероприятий по реализации радоновой стратегии. Представления о радоновой опасности постоянно изменяются, уточняются и совершенствуются, что способствует разработке и принятию новых рекомендаций Международной комиссии по радиологической защите и МАГАТЭ в области радиационной защиты населения от природных источников ионизирующего излучения. Неукоснительная реализация этих рекомендаций в конечном итоге позволит существенно повысить качество общественного здоровья.

Ключевые слова: радон, естественная эманация, радон-индуцированный рак легких, регулирующие факторы, радонозащитные мероприятия

MODERN ENVIRONMENTAL ASPECTS OF RADON ISOTOPES NATURAL EMANATION: A LITERATURE REVIEW

V. A. Karpin

Surgut State University, Surgut, Russia

Natural radiation is the main source of exposure of the population, accounting for about 70 % of the total dose of natural radioactive background. At the same time, radon and its pre-black decay products account for 40 to 90 % of all natural sources. The main danger to public health in residential areas and workplaces is the development of malignant diseases of the respiratory system. The main goal of the radon strategy is to reduce the incidence and mortality from radon-induced lung cancer. It should be taken into account that radon in the air is the second most important cause of lung cancer after smoking. The level of radon volume activity depends on two main factors – the geological and geographical environment and the structural features of buildings. A strategic goal aimed at reducing radon risk is the use of modern technologies to protect buildings from radon at the stage of their construction and re-construction. The current state of the radon problem indicates the need for constant monitoring and implementation of new modern measures to implement the radon strategy. The concept of radon hazard is constantly changing, refined and improved, which contributes to the development and adoption of new recommendations of the International Commission on radiological protection in the field of radiation protection of the population from natural sources of ionizing radiation. Strict implementation of these recommendations will ultimately significantly improve the quality of public health.

Key words: radon, natural emanation, radon-induced lung cancer, regulatory factors, radon protection measures

Библиографическая ссылка:

Карпин В. А. Современные экологические аспекты естественной эманации изотопов радона: обзор литературы // Экология человека. 2020. № 6. С. 34–40.

For citing:

Karpin V. A. Modern Environmental Aspects of Radon Isotopes Natural Emanation: a Literature Review. *Ekologiya cheloveka* [Human Ecology]. 2020, 6, pp. 34-40.

На поверхности Земли во все геологические периоды постоянно присутствует естественный радиоактивный фон (ЕРФ). Многочисленные исследования показали, что природное излучение является основным источником облучения населения, составляя около 70 % всей суммарной дозы ЕРФ [13, 15]. В свою очередь среди всех природных источников ионизирующего излучения (ПИИИ) от 40 до 90 % приходится на долю радона и его дочерних продуктов распада (ДПР) [5, 7, 11, 15, 21, 23]. Присутствуя внутри всех зданий и сооружений, радон вносит основной вклад в радиационное облучение населения [21].

Обнаруженная во всех подземных коммуникациях, вначале радоновая проблема связывалась с трудовой деятельностью шахтеров. Однако в послевоенные годы XX века в связи с активным освоением ядерной энергии возникла необходимость защиты населения от различных источников радиоактивного заражения местности и было выявлено, что радон является важнейшим фактором риска развития рака легкого не только у шахтеров [6].

К настоящему времени разработана определенная система радиационной защиты и оценки влияния ионизирующего излучения на организм человека на международном уровне, которая продолжает посто-

янно совершенствоваться [4, 14, 21, 22]. Надзорные мероприятия осуществляются целой группой различных международных организаций, важнейшими из которых являются Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЕ), Международная комиссия по радиологической защите (МКРЗ), Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ), Научный комитет по действию атомной радиации ООН (НКДАР ООН).

Во время акта дыхания радон через воздух попадает в легкие. Сам по себе, будучи инертным газом, он полностью выдыхается обратно. Радиационную опасность представляют его ДПР, которые оседают на легочных тканях с последующим их облучением и развитием онкологических заболеваний [5, 9, 11]. Риск рака легкого зависит от продолжительности и мощности экспозиции. Кроме того, существенными факторами являются пол и возраст [12]. Канцерогенный риск зависит главным образом от объемной активности (ОА) радона в воздухе помещений [2].

Среди всех подтвержденных случаев рака легкого на долю эманации радона в жилых помещениях приходится, по различным данным, от 3 до 14 %. Заслуживает внимания тот факт, что связь радонового облучения с другими онкологическими заболеваниями не была достоверно доказана [5, 7, 23, 46, 48]. По данным [10], около 17 % смертельных случаев рака легкого могут приходиться на долю радоновой радиации.

Риск развития рака легкого напрямую зависит от длительности радонового контакта, однако не найдено убедительных доказательств порога облучения, то есть имеет место беспороговый патологический эффект [5, 13, 35].

Главная цель радоновой стратегии — снижение заболеваемости и смертности от радон-индуцированного рака легких [6–8, 13].

Требуется особое изучение распространенности табакокурения среди населения как конкурирующего с радоновым облучением фактора риска развития легочных онкологических заболеваний. По данным немногочисленных специальных исследований [2, 9–12], этот риск у курящих лиц возрастает практически почти в 2 раза.

Отсюда следует важнейший практический вывод: профилактику онкологических бронхолегочных заболеваний необходимо организовывать как минимум в двух направлениях, то есть помимо радонозащитных мероприятий проводить активную борьбу с табакокурением, отводя при этом важную роль повсеместному гигиеническому образованию населения [10].

Уровень ОА радона зависит от двух основных факторов: а) геогенного — геолого-географических характеристик природной среды и климатических условий и б) антропогенного — конструкции зданий и систем их вентиляции. Главное отличие этих факторов заключается в том, что первый практически не поддается управлению (за исключением радиационной оценки территории планируемого строительства), в то время как второй является основным источником

совершенствования радиационной безопасности населения [5, 7, 23].

Уровень концентрации радона в жилых и общественных помещениях зависит от состояния подлежащих пород и грунтов, обладающих различной степенью задержки эманации радона. В связи с этим в различных селитебных зонах разрабатываются карты геогенного радонового потенциала с перспективой создания единого Атласа естественной радиоактивности [36, 47].

На радоновый потенциал оказывают определенное влияние различные факторы окружающей среды, поэтому национальные исследования занимаются в том числе разработкой различных поправочных коэффициентов [27, 28].

Среди них немаловажное значение имеют погодные условия и их сезонные колебания. Для их анализа используются данные об атмосферном давлении, температуре, влажности атмосферного воздуха, а также о количестве выпавших осадков, оказывающих влияние на влажность подлежащих грунтов [16]. Определенное влияние на концентрацию радона в жилых помещениях могут оказывать сезонные колебания: зимой, как правило, концентрация радона больше, чем летом [19, 25, 27, 29, 45, 56]. Поэтому показатели должны быть скорректированы с использованием соответствующего сезонного поправочного коэффициента, чтобы правильно оценить среднегодовой радоновый уровень [29].

Важнейшей особенностью радоновой проблемы на большей территории Российской Федерации (РФ) являются ее суровые климатические условия, что требует определенных дополнительных усилий при организации радонозащитных мероприятий [21].

Радоновая проблема требует комплексного подхода к ее решению. Международная комиссия по радиологической защите рекомендует разработку Национальных программ для защиты населения от радоновой опасности. Стратегическая цель реализации подобных программ — защита населения от онкологических заболеваний дыхательной системы [5].

В нашей стране подобную цель преследуют утвержденные Президентом РФ в 2018 году «Основы государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу», одним из важнейших путей эффективной реализации которых является снижение до приемлемого уровня воздействия на населения ПИИИ [3].

Негативное влияние радона на население можно регулировать, поэтому в различных регионах установлены допустимые уровни его содержания в жилых помещениях. С этой целью проводятся регулярные измерения для оценки среднегодовой объемной активности (СОА) радона в сравнении с нормативным уровнем. В России норматив выражен в единицах эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) радона и ограничивается на уровне 100 и 200 Бк/м³ для вводимых в эксплуатацию и существу-

ющих зданий соответственно. В случае превышения норматива должны проводиться радонозащитные мероприятия с последующими контрольными измерениями [23].

В РФ проводится интенсивная работа по обеспечению радиационной безопасности населения от ПИИИ. Однако утверждать, что ситуация находится под полным контролем, преждевременно [21].

Анализ основных мировых тенденций в решении радоновой проблемы позволяет заключить, что в принципе подходит к завершению этап, связанный с интенсивной разработкой аппаратно-методической и регуляторной базы, и начинается формирование инфраструктуры оказания услуг в разных сферах деятельности, направленной на обеспечение безопасности от данного компонента природного облучения. Для реализации государственной политики в данной области необходимо формирование системного подхода к решению обозначенных проблем. Эта деятельность должна осуществляться в рамках Национальной программы, предполагающей тесное взаимодействие различных министерств и ведомств. На основании федеральной программы на местах должны разрабатываться региональные программы, основными задачами которых являются:

- проведение систематических выборочных обследований жилых, общественных и производственных зданий на содержание радона в воздухе помещений, по результатам которых выполняется оценка радиационной обстановки в регионе;
- организация и проведение мероприятий по снижению облучения населения; обследование состояния здоровья и проведение профилактических мероприятий для лиц, вошедших в группы риска;
- организация радонозащитных мероприятий при строительстве новых зданий и сооружений и при реконструкции существующих объектов;
- формирование региональных баз данных по радиоактивности объектов окружающей среды, дозам облучения населения, состоянию здоровья населения, подвергающегося повышенному облучению [13].

Стратегической задачей, эффект от реализации которой реально позволит снизить радоновую нагрузку на население, учитывая современные темпы обновления жилого фонда, является разработка и внедрение в практику современных технологий защиты зданий от радона на стадии строительства и реконструкции [13].

Основное влияние на содержание радона в воздухе помещений оказывают следующие факторы:

- радиологические характеристики подстилающего грунта и строительных материалов (прежде всего удельная активность радия в них, значение коэффициента эманирования радона из грунтов и их газопроницаемость и др.);
- характеристика систем вентиляции здания и режим его проветривания;
- конструктивные особенности здания (этажность, тип фундамента, наличие аэродинамической связи

между этажами, расположение систем коммуникаций в контуре здания и т. п.);

- тип остекления окон (степень их герметичности, наличие вентиляционных клапанов и др.);
- тип отопления здания (печное или центральное);
- уровень пола в помещениях относительно поверхности земли [17, 22].

При инженерно-строительном планировании необходимо проводить предварительную оценку радоноопасности участков застройки, на основании которой должен решаться вопрос о применении соответствующих методов противорадонной защиты [16].

В разных странах существуют различные подходы к методам оценки территориальной радоноопасности. За рубежом в качестве таких критериев используют радоновый потенциал или радоновый индекс, которые в разных странах определяются с помощью различных величин. В России для оценок потенциальной радоноопасности участка застройки используют плотность потока радона (ППР), измеренную на земной поверхности [16].

При строительстве и реконструкции зданий и сооружений необходимо учитывать определенный вклад в радиационную радоновую обстановку различных строительных и отделочных материалов. Проведенные целенаправленные исследования показали повышенное содержание радия в сланцах, отходах от переработки фосфатной руды, в золе и шлаках от сжигания угля и сланцев и т. д. [17, 22].

В связи с развитием строительной индустрии значительно расширяется ассортимент применяемого строительного сырья и отделочных материалов. Необходимо повсеместно внедрять их предварительное обследование на содержание природных нуклеотидов [20].

При строительстве и реконструкции общественных зданий применяются различные способы их антирадоновой защиты. Наиболее эффективным является использование различных «радонозащитных мембран» при проектировании фундаментов. Для решения поставленных задач необходимо применять радонозащитные материалы с долгосрочным низким коэффициентом диффузии радона. Проведенные специальные исследования показали, что наиболее подходящими с этой точки зрения являются керамические и керамогранитные облицовочные изделия. Их важнейшим качеством является сохранность радонозащитных свойств практически на весь период эксплуатации зданий [18].

Степень эманиции радона зависит от этажности сооружения: имеет место обратная пропорциональная зависимость — чем выше этаж, тем меньше значение ЭРОА радона. Поэтому в наиболее неблагоприятной ситуации оказываются малоэтажные и особенно одноэтажные конструкции, среди которых в свою очередь каменные и кирпичные дома менее радоноопасны, чем деревянные. В последних обычно используется печное отопление, а подлежащие структуры не имеют радонозащитных фундаментов. Причем этот эффект более выражен в холодный период года [19].

Сравнительный анализ радоновых обследований в зданиях различных периодов постройки позволил разделить их на две группы: а) с периодом постройки 1920–1950-х годов и в) с постройкой после 1950-х годов. Оказалось, что значения ЭРОА радона в первой группе было в 1,7 раза выше, чем во второй. Данный факт выявляет необходимость выделения в особую группу зданий «обветшалого фонда», которые требуют организации первоочередных обследований и проведения срочной реконструкции с применением соответствующих радонозащитных мероприятий или подлежат сносу [15].

Одним из реальных путей решения радоновой проблемы является снижение концентрации радона в воздухе вновь построенных жилых помещений по сравнению с ранее существующими. Этот показатель может быть использован как результат эффективности используемых методов защиты населения от природных радионуклидов [19].

В ряде случаев в силу сложившихся определенных финансово-экономических обстоятельств можно применять метод так называемой «пассивной» радонозащиты здания, заключающийся в создании газонепроницаемой мембраны, опирающейся на несущий элемент, которым могут быть полы с использованием уплотнения и герметизации различных щелей и стыков, что будет способствовать снижению диффузионного и конвективного переноса радона в воздух помещений. Существенное преимущество этого метода заключается в том, что он не требует дополнительного обслуживания, что позволяет существенно снизить эксплуатационные расходы [17].

Постоянный контроль за экологической безопасностью современного строительства необходим в связи с постоянным введением новых энергоэффективных решений [42].

Начиная с 1980–1990-х годов в России и других странах мира энергосбережение и повышение энергетической эффективности рассматриваются в качестве важных условий, обеспечивающих устойчивое развитие общества. Увеличение доли многоквартирных зданий наивысших классов энергоэффективности в современном строительстве жилых и общественных помещений происходит ускоренными темпами. Энергоэффективная реконструкция зданий имеет целью экономию энергии и, таким образом, сокращение выбросов CO₂. Однако повышенная энергоэффективность здания часто подразумевает снижение воздухообмена. Вместе с другими проблемами качества воздуха в помещениях это может привести к увеличению в них концентрации радона. Для исследования масштабов этой проблемы были проведены измерения концентрации радона в энергоэффективных отремонтированных и низкоэнергетических домах. Статистический анализ показал, что дома, отремонтированные для повышения энергоэффективности, имеют более широкое распределение концентраций радона внутри помещений, чем неотремонтированные. Как среднее значение, так и медиана концентрации радона почти

удвоились в зданиях, отремонтированных для повышения энергоэффективности. Разница оказалась статистически значимой [37]. Подобные результаты получены во многих зарубежных исследованиях в течение последних 10 лет [26, 31–34, 38–41, 43].

Внедрение современных технологий, снижающих теплопотери, сопровождается определенной нежелательной трансформацией микроклимата помещений. Ключевым фактором, влияющим на радоновую обстановку в зданиях с повышенным классом энергоэффективности, является снижение кратности воздухообмена (КВО) в пассивном режиме эксплуатации здания, когда перекрыты пути естественного притока свежего воздуха и отключены другие системы вентиляции. В последнее время начали вводиться новые строительные правила, повышающие требования к защите населения от радоновой опасности. В частности, было установлено требование по оборудованию зданий механической приточно-вытяжной вентиляцией [1, 24, 30].

Принятие необходимых мер по радоновому контролю строительных и отделочных материалов, оптимизация воздухообмена в современных строительных конструкциях, контроль земельных участков, отводимых под строительство жилых и общественных зданий, а также соответствующий прием в эксплуатацию строительных объектов будут способствовать оптимизации радиационной безопасности населения [22].

Современное состояние радоновой проблемы свидетельствует о необходимости постоянного контроля и внедрения новых современных мероприятий по реализации радоновой стратегии. Необходимо учитывать тот факт, что представления о радоновой опасности постоянно изменяются, уточняются и совершенствуются, что способствует разработке и принятию новых рекомендаций МКРЗ и МАГАТЭ в области радиационной защиты населения от ПИИИ. Неукоснительная реализация этих рекомендаций в конечном итоге позволит существенно повысить качество общественного здоровья.

Карпин Владимир Александрович – SPIN 1860-8435; ORCID 0000-0002-8731-0786

Список литературы

1. Васильев А. В., Ярмошенко И. В., Жуковский М. В. Радоновая безопасность современных многоэтажных зданий различных классов энергетической эффективности // Радиационная гигиена. 2018. Т. 11, № 1. С. 80–84.
2. Голованев С. М. Радон и канцерогенный риск в г. Москве // Радиационная гигиена. 2015. Т. 8, № 1. С. 16–22.
3. Историк О. А., Еремина Л. А., Барковский А. Н., Кормановская Т. А., Ахматдинов Р. Р. Облучение населения Ленинградской области за счет природных источников ионизирующего излучения // Радиационная гигиена. 2018. Т. 11, № 2. С. 91–97.
4. Карпин В. А., Кострюкова Н. К., Гудков А. Б. Радиационное воздействие на человека радона и его дочерних продуктов распада // Гигиена и санитария. 2005. № 4. С. 13–17.

5. Киселев С. М., Жуковский М. В. Современные подходы к обеспечению защиты населения от радона. Международный опыт регулирования // Радиационная гигиена. 2014. Т. 7, № 4. С. 48–52.
6. Киселев С. М. Формирование современной методологии регулирования защиты населения от облучения радоном // Гигиена и санитария. 2017. Т. 96, № 1. С. 52–56.
7. Киселев С. М., Стамат И. П., Маренный А. М., Ильин Л. А. Обеспечение защиты населения от облучения радоном. Проблемы и пути решения // Гигиена и санитария. 2018. Т. 97, № 2. С. 101–110.
8. Киселев С. М., Маренный А. М., Романов В. В. Радон. Современные подходы к регулированию радиационной безопасности населения // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 2. С. 94–102.
9. Кононенко Д. В., Кормановская Т. А. Проблема оценки радиационных рисков населения Российской Федерации при облучении радоном // Радиационная гигиена. 2012. Т. 5, № 1. С. 60–62.
10. Кононенко Д. В. Оценка радиационного риска для населения Санкт-Петербурга при облучении радоном // Радиационная гигиена. 2013. Т. 6, № 1. С. 31–37.
11. Кононенко Д. В., Кормановская Т. А. Оценка риска при облучении радоном для населения субъектов Российской Федерации на основе данных радиационно-гигиенического паспорта территории // Радиационная гигиена. 2015. Т. 8, № 4. С. 15–22.
12. 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.
13. Маренный А. М., Киселев С. М. Национальные радоновые программы: опыт реализации и задачи на перспективу // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 2 (спецвыпуск). С. 97–108.
14. Мироновская А. В., Бузинов Р. В., Гудков А. Б. Прогнозная оценка неотложной сердечно-сосудистой патологии у населения северной урбанизированной территории // Здравоохранение Российской Федерации. 2011. № 5. С. 66–67.
15. Охрименко С. Е., Коренков И. П., Микляев П. С., Прохоров Н. И., Вербова Л. Ф., Орлов Ю. В., Петрова Т. Б., Ляценова Т. Н., Акопова Н. А., Киселев С. М. Ранжирование территории Москвы по потенциальной радоновой опасности // Гигиена и санитария. 2017. Т. 96, № 3. С. 211–216.
16. Рыжакова Н. К., Ставицкая К. О., Удалов А. А. Проблемы оценки потенциальной радоноопасности участков застройки // Радиационная гигиена. 2018. Т. 11, № 2. С. 37–44.
17. Световидов А. В., Венков В. А., Горский Г. А. Опыт проведения радонозащитных мероприятий в эксплуатируемых зданиях // Радиационная гигиена. 2009. Т. 2, № 4. С. 35–39.
18. Световидов А. В., Стамат И. П., Венков В. А. Исследование радонозащитных характеристик облицовочных изделий и материалов // Радиационная гигиена. 2014. Т. 7, № 3. С. 19–25.
19. Соловьев М. Ю., Калинина М. В., Стамат И. П. Содержание радона в воздухе вновь построенных и эксплуатируемых зданий в Ростовской области // Радиационная гигиена. 2010. Т. 3, № 2. С. 62–66.
20. Стамат И. П., Горский Г. А. Требования по ограничению облучения населения природными источниками излучения в коммунальных условиях // Радиационная гигиена. 2010. Т. 3, № 4. С. 5–9.
21. Стамат И. П., Кормановская Т. А., Горский Г. А. Радиационная безопасность населения России при облучении природными источниками ионизирующего излучения: современное состояние, направления развития и оптимизации // Радиационная гигиена. 2014. Т. 7, № 1. С. 54–62.
22. Степанов Е. Г., Жеребцов А. С., Гильманов Ш. З., Хисамиев И. И., Шакирова Е. С., Туваняева О. В. Обеспечение радиационной безопасности населения при воздействии природных источников ионизирующего излучения // Радиационная гигиена. 2015. Т. 8, № 1. С. 73–74.
23. Цапалов А. А., Киселев С. М., Маренный А. М., Ковлер К. Л., Кувшинников С. И. Неопределенность результатов контроля радона в помещениях. Ч. 1. Проблема оценки содержания радона и современный принцип контроля // Радиационная гигиена. 2018. Т. 11, № 1. С. 53–63.
24. Ярмошенко И. В., Малиновский Г. П., Онищенко А. Д., Васильев А. В. Проблема облучения радоном в зданиях повышенного класса энергоэффективности // Радиационная медицина. 2019. Т. 12, № 4. С. 56–65.
25. Al-Khateeb H. M., Nuseirat M., Aljarrah K., Al-Akhras M. H., Bani-Salameh H. Seasonal variation of indoor radon concentration in a desert climate // Applied Radiation and Isotopes. 2017. Vol. 130. P. 49–53.
26. Arvola H., Holmgren O., Reischack H. Radon prevention in new construction in Finland: a nationwide sample survey in 2009 // Radiation Protection Dosimetry. 2012. Vol. 148, N 4. P. 465–474.
27. Barros N. G., Steck D. J., Field R. W. A comparison of winter short-term and annual average radon measurements in basements of a radon-prone region and evaluation of further radon testing indicators // Health Physics. 2014. Vol. 106, N 5. P. 535–544.
28. Barros N. G., Steck D. J., Field R. W. Utility of short-term basement screening radon measurements to predict yearlong residential radon concentration on upper floors // Radiation Protection Dosimetry. 2016. Vol. 171, N 3. P. 405–413.
29. Burke Q., Murphy P. Regional variation of seasonal correction factors for indoor radon levels // Radiation Measurements. 2011. Vol. 46, N 10. P. 1168–1172.
30. Collignan B., Lorkowski C., Améon R. Development of a methodology to characterize radon entry in dwellings // Building and Environ. 2012. Vol. 57. P. 176–183.
31. Collignan B., Le Ponner E., Mandin C. Relationships between indoor radon concentrations, thermal retrofit and dwelling characteristics // Journal of Environmental Radioactivity. 2016. Vol. 165. P. 124–130.
32. Du L., Leivo V., Prasauskas T., Dainius M. N., Haverinen-Shaughnessy M. U. Effects of energy retrofits on indoor air quality in multifamily buildings // Indoor Air. 2019. Vol. 29, N 4. P. 686–697.
33. Finne I. E., Kolstad T., Larsson M., Olsen B., Prendergast J., Rudjord A. L. Significant reduction in indoor radon in newly built houses // Journal of Environmental Radioactivity. 2019. Vol. 196. P. 259–263.
34. Fojtikova I., Navratilova Rovenska K. Influence of energy-saving measures on the radon concentration in some kindergartens in the Czech Republic // Radiation Protection Dosimetry. 2014. Vol. 160, N 1–3. P. 149–153.
35. Fornalski K. W., Dobrzyński L. Pooled Bayesian analysis of twenty-eight studies on radon induced lung cancers // Health Physics. 2011. Vol. 101, N 3. P. 265–273.
36. Gruber V., Bossew P., De Cjrt M., Tollefsen T. The

European map of the geogenic radon potential // *Journal of Radiological Protection*. 2013. Vol. 33, N1. P. 51–60.

37. Meyer W. Impact of constructional energy saving measures on radon levels indoors // *Indoor Air*. 2019. Vol. 29, N 4. P. 680–685.

38. Milner J., Shrubsole C., Das P., Jones B., Ridley I., Chalabi Z., Hamilton I., Armstrong B., Davies M., Wilkinson P. Home energy efficiency and radon related risk of lung cancer: modelling study // *British Medical Journal*. 2014. Vol. 348. P. 1–12.

39. 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. P. 100–106.

40. 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, N 2. P. 307–317.

41. Ringer W. Monitoring trends in civil engineering and their effect on indoor radon // *Radiation Protection Dosimetry*. 2014. Vol. 160, N 1–3. P. 38–42.

42. Santos Hugo R. R., Leal Vítor M. S. Energy vs. ventilation rate in buildings: A comprehensive scenario-based assessment in the European context // *Energy and Buildings*. 2012. Vol. 54. P. 111–121.

43. Slezakova M., Navratilova Rovenska K., Tomasek L., Holecek J. Short- and long-term variability of radon progeny concentration in dwellings in the Czech Republic // *Radiation Protection Dosimetry*. 2013. Vol. 153, N 3. P. 334–341.

44. Stojanovska Z., Januskeski J., Bossew P., Zunic Z., Tollefsen T., Ristova M. Seasonal indoor radon concentration in FYR of Macedonia // *Radiation Measurements*. 2011. Vol. 46, N 6–7. P. 602–610.

45. Szabó K. Z., Jordan G., Szabó C. Dynamics of soil gas radon concentration in a highly permeable soil based on a long-term high temporal resolution observation series // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2013. Vol. 124. P. 74–83.

46. Tirmarhe M., Harrison J. D., Laurier D., Paquet F., Blanchardon E., Marsh J. W. ICRP Publication 115. Lung cancer risk from radon and progeny and statement on radon // *Annals of the ICRP*. 2010. Vol. 40, N1. P. 1–64.

47. Tollefsen T., Cinelli G., Bossew P., Gruber V., De Cort M. From the European indoor radon map towards an Atlas of natural radiation // *Radiation Protection Dosimetry*. 2014. Vol. 162, N 1–2. P. 129–134.

48. Tomasek L. Effect of Age at Exposure in 11 Underground Miners Studies // *Radiation Protection Dosimetry*. 2014. Vol. 160, N 1–3. P. 124–127.

References

1. Vasiliev A. V., Yarmoshenko I. V., Zhukovsky M. V. Radon safety of modern multi-storey buildings of various classes of energy efficiency. *Radiatsionnaya gigiena* [Radiation hygiene]. 2018, 11 (1), pp. 80–84. [In Russian]

2. Golovanov S. M. Radon and carcinogenic risk in Moscow. *Radiatsionnaya gigiena* [Radiation hygiene]. 2015, 8 (1), pp. 16–22. [In Russian]

3. Historian O. A., Eremina L. A., Barkovsky A. N., Kormanovskaya T. A., Akhmatdinov R. R. Irradiation of the population of the Leningrad region due to natural sources of ionizing radiation. *Radiatsionnaya gigiena* [Radiation hygiene]. 2018, 11 (2), pp. 91–97. [In Russian]

4. Karpin V. A., Kostryukova N. K., Gudkov A. B. Human

radiation action of radon and its daughter disintegration products. *Gigiena i sanitariia*. 2005, 4, pp. 13–17. [In Russian]

5. Kiselev S. M., Zhukovsky M. V. Modern approaches to ensure the protection of the population from radon. International regulatory experience. *Radiatsionnaya gigiena* [Radiation hygiene]. 2014, 7 (4), pp. 48–52. [In Russian]

6. Kiselev S. M. The formation of a modern methodology for regulating the protection of the population from exposure to radon. *Gigiena i sanitariia*. 2017, 96 (1), pp. 52–56. [In Russian]

7. Kiselev S. M., Stamat I. P., Marenniy A. M., Ilyin L. A. Ensuring the protection of the population from exposure to radon. Problems and solutions. *Gigiena i sanitariia*. 2018, 97 (2), pp. 101–110. [In Russian]

8. Kiselev S. M., Marenniy A. M., Romanov V. V. Radon. Modern approaches to the regulation of radiation safety of the population. *Radiatsionnaya gigiena* [Radiation hygiene]. 2019, 12 (2), pp. 94–102. [In Russian]

9. Kononenko D. V., Kormanovskaya T. A. The problem of assessing the radiation risks of the population of the Russian Federation when exposed to radon. *Radiatsionnaya gigiena* [Radiation hygiene]. 2012, 5 (1), pp. 60–62. [In Russian]

10. Kononenko D. V. Assessment of radiation risk for the population of St. Petersburg when exposed to radon. *Radiatsionnaya gigiena* [Radiation hygiene]. 2013, 6 (1), pp. 31–37. [In Russian]

11. Kononenko D. V., Kormanovskaya T. A. Risk assessment for exposure to radon for the population of the constituent entities of the Russian Federation on the basis of radiation-hygienic passport data. *Radiatsionnaya gigiena* [Radiation hygiene]. 2015, 8 (4), pp. 15–22. [In Russian]

12. Malinovsky G. P., Yarmoshenko I. V., Zhukovsky M. V. Radon, smoking, and human papillomavirus as risk factors for lung cancer in an environmental-type epidemiological study. *Radiatsionnaya gigiena* [Radiation hygiene]. 2017, 10 (2), pp. 106–114. [In Russian]

13. Marenniy A. M., Kiselev S. M. National radon programs: implementation experience and tasks for the future. *Radiatsionnaya gigiena* [Radiation hygiene]. 2019, 12 (2), pp. 97–108. [In Russian]

14. Mironovskaya A. V., Buzinov R. V., Gudkov A. B. Prognostic evaluation of urgent cardiovascular disease in the population of a northern urbanized area. *Zdravookhranenie Rossiiskoi Federatsii* [Public Health of the Russian Federation]. 2011, 5, pp. 66–67. [In Russian]

15. Okhrimenko S. E., Korenkov I. P., Miklyaev P. S., Prokhorov N. I., Verbova L. F., Orlov Yu. V., Petrova T. B., Laschenova T. N., Akopova N. A., Kiselev S. M. Ranking the territory of Moscow by potential radon hazard. *Gigiena i sanitariia*. 2017, 96 (3), pp. 211–216. [In Russian]

16. Ryzhakova N. K., Stavitskaya K. O., Udalov A. A. Problems of assessing the potential radon hazard of building sites. *Radiatsionnaya gigiena* [Radiation hygiene]. 2018, 11(2), pp. 37–44. [In Russian]

17. Svetovidov A. V., Venkov V. A., Gorsky G. A. The experience of carrying out radon-protective measures in operating buildings. *Radiatsionnaya gigiena* [Radiation hygiene]. 2009, 2 (4), pp. 35–39. [In Russian]

18. Svetovidov A. V., Stamat I. P., Venkov V. A. Study of radon-protective characteristics of facing products and materials. *Radiatsionnaya gigiena* [Radiation hygiene]. 2014, 7(3), pp. 19–25. [In Russian]

19. Soloviev M. Yu., Kalinina M. V., Stamat I. P. The content of radon in the air of newly constructed and operated

buildings in the Rostov region. *Radiatsionnaya gigiena* [Radiation hygiene]. 2010, 3 (2), pp. 62-66. [In Russian]

20. Stamat I. P., Gorsky G. A. Requirements for limiting the exposure of the population to natural sources of radiation in communal conditions. *Radiatsionnaya gigiena* [Radiation hygiene]. 2010, 3 (4), pp. 5-9. [In Russian]

21. Stamat I. P., Kormanovskaya T. A., Gorsky G. A. Radiation safety of the population of Russia when irradiated with natural sources of ionizing radiation: current status, directions of development and optimization. *Radiatsionnaya gigiena* [Radiation hygiene]. 2014, 7 (1), pp. 54-62. [In Russian]

22. Stepanov E. G., Stallions A. S., Gilmanov Sh. Z., Khisamiev I. I., Shakirova E. S., Tuvanyaeva O. V. Ensuring radiation safety of the population when exposed to natural sources of ionizing radiation. *Radiatsionnaya gigiena* [Radiation hygiene]. 2015, 8 (1), pp. 73-74. [In Russian]

23. Tsapalov A. A., Kiselev S. M., Marenniy A. M., Kovler K. L., Kuvshinnikov S. I. Uncertainty of indoor radon monitoring results. Part 1. The problem of estimating the content of radon and the modern principle of control. *Radiatsionnaya gigiena* [Radiation hygiene]. 2018, 11 (1), pp. 53-63. [In Russian]

24. Yarmoshenko I. V., Malinovsky G. P., Onishchenko A. D., Vasiliev A. V. The problem of exposure to radon in buildings of high energy efficiency class. *Radiatsionnaya meditsina* [Radiation medicine]. 2019, 12 (4), pp. 56-65. [In Russian]

25. Al-Khateeb H. M., Nuseirat M., Aljarrah K., Al-Akhras M. H., Bani-Salameh H. Seasonal variation of indoor radon concentration in a desert climate. *Applied Radiation and Isotopes*. 2017, 130, pp. 49-53.

26. Arvela H., Holmgren O., Reisbacka H. Radon prevention in new construction in Finland: a nationwide sample survey in 2009. *Radiation Protection Dosimetry*. 2012, 148, 4, pp. 465-474.

27. Barros N. G., Steck D. J., Field R. W. A comparison of winter short-term and annual average radon measurements in basements of a radon-prone region and evaluation of further radon testing indicators. *Health Physics*. 2014, 106 (5), pp. 535-544.

28. Barros N. G., Steck D. J., Field R. W. Utility of short-term basement screening radon measurements to predict yearlong residential radon concentration on upper floors. *Radiation Protection Dosimetry*. 2016, 171 (3), pp. 405-413.

29. Burke Q., Murphy P. Regional variation of seasonal correction factors for indoor radon levels. *Radiation Measurements*. 2011, 46 (10), pp. 1168-1172.

30. Collignan B., Lorkowski C., Améon R. Development of a methodology to characterize radon entry in dwellings. *Building and Environ.* 2012, 57, pp. 176-183.

31. Collignan B., Le Ponner E., Mandin C. Relationships between indoor radon concentrations, thermal retrofit and dwelling characteristics. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2016, 165, pp. 124-130.

32. Du L., Leivo V., Prasauskas T., Dainius M. N., Haverinen-Shaughnessy M. U. Effects of energy retrofits on indoor air quality in multifamily buildings. *Indoor Air*. 2019, 29 (4), pp. 686-697.

33. Finne I. E., Kolstad T., Larsson M., Olsen B., Prendergast J., Rudjord A. L. Significant reduction in indoor radon in newly built houses. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2019, 196, pp. 259-263.

34. Fojtikova I., Navratilova Rovenska K. Influence of energy-saving measures on the radon concentration in some

kindergartens in the Czech Republic. *Radiation Protection Dosimetry*. 2014, 160 (1-3), pp. 149-153.

35. Fornalski K. W., Dobrzyński L. Pooled Bayesian analysis of twenty-eight studies on radon induced lung cancers. *Health Physics*. 2011, 101 (3), pp. 265-273.

36. Gruber V., Bossew P., De Cjrt M., Tollefsen T. The European map of the geogenic radon potential. *Journal of Radiological Protection*. 2013, 33 (1), pp. 51-60.

37. Meyer W. Impact of constructional energy saving measures on radon levels indoors. *Indoor Air*. 2019, 29 (4), pp. 680-685.

38. Milner J., Shrubsole C., Das P., Jones B., Ridley I., Chalabi Z., Hamilton I., Armstrong B., Davies M., Wilkinson P. Home energy efficiency and radon related risk of lung cancer: modelling study. *British Medical Journal*. 2014, 348, pp. 1-12.

39. 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, pp. 100-106.

40. Pigg S., Cautley D., Francisco P. W. Impacts of weatherization on indoor air quality: A field study of 514 homes. *Indoor Air*. 2018, 28 (2), pp. 307-317.

41. Ringer W. Monitoring trends in civil engineering and their effect on indoor radon. *Radiation Protection Dosimetry*. 2014, 160 (1-3), pp. 38-42.

42. Santos Hugo R. R., Leal Vitor M. S. Energy vs. ventilation rate in buildings: A comprehensive scenario-based assessment in the European context. *Energy and Buildings*. 2012, 54, pp. 111-121.

43. Slezakova M., Navratilova Rovenska K., Tomasek L., Holecek J. Short- and long-term variability of radon progeny concentration in dwellings in the Czech Republic. *Radiation Protection Dosimetry*. 2013, 153 (3), pp. 334-341.

44. Stojanovska Z., Januskeski J., Bossew P., Zunic Z., Tollefsen T., Ristova M. Seasonal indoor radon concentration in FYR of Macedonia. *Radiation Measurements*. 2011, 46 (6-7), pp. 602-610.

45. Szabó K. Z., Jordan G., Szabó C. Dynamics of soil gas radon concentration in a highly permeable soil based on a long-term high temporal resolution observation series. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2013, 124, pp. 74-83.

46. Tirmarche M., Harrison J. D., Laurier D., Paquet F., Blanchardon E., Marsh J. W. ICRP Publication 115. Lung cancer risk from radon and progeny and statement on radon. *Annals of the ICRP*. 2010, 40 (1), pp. 1-64.

47. Tollefsen T., Cinelli G., Bossew P., Gruber V., De Cort M. From the European indoor radon map towards an Atlas of natural radiation. *Radiation Protection Dosimetry*. 2014, 162 (1-2), pp. 129-134.

48. Tomasek L. Effect of Age at Exposure in 11 Underground Miners Studies. *Radiation Protection Dosimetry*. 2014, 160 (1-3), pp. 124-127.

Контактная информация:

Карпин Владимир Александрович – доктор медицинских наук, доктор философских наук, профессор кафедры внутренних болезней БУ ВО ХМАО – Югры «Сургутский государственный университет»

Адрес: 628412, Тюменская область, г. Сургут, пр. Ленина, д. 1.

E-mail: kafter57@mail.ru