

СОВРЕМЕННАЯ ОЦЕНКА РИСКОВ ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ ЧЕЛОВЕКА ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ РАДИАЦИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ РАДОНА В БЫТОВЫХ УСЛОВИЯХ¹

Ларионов Алексей Викторович

К.б.н., доцент, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет»
alekseylarionov09@gmail.com

MODERN ASSESSMENT OF RISKS TO HUMAN HEALTH WITH LONG-TERM RESIDENTIAL RADON EXPOSURE

A. Larionov

Summary. this article provides an analysis of the review of modern works on the assessment of the risk to human health of long exposure to radon in the home. A total of 37 sources published within the last 5 years and meeting the criteria were analyzed. It was noted that there is strong evidence in favor of the dependence of resident radon irradiation and its DPR and the risk of cancer pathology. The calculated risk models indicate the possibility of a significant reduction in social losses from radon-induced diseases through the implementation of remediation programs for residential premises characterized by increased radon levels.

Keywords: radon; radon-induced pathology; risk assessment; home remediation; lung cancer; hematological oncopathology.

Аннотация. В данной статье проведен анализ обзор современных работ, посвященных оценке риска для здоровья человека длительного экспонирования радоном в бытовых условиях. Всего было проанализировано 37 источников, опубликованных в течение последних 5 лет и удовлетворяющих выдвинутому критерию. Отмечено наличие убедительных свидетельств в пользу наличия зависимости резидентного облучения радоном и его ДПР и риска онкопатологий. Рассчитанные модели риска свидетельствуют о возможности значительного снижения социальных потерь от радон-индуцированных заболеваний, путем реализации программ ремедиации жилых помещений, характеризующихся повышенным уровнем радона.

Ключевые слова: Радон; радон-индуцированные патологии; оценка риска; ремедиация жилищ; рак легкого; гематологические онкопатологии.

Введение

Радон является одной из основных причин возникновения рака легкого, по числу случаев возникновения заболевания он уступает лишь курению. Выделение радона происходит повсеместно из рассеянного в земной коре урана (U^{235}), при этом в наружном воздухе радон не накапливается в значимых концентрациях ввиду сравнительно небольшого периода полураспада (3,82 сут.). В то же время радон способен накапливаться в замкнутых пространствах, лишенных вентиляции, таких как шахты, жилые дома и производственные помещения. В производственных условиях радон считается одной из главных причин развития рака легкого у шахтеров при добыче различных полезных ископаемых. В большинстве работ исследование заболеваемости раком легкого проводилось на выборках работников, экспонированных радоном в течение длительного времени. Одно из наиболее масштабных исследований в этой области включает 60000 обследованных шахтеров в Европе, Северной Америке, Азии и Австра-

лии, в том числе более 2600 случаев смерти от рака легкого [39].

В то же время установить зависимость экспонирования радоном в бытовых условиях в диапазоне сравнительно низких доз значительно сложнее, поскольку в данном случае остается неочевидным уровень повреждений, индуцируемых низкими дозами радона в течение длительного времени. В результате исследований больших групп людей было показано наличие взаимосвязи между экспонированием в бытовых условиях (резидентное облучение) и дополнительным риском развития рака легкого у обследованных [23]. Для европейской популяции средний дополнительный риск рака легкого в 8% (95% ДИ 3–16) на каждые дополнительные 100 Бк/м³. Данный риск не зависел от выборки, пола, возраста или курения обследованных. В то же время анализ, основанный на долговременной средней концентрации радона, показал вдвое большее значение риска — 16%. Общая оценка риска смертности от воздействия радона составила 9% от числа всех смертных случаев от рака легкого в европейской популяции

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (№ 16–34–60069\15 мол_а_дк).

[9]. Такая серьезная оценка дополнительного риска воздействия радона заставляет рассматривать проблемы резидентного облучения радоном как одну из важнейших гигиенических и медицинских проблем [1]. На сегодняшний день во многих странах признается недостаточность усилий по снижению концентрации радона в жилых помещениях, а также необходимость проведения комплексных мер, в том числе законодательного регулирования и распространения информации о радоне среди населения [16].

Общая оценка риска для здоровья

Радон является основным радиационным фактором, воздействующим на среднестатистического жителя Земли. Выделение радона зависит от состава материнских пород в регионе и в большой степени — от проницаемости грунта под зданием для радона. Главной особенностью радона является спорадическое распределение очагов выделения, что делает трудным прогнозирование уровня радона для конкретного жилого дома. Полную информацию о рисках для здоровья может дать только измерение концентрации радона в каждом жилом объекте. К сожалению, лишь малая часть собственников жилья уделяет внимание радоновой проблеме. Например, недавние исследования, проведенные в Канаде, показали, что не более 32% жителей уделяют проблеме радона в домах достаточное внимание, и лишь 12% проводили и исследования содержания радона в воздухе жилых помещений [19]. Проблема недостаточности информации и недооценка радона, несомненно, служит важным фактором, суммарного распространения радон-индуцированных заболеваний. Обзор 20 исследований по данной теме, проведенный в США, показал, что более половины опрошенных путают радон с монооксидом углерода. Среднестатистический домовладелец, очевидно, недостаточно знает о проблеме радона и путях снижения его концентрации [37].

Учитывая специфический ингаляционный путь поступления радона в организм человека, наибольший вклад приходится на заболеваемость раком легкого, трахеи и бронхов (TBL cancer). Общеизвестным является факт значительного увеличения заболеваемости в случаях комбинации радона и курения. Частицы табачного дыма создают благоприятную среду для переноса и накопления ионизированных атомов полония, висмута и свинца, продуктов дочернего распада радона, содержащихся в воздухе наряду с радоном. Так, в обширном исследовании, включавшем анализ статей 1980–2016 гг., была проведена оценка общего груза дополнительной заболеваемости раком легкого, вызванного влиянием радона. В качестве количественного показателя использовался показатель «годы жизни с поправкой на нетрудоспособность» (disability-adjusted life years, DALY). Общая оценка DALY в 2013 году составила $32 \sim < 405 \sim < 000$, при этом доля эффектов резидентного воздействия радона составила $1 \sim < 979 \sim < 000$ на 2013 год.

Среднее количество лет жизни, утраченное в результате воздействия радона, рассчитанное для Канады составило 0,066 лет для некурящих и 0,198 лет для прошлых/настоящих курильщиков [25].

Исследования, посвященные оценке влияния радона в жилых помещениях, проводились в США на примере штата Техас. Был проведен учет случаев врожденных пороков развития с 1999 по 2009 годы. Ассоциации с уровнем радона показали, что частота 14 видов патологий из 100 включенных в базу данных увеличивается в районах с повышенным уровнем выделения радона по данным геологического районирования. Случаи расщепленной губы с/ без расщелины неба имели скорректированную распространенность с коэффициентом увеличения 1,16 на каждый дополнительный 1 пКю/литр содержания радона (95% ДИ 1,08–1,26). Случаи кистозной гигромы/лимфангиомы имели скорректированное соотношение распространенности с коэффициентом 1,22 на 1 пКю/л (95% ДИ 1,02–1,46). Также возможно наличие ассоциаций с другими врожденными пороками: три скелетных дефекта, синдром Дауна, другие аномалии головного мозга, аномалии мочевого пузыря и мочеиспускательного канала [21].

Исследование, учитывающее заболеваемость различными видами онкопатологии, было проведено на примере Галисии — северо-западного региона Испании с общим населением 2,7 млн. человек. Использовались данные о заболеваемости в период 1999–2008 годы. В качестве референсной базы данных использовалась информация о 56~<385 случаях смертности в результате 14 типов онкопатологий. Учитывался уровень радона в помещениях, социодемографические факторы, высота над уровнем моря, содержание мышьяка в верхних слоях почвы. Помимо ожидаемого эффекта увеличения заболеваемости раком легкого, составившего 9% при двукратном увеличении содержания радона (OR = 1,09), также была показана взаимосвязь с раком желудка (OR = 1,17) и раком мозга (OR = 1,28) [22].

Рак легкого

Региональные исследования. Современные обширные эпидемиологические исследования позволяют провести оценку радона как фактора риска возникновения онкопатологий. Наибольшую информативность имеют исследования случаев рака легкого среди никогда не куривших людей; можно предположить, что в отсутствие фактора курения радон является основной причиной возникновения рака легкого.

Исследования, проведенные в пяти провинциях Канады в период 2006–2009 годов, показывают, что суммарная оценка смертности вызванной радоном составляет 2614 случаев за указанный период. Показатель дополнительного риска для населения составил 0,0001 для 4 провинций

и 0,0004 для провинции Манитоба. В работе указывается на необходимость уточнения оценки риска рака легкого в пользу одного из сценариев оценки вклада курения (модель 1: 90% для женщин, 95% для мужчин, либо модель 2: 85% для обоих полов) [2]. В схожей работе, проведенной по данным 2009–2012 годов (провинция Алберта), показана средняя концентрация радона 71 Бк/м³, общая оценка радон-индуцированных случаев РЛ составила 17% [17].

Оценка заболеваемости раком легкого в Швеции проводилась с использованием материалов радиологических исследований 1990 и 2008 годов на репрезентативной выборке жилых домов и общей оценкой 16% возрастания риска рака легкого при увеличении средней активности радона на 100 Бк/м³. Общая оценка вклада радона составила 591 случай в год, оценка заболеваемости в будущем составила 473 случая с учетом снижения среднего уровня радона в жилищах. Оценка эффективности снижения уровня радона в помещениях показала возможность предотвратить 183 случая при снижении уровня до 100 Бк/м³ во всех жилищах, превышающих этот уровень в настоящее время [3].

Исследование, проведенное в испанской провинции Галисия в 2002–2009 годы, позволило оценить риск развития рака легкого в группе обследованных, экспонированных в диапазоне от 50 Бк/м³ и более (относительный риск HR=1,2). Статистически значимости риска РЛ от уровня радона, однако, не выявлено, что интерпретируется авторами как результат повышенного среднего возраста обследованных по сравнению с группой контроля [4].

Исследование, проведенное в Ирландии в 1992–2013 гг. на основе 32~<000 измерений уровня радона в жилых помещениях, показало среднюю концентрацию от 21 до 338 Бк/м³, что соответствует эффективной дозе облучения 0,–13,3 мЗв/год. Расчетное число случаев рака легкого, вызванного воздействием радона, составило 15–239 случаев в год на миллион человек. Для населения Ирландии данная оценка соответствует 280 случаям РЛ из 2300 зарегистрированных в год, что составляет около 12% [13].

Исследования, проведенные в 6 регионах Трансильвании (Румыния), указывают на наличие выраженной линейной зависимости доза-эффект в случае хронического экспонирования радоном в бытовых условиях. Доля случаев РЛ, индуцированных радоном, оценивается в 9–28% [35].

Исследования, проведенные в Южной Корее, показали несколько меньшие значения дополнительного популяционного риска. Общий риск, связанный с воздействием радона в бытовых условиях, составил 6,6% для мужчин и 4,7% для женщин. Общая оценка радон-индуцированной смертности на 2013 год составила 1039 случаев [20].

Глобальные исследования. В большом мета-анализе, включившем в себя результаты 60 работ, была получена нелинейная зависимость риска РЛ от уровня радона. Отношение шансов составило 1,11 и 1,21 для концентраций радона 100 и 200 Бк/м³ соответственно в сравнении с наименьшими зафиксированными уровнями радона. Также в работе подтверждается вывод о значительно более высоком риске радона в условиях производственного экспонирования, в то же время в этих случаях уровень радона во много раз превышает уровень бытового облучения [12].

Оценка глобального риска воздействия радона проведена исследователями из Канады на основе данных 2012 года о радон-индуцированных случаях РЛ в разных странах. Дополнительный популяционный риск воздействия радона варьирует от 4,2% в Японии до 29,3% в Армении, медианная оценка для 66 стран составила 16,5%. Всего по итогам 2012 года число смертей от радон-индуцированного рака легкого составило 226~<057 [14]. В то же время оценка, сделанная на примере Канады, показала, что снижение уровня радона на 50% предотвратит 681 смертельный случай (из общего числа среднегодовых случаев смертности от радон-индуцированного рака легкого — 3200), что соответствует 15~<445 дополнительным «годам жизни без инвалидности (QALY)» [15].

Сопоставление риска развития мелкоклеточного и немелкоклеточного РЛ, выполненное в форме систематического обзора 16 публикаций по данной теме, показало наличие выраженной корреляции между воздействием радона в бытовых условиях и обоими типами РЛ. Отмечаются также несколько повышенные показатели риска для мелкоклеточной формы РЛ [28].

Сравнение разных моделей риска. В исследовании, проведенном на основе материалов исследований профессиональных и резидентных экспонированных радонном групп людей, средний пожизненный риск развития радон-индуцированного РЛ составил 2,98–6,55% для мужчин курильщиков и 0,19–0,42% для не куривших мужчин, на основе модели, предусматривающей мультипликативное увеличение эффектов радона и курения. При этом прекращение курения после 50 лет снижает радоновый риск на половину, а снижение уровня радона в домах также снижает риск на треть. Таким образом, оптимальной стратегией можно считать одновременное снижение уровня радона и отказ от курения [18]. В обзорной работе, посвященной сравнению нескольких основных моделей риска развития РЛ при воздействии радона в бытовых условиях, сделан вывод о том, что оценка пожизненного риска EPA/BEIR IV (биологические эффекты воздействия радона) predлагает средние значения риска в сравнении с моделью для европейских шахтеров и оценкой риска проведенной для жителей Китая [6].

Сопутствующие радону и альтернативные генотоксиканты. В то же время в некоторых работах приводятся данные, указывающие на возможную недооценку ряда других факторов, способствующих развитию РЛ. Например, в работе Сао и др. приведена оценка риска РЛ в ответ на воздействие выбросов двигателей внутреннего сгорания, использующих дизельное топливо. В результате сделан вывод о возможном снижении числа случаев радон-индуцированных случаев РЛ на 9–26% [5].

В исследовании Mitchell и др. была проведена одна из первых попыток оценить радиационную нагрузку новых источников сланцевого газа и их вклад в заболеваемость РЛ. Несмотря на относительно высокое среднее содержание радона в газе — 1983 Бк/м³, средневзвешенное дополнительное облучение составляет 1,2 Бк/м³, что соответствует примерно 1% средней дозы радонового облучения. Учитывая естественное снижение содержания радона при хранении газа в резервуарах, подобный источник не будет вносить значимого изменения в заболеваемость РЛ [24].

Гематологические онкопатологии

Помимо главной мишени воздействия радона — ткани легких, уже около 25 лет рассматривается гипотеза возможного воздействия радона на клетки красного костного мозга, что может способствовать развитию детской лейкемии или рака ЦНС. Известно, что интенсивное радиационное воздействие является выраженным фактором риска данных патологий, но относительно резидентного воздействия радона не существует единого мнения. Дозиметрические модели свидетельствуют в пользу того, что радон может приносить существенную дозовую нагрузку в облучение костного мозга и лимфоцитов в трахеобронхиальном эпителии, что может быть причиной развития гематологических онкопатологий.

В обширном ретроспективном исследовании, проведенном в Норвегии и охватывающем полную базу данных о случаях онкопатологии в регионе Осло в 1967–2009 годах, общее количество случаев лейкемии составило 437, и еще 427 случаев рака ЦНС. В результате был сделан вывод об отсутствии корреляции между уровнем радона и частотой лейкемий, незначительно был увеличен риск рака ЦНС [10].

Исследования, проведенные во Франции, также не показали выраженной взаимосвязи между случаями острой детской лейкемии и показателями естественного радиационного фона, включая радон и гамма-радиацию. Общий период наблюдений — 1990–2009 годы, количество случаев заболевания — 9056 [11].

Исследования, проведенные в США (штат Техас), включающие информацию о случаях детской лимфомы за 1995–

2011 годы, также не показали выраженной взаимосвязи между заболеванием и уровнем радона [27].

В то же время в исследовании заболеваемости хронической лимфоцитарной лейкемией (ХЛЛ) в США был проведен анализ взаимосвязи заболеваемости с показателями радона в бытовых условиях. Исследование включает 478 районов страны. После внесения коррекции на уровень УФ-излучения, которое является фактором риска для данного заболевания, была установлена строгая корреляция между ХЛЛ и радоном среди мужчин и женщин и в общей выборке [26]. Схожее ретроспективное исследование, проведенное в США по материалам заболеваемости ХЛЛ в период 2007–2011 гг., также показало выраженную взаимосвязь данной патологии с уровнем резидентного облучения радоном для обоих полов и разных этнических групп [32].

В другом обширном исследовании, включавшем данные о гематологических онкопатологиях среди 140–652 обследованных, проживающих в 20 штатах США в период с 1992 года, общее число зарегистрированных патологий составило 3019. В результате было показано, что жители районов с наибольшей средней концентрацией радона (более 148 Бк/м³) имеют больший риск развития гематологического рака в сравнении с обследованными, характеризующимися более низким уровнем радона (менее 74 Бк/м³) [34].

Другие онкопатологии

В качестве возможных отдаленных последствий резидентного воздействия радона также рассматриваются и другие онкопатологии. В регионе Галисия (Испания) проводились исследования заболеваемости раком пищевода и раком мозга. Была установлена статистически значимая взаимосвязь между вероятностью развития рака пищевода у мужчин, но не у женщин [29]. Исследование заболеваемостью раком мозга, проведенное в этом регионе на основе данных о заболеваемости в период 1999–2008 годы, выявило значительную корреляцию между смертностью от заболевания и уровнем радона в жилых помещениях. Вероятность развития рака увеличивалась с ростом среднего уровня радона у мужчин и в еще большей степени у женщин (коэффициент корреляции Спирмена 0,286 и 0,509 соответственно) [30].

В мета-анализе, посвященном орофарингеальному раку, был проведен анализ 13 когортных исследований, включавших выборки, подверженные воздействию радона как в бытовых, так и в производственных помещениях. В большинстве исследований не было показано ассоциаций уровня смертности от орофарингеального рака, как в выборках шахтеров, так и в общей выборке [31].

В исследовании бокового амиотрофического склероза в США была высказана гипотеза о возможном влиянии

радона на смертность от подобных болезней моторных нейронов. В результате не было выявлено зависимости от уровня радона, но выявлена зависимость от факта использования воды из скважин, предполагается, что в данном случае ведущую роль играют факторы бактериальной природы, прежде всего бактерии рода *Legionella* [33].

Исследование, проведенное в Швейцарии, показало значительный вклад радона в смертность от рака кожи, включая злокачественную меланому. В работе было рассмотрено 2989 случаев рака кожи, включая 1900 случаев меланомы у всего взрослого населения Швейцарии. Отношение опасности (HR – относительный риск в каждый момент времени) составил 1,16 на каждые 100 Бк/м³ для радона и 1,11 на каждый Вт/м² УФ-излучения [36].

Исследования рака груди, проведенные на выборке медицинских работников в США, включавшей 112639 участников в 1989–2013 годах, не выявили значимой корреляции с уровнем радона в жилых помещениях. В то же время для женщин, включенных в верхний квинтиль, по показателю содержания радона, показатель относительной опасности составил 1,38 [38].

Генетические изменения, ассоциированные с радон-индуцированным раком легкого

Высказываются предположения, что радон при хроническом экспонировании, среди прочего, способен увеличивать частоту генетических нарушений, включая мутации и нарушение характера метилирования генов. Для того, чтобы отделить фактор радона в бытовых условиях от фактора курения, проводился анализ случаев заболевания раком легкого среди никогда не куривших людей. Предполагается, что в данной выборке ведущую роль в канцерогенезе играет именно радон. Исследование генетических изменений методами «секвенирования нового поколения» (NGS), показало изменения в ряде генов: *EGFR*, *TP53*, *NKX2.1*, *PTEN*, *CHD7*, *DDR2*, *MLL3*, *CHD5*, *FAT1*,

DUSP27 [7]. В последующей работе авторы из Южной Кореи провели сравнение 2 групп не-курильщиков, больных раком легкого, с высоким и низким содержанием радона в воздухе жилых помещений. В результате NGS-секвенирования были идентифицированы генетические варианты — экзонные мутации, характерные для больных и здоровых обследованных, экспонированных высокими дозами радона в бытовых условиях: *CHD4 rs74790047*, *TSC2 rs2121870*, и *AR rs66766408* [8].

Заключение

Несмотря на то, что проблема радона изучается уже длительное время, во многом остается невыясненным характер длительного низкодозового воздействия радона на организм человека. Проведенный анализ недавних исследований в области изучения ассоциированных с радоном заболеваний позволяет отметить наличие убедительных свидетельств в пользу наличия зависимости резидентного облучения радоном и его ДПР и риска онкопатологий. Более 220~<000 смертных случаев по всему миру, вызванных самой распространенной патологией — раком легкого; также следует учесть вклад гематологических и, возможно, некоторых других типов онкопатологий. Ассоциации радона с другими типами рака также необходимо учитывать при расчете общей заболеваемости и гигиенической оценки опасности радона для человека, на сегодняшний день в качестве наиболее вероятных ассоциаций с радоном можно рассматривать лимфомы, рак мозга, орофарингеальный рак и меланомы.

Другим важным следствием обширных эпидемиологических исследований можно считать рассчитанные модели риска, которые свидетельствуют о возможности значительного снижения социальных потерь от радон-индуцированных заболеваний. Развитие программ ремедиации жилых помещений, характеризующихся повышенным уровнем радона и просвещение домовладельцев в вопросах радоновой безопасности, имеет значительный потенциал по снижению смертности и повышению качества жизни.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ajrouche R. [и др.]. Quantitative Health Risk Assessment of Indoor Radon: A Systematic Review // *Radiation Protection Dosimetry*. 2017. № 1–2 (177). С. 69–77.
2. Al-arydah M. Estimating the burden of lung cancer and the efficiency of home radon mitigation systems in some Canadian provinces // *Science of The Total Environment*. 2018. (626). С. 287–306.
3. Axelsson G., Andersson E. M., Barregard L. Lung cancer risk from radon exposure in dwellings in Sweden: how many cases can be prevented if radon levels are lowered? // *Cancer Causes & Control*. 2015. № 4 (26). С. 541–547.
4. Barbosa-Lorenzo R. [и др.]. Residential radon and lung cancer: a cohort study in Galicia, Spain // *Cadernos de Saúde Pública*. 2017. № 6 (33).
5. Cao X. [и др.]. Radon-induced lung cancer deaths may be overestimated due to failure to account for confounding by exposure to diesel engine exhaust in BEIR VI miner studies // *PLOS ONE*. 2017. № 9 (12). С. e0184298.
6. Chen J. Lifetime lung cancer risks associated with indoor radon exposure based on various radon risk models for Canadian population // *Radiation Protection Dosimetry*. 2017. № 1–3 (173). С. 252–258.
7. Choi J. R. [и др.]. Novel Genetic Associations Between Lung Cancer and Indoor Radon Exposure // *Journal of Cancer Prevention*. 2017. № 4 (22). С. 234–240.

8. Choi J. R. [и др.]. Radon Exposure-induced Genetic Variations in Lung Cancers among Never Smokers // *Journal of Korean Medical Science*. 2018. № 29 (33).
9. Darby S. [и др.]. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies // *BMJ*. 2005. № 7485 (330). С. 223.
10. Del Risco Kollerud R., Blaasaas K. G., Claussen B. Risk of leukaemia or cancer in the central nervous system among children living in an area with high indoor radon concentrations: results from a cohort study in Norway // *British Journal of Cancer*. 2014. № 7 (111). С. 1413–1420.
11. Demoury C. [и др.]. Residential Exposure to Natural Background Radiation and Risk of Childhood Acute Leukemia in France, 1990–2009 // *Environmental Health Perspectives*. 2017. № 4 (125). С. 714–720.
12. Duan P. [и др.]. Nonlinear dose–response relationship between radon exposure and the risk of lung cancer: evidence from a meta-analysis of published observational studies // *European Journal of Cancer Prevention*. 2015. № 4 (24). С. 267–277.
13. Elío J. [и др.]. Estimation of residential radon exposure and definition of Radon Priority Areas based on expected lung cancer incidence // *Environment International*. 2018. (114). С. 69–76.
14. Gaskin J. [и др.]. Global Estimate of Lung Cancer Mortality Attributable to Residential Radon // *Environmental Health Perspectives*. 2018. № 5 (126). С. 057009.
15. Gaskin J. [и др.]. Utility gains from reductions in the modifiable burden of lung cancer attributable to residential radon in Canada // *Canadian Journal of Public Health*. 2018. № 4 (109). С. 598–609.
16. Gawęłek E., Drozdowska B., Fuchs A. Radon as a risk factor of lung cancer // *Przegląd Epidemiologiczny*. 2017. № 1 (71). С. 90–98.
17. Grundy A. [и др.]. Lung cancer incidence attributable to residential radon exposure in Alberta in 2012 // *CMAJ Open*. 2017. № 2 (5). С. E529–E534.
18. Hunter N. [и др.]. Calculation of lifetime lung cancer risks associated with radon exposure, based on various models and exposure scenarios // *Journal of Radiological Protection*. 2015. № 3 (35). С. 539–555.
19. Khan S. M. [и др.]. Radon, an invisible killer in Canadian homes: perceptions of Ottawa-Gatineau residents // *Canadian Journal of Public Health*. 2018.
20. Kim J.-H., Ha M. The Disease Burden of Lung Cancer Attributable to Residential Radon Exposure in Korean Homes // *Journal of Korean Medical Science*. 2018. № 29 (33).
21. Langlois P. H. [и др.]. Residential radon and birth defects: A population-based assessment: Radon and Birth Defects // *Birth Defects Research Part A: Clinical and Molecular Teratology*. 2016. № 1 (106). С. 5–15.
22. López-Abente G. [и др.]. Residential radon and cancer mortality in Galicia, Spain // *Science of The Total Environment*. 2018. (610–611). С. 1125–1132.
23. Lubin J. H., Boice J. D. Lung cancer risk from residential radon: meta-analysis of eight epidemiologic studies // *Journal of the National Cancer Institute*. 1997. № 1 (89). С. 49–57.
24. Mitchell A. L., Griffin W. M., Casman E. A. Lung Cancer Risk from Radon in Marcellus Shale Gas in Northeast U.S. Homes: Radon-Related Lung Cancer Risk from Marcellus Shale Natural Gas // *Risk Analysis*. 2016. № 11 (36). С. 2105–2119.
25. Noh J. [и др.]. Residential radon and environmental burden of disease among Non-smokers // *Annals of Occupational and Environmental Medicine*. 2016. № 1 (28).
26. Oancea S. C. [и др.]. County level incidence rates of chronic lymphocytic leukemia are associated with residential radon levels // *Future Oncology*. 2017. № 21 (13). С. 1873–1881.
27. Peckham E. C. [и др.]. Residential Radon Exposure and Incidence of Childhood Lymphoma in Texas, 1995–2011 // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2015. № 10 (12). С. 12110–12126.
28. Rodríguez-Martínez Á. [и др.]. Residential radon and small cell lung cancer. A systematic review // *Cancer Letters*. 2018. (426). С. 57–62.
29. Ruano-Ravina A. [и др.]. Residential radon exposure and esophageal cancer. An ecological study from an area with high indoor radon concentration (Galicia, Spain) // *International Journal of Radiation Biology*. 2014. № 4 (90). С. 299–305.
30. Ruano-Ravina A. [и др.]. Residential radon exposure and brain cancer: an ecological study in a radon prone area (Galicia, Spain) // *Scientific Reports*. 2017. № 1 (7).
31. Salgado-Espinosa T., Barros-Dios J.M., Ruano-Ravina A. Radon exposure and oropharyngeal cancer risk // *Cancer Letters*. 2015. № 1 (369). С. 45–49.
32. Schwartz G. G., Klug M. G. Incidence rates of chronic lymphocytic leukemia in US states are associated with residential radon levels // *Future Oncology*. 2016. № 2 (12). С. 165–174.
33. Schwartz G. G., Klug M. G. Motor neuron disease mortality rates in U.S. states are associated with well water use // *Amyotrophic Lateral Sclerosis & Frontotemporal Degeneration*. 2016. № 7–8 (17). С. 528–534.
34. Teras L. R. [и др.]. Residential radon exposure and risk of incident hematologic malignancies in the Cancer Prevention Study-II Nutrition Cohort // *Environmental Research*. 2016. (148). С. 46–54.
35. Truta L. A., Hofmann W., Cosma C. Lung cancer risk due to residential radon exposures: estimation and prevention // *Radiation Protection Dosimetry*. 2014. № 1–3 (160). С. 112–116.
36. Vienneau D. [и др.]. Effects of Radon and UV Exposure on Skin Cancer Mortality in Switzerland // *Environmental Health Perspectives*. 2017. № 6 (125). С. 067009.
37. Vogelntanz-Holm N., Schwartz G. G. Radon and lung cancer: What does the public really know? // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2018. (192). С. 26–31.
38. VoPham T. [и др.]. Environmental radon exposure and breast cancer risk in the Nurses' Health Study II // *Environmental Health*. 2017. № 1 (16).
39. Health Effects of Exposure to Radon: BEIR VI Washington, D.C.: National Academies Press, 1999.