

*На правах рукописи*



Семченко Максим Игоревич

**Оценка радиационной опасности среды помещений от  
радонового облучения на примере г.Владимира**

03.02.08 – Экология (биология)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата биологических наук

Владимир – 2018г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

**Научный руководитель:** **Ширкин Леонид Алексеевич**  
кандидат химических наук, доцент

**Официальные оппоненты:** **Щур Александр Васильевич**  
доктор биологических наук, доцент,  
Государственное учреждение высшего  
профессионального образования «Белорусско-  
Российский университет», заведующий кафедрой  
безопасности жизнедеятельности

**Липатов Денис Николаевич**  
кандидат биологических наук, Федеральное  
государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования «Московский  
государственный университет имени М.В.  
Ломоносова», старший преподаватель кафедры  
радиоэкологии и экотоксикологии

**Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Российский университет дружбы  
народов»

Защита диссертации состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г. в \_\_\_ час. \_\_\_ мин. на заседании диссертационного совета Д.212.025.07 при ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87, корп. 1, ауд. 335.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ВлГУ и на сайте [diss.vlsu.ru](http://diss.vlsu.ru).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, можно присылать по адресу 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87, корп. 1, кафедра биологии и экологии.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат биологических наук



Кулагина Екатерина Юрьевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Радон является доминирующим источником облучения населения, его вклад в суммарную дозу составляет более 60 %. Тот факт, что радон является вторым по значимости после курения фактором риска рака легкого, определяет высокую значимость проблемы обеспечения радонобезопасности населения, решение которой должно базироваться на прочном фундаменте количественных показателей радиологического риска (ICRP Publication 115, 2010). Существуют проблемы определения радиационной опасности радонового облучения на территории населенных пунктов, регионов, связанные: с оценками пространственно-временных закономерностей распределения радона на территории города, т.к. геолого-геофизические характеристики территорий большинства городов изучены недостаточно; с вариабельностью объемной активности радона, которая обуславливает высокую степень неоднородности распределения уровней облучения; с неопределенностями в оценках экспозиции населения; с появлением в публикациях МКРЗ уточненных в большую сторону рекомендуемых значений коэффициентов риска; с применением новых подходов регулирования радоновой проблемы и количественной оценки радиационного риска и ущерба, базирующихся на прямых эпидемиологических данных по облучению радоном и его короткоживущими ДПР – дочерними продуктами распада (ICRP Publication 103, 2007; ICRP Publication 115, 2010; ICRP Publication 126, 2014).

Вопросы выработки единой методики оценки риска для здоровья населения при облучении радоном и его ДПР, а также ее адаптации для использования с российскими данными остаются актуальными последние 20 лет (Конonenko Д.В., 2017). Подходы к оценкам радиационного риска и ущерба от источников ионизирующего излучения природного происхождения имеют свою специфику, поэтому для них необходимо разрабатывать специальные методы количественной оценки последствий облучения (Репин В.С., 2012).

**Цель и задачи исследований.** Целью исследования явилась количественная оценка радиационной опасности среды помещений для здоровья населения от радонового облучения в зданиях на примере территории г. Владимира.

Поставленная цель определила следующие задачи:

1. Провести измерение и проанализировать статистику распределения объёмной активности радона-222 и ДПР в воздухе помещений первых этажей зданий на территории города.
2. Провести оценку статистических параметров распределения дозовых

нагрузок и параметров зависимости «доза – ответ».

3. Рассчитать и оценить экспозиции населения по скрытой энергии  $\alpha$ -излучения.

4. Определить радиационный риск для здоровья населения от радонового облучения.

5. Оценить опасность среды помещений в зданиях г. Владимира от радонового облучения на основе оценок радиационного риска и ущерба.

**Научная новизна работы.** В работе с позиций методологии анализа риска для здоровья, реализованного с применением принципов, методов и критериев эпидемиологии, медицинской демографии и радиационной безопасности, впервые:

1. На основе многолетних замеров впервые установлены статистические параметры распределения значений эквивалентной равновесной объёмной активности (ЭРОА) радона в зданиях на территории города в соответствии с обобщенной аналитической моделью класса экспоненциальных распределений.

2. Оценены вероятности регистрации в экспонируемой популяции высоких ( $\geq 10$  мЗв/год), средних (5 – 10 мЗв/год), низких (0,5 – 5 мЗв/год) и фоновых ( $\leq 0,5$  мЗв/год) уровней радонового облучения.

3. Оценены параметры экспозиции по скрытой энергии  $\alpha$ -излучения и численности субгрупп экспонированного населения для выделенных в сценарии экспозиции условий радонового облучения с высоким, средним, низким и фоновым (минимальным) уровнем дозовой нагрузки.

4. В соответствии с подходами, описанными в Публикации 103 МКРЗ, выполнена трехуровневая оценка дополнительных пожизненных абсолютных номинальных рисков радон-индуцированного рака легкого с учетом потерянных лет жизни, летальности, индукции злокачественных новообразований.

5. Представлена характеристика радиационной опасности среды помещений от радонового облучения посредством оценок популяционного радиационного риска, натуральной и экономической оценок радиационного ущерба для здоровья городского населения.

**Практическая значимость работы.** Результаты исследования относятся к проблеме оценки воздействия малых доз постоянного природного (радонового) облучения на здоровье населения и направлены на решение задач, связанных с оценкой состояния радиационной безопасности в организации и в регионе.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Методический подход к описанию статистики распределений для логарифмированных значений ЭРОА и эффективной дозы в помещениях зданий на территории города реализуется в соответствии с обобщенной аналитической моделью класса экспоненциальных распределений.

2. В качестве критерия выделения в сценарии экспозиции условий радонового облучения целесообразно использование показателя эффективной дозы.

3. При оценках радоновой экспозиции и численности экспонируемых субгрупп популяции для выделенных в сценарии экспозиции условий радонового облучения результативно использование статистических законов распределения ЭРОА и эффективной дозы.

4. Радон в домах увеличивает статистически значимо показатели риска и ущерба от заболевания раком легкого для всей популяции городского населения даже при низких уровнях объемной активности радона (ЭРОА < 74 Бк/м<sup>3</sup>).

**Апробация работы.** Основные научные и практические результаты диссертационной работы были доложены и обсуждены на:

- Научно-практической конференции с международным участием «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2017» г. Севастополь, 2017 г.;
- VIII Международной научно-практической конференции «ЭКОЛОГИЯ РЕЧНЫХ БАССЕЙНОВ» г. Суздаль, 2016 г.;
- заседаниях кафедры биологии и экологии ФГБОУ ВО ВлГУ.

По материалам диссертации опубликовано 5 работ.

**Объём и структура работы.** Диссертация изложена на \_\_\_ страницах машинописного текста, включает \_\_\_ таблиц и \_\_\_ рисунка. Работа состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы. Список литературы содержит \_\_\_ наименований работ отечественных и зарубежных авторов.

Автор выражает глубокую благодарность и признательность научному руководителю к.х.н, доценту Л.А. Ширкину за помощь в постановке научной темы, внимание, советы и помощь в работе над диссертацией, д.б.н, профессору Т.А. Трифоновой – за большую помощь в работе.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **Глава 1. Обзор литературы**

Представлены результаты анализа отечественной и зарубежной литературы, обосновывающие: 1) положение о том, что радиационная опасность радона для здоровья населения характеризуется не только радиационными и гигиеническими характеристиками радона, но и свойствами других потенциально вредных факторов или ситуаций, являющихся специфичными для исследуемой территории региона, города (Р 2.1.10.1920-04; МУ 2.6.1.038-2015; Демин В.Ф. и др., 2014; Микляев П.С., 2015); 2) правомерность применения показателей радиационного риска и ущерба как интегральных критериев оценки радиационной опасности среды помещений от радонового облучения в организации и в регионе (СП 2.6.1.2612-10; МАГАТЭ, 2011; Репин Л.В., 2011; Киселев С.М., Жуковский М.В., 2014); 3) необходимость выработки единой модели оценки риска для здоровья населения при облучении радоном и его короткоживущими ДПР, а также её адаптации для использования с российскими данными (ВОЗ, 2011; Репин В.С., 2012, Кононенко Д.В., 2017).

### **Глава 2. Объекты и методы исследований**

Объект исследования – обобщенная популяция жителей г. Владимир численностью 350 тыс. чел. (на 2014 г.). Город расположен на границе двух природных районов: к северу от Владимира простирается возвышенное безлесное Владимирское Ополье, к югу – лесная и болотистая Мещёрская низменность. Рельеф города сложный. Климат умеренно-континентальный. Особенностью популяции населения г. Владимир является то, что сила действия факторов образа жизни, среды обитания, наследственности, качества медико-санитарной помощи носит неизменный на протяжении последних лет характер, а медико-демографические и эпидемиологические показатели популяции обнаруживают боковой тренд и незначительно колеблются около установившихся после 2008 года уровней. Это позволяет минимизировать неопределенности в эпидемиологических оценках радиационной опасности среды помещений для здоровья населения от радонового облучения в зданиях на территории г. Владимира.

Предмет исследования – радиационная опасность среды помещений для здоровья населения от радонового облучения в зданиях на территории г. Владимира. В целом этапы настоящего исследования соответствуют рекомендациям Р 2.1.10.1920-04, ICRP Publication 103, ICRP Publication 115, ICRP Publication 126, а основой настоящего исследования явилась методология анализа риска для

здоровья, реализованного с применением принципов, методов и критериев эпидемиологии, медицинской демографии и радиационной безопасности. Оценка риска для здоровья включала этапы: 1 -идентификации опасности, 2 - оценки зависимости «доза–ответ», 3 - оценки экспозиции, 4 - характеристики риска, а заключительным этапом анализа является 5 - характеристика потенциальной опасности среды помещений в зданиях города Владимира от радонового облучения, который по своему содержанию смыкается с этапом сравнительной характеристики рисков, реализуемым на стадии управления риском.

Единица исследования – данные измерений ЭРОА радона в помещениях на первых, подвальных и полуподвальных этажах зданий различного назначения на территории города. Объёмную активность радона измеряли радиометром радона (марки РРА-01М-01 «Альфарад»), измерительным комплексом для мониторинга радона «Камера-01», радиометром радона РРА-01М-03, пробоотборным устройством ПОУ-04.

Проанализированы результаты около 200 замеров по данным обследований помещений, расположенных в панельных, кирпичных и одноэтажных деревянных зданиях, на территории 3 административных районов города Владимира. Также в выборку были включены данные более 300 замеров, проводимых в ФГУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии во Владимирской области», полученных в 2009 – 2015 гг. в различных точках города Владимира. Показатели ЭРОА и эффективной дозы оценивались по объединенной выборке в соответствии с МУ 2.6.1.2838-11, МУ 2.6.1.1088-02, СП 2.6.1.2612-10. Предложен методический подход, который заключается в единообразном описании и способе установления кривых плотности распределения вероятности для показателей ЭРОА радона и эффективной дозы, включающий: 1) построение гистограмм распределений для логарифмированных значений исследуемых показателей; 2) аппроксимацию посредством обобщенной аналитической модели класса экспоненциальных распределений как наиболее универсальной формулы, в которой логнормальное распределение является частным случаем; 3) количественную оценку трех критериев, характеризующих распределение. Заключительный этап анализа представляет собой характеристику опасности среды помещений в зданиях города Владимира от радонового облучения, произведенную на основе критериев натурального и экономического ущерба. Суммарные экономические потери от дополнительной смертности в результате индуцированного радоном рака легкого для г. Владимир оценивались через показатели потерь жизненного потенциала от преждевременной смертности и годового валового

регионального продукта на душу населения (Методика расчета медико-социальной и экономической эффективности... Утв. Минздравсоцразвития РФ 14.03.2005; МР 5.1.0029-11).

### **Глава 3. Оценка пространственно-временных закономерностей распределения радона на территории города**

**Идентификация опасности.** На этапе «идентификация опасности» на основе данных замеров объемной активности радона, проведенных за 7 летний период в зданиях, отобранных методом простого случайного отбора, получены параметры статистического закона распределения значений ЭРОА. Оценивалась вероятность регистрации значений ЭРОА радона в воздухе помещений и на территории г. Владимира.

В целях оценки радиационного риска и ущерба актуальным является разработка и применение единого методического подхода к описанию статистики распределения ЭРОА радона и эффективной дозы на основе обобщенной аналитической модели класса экспоненциальных распределений, так как необходимы: 1) учет пространственно-временных закономерностей распределения радона на территории города, т.к. геолого-геофизические характеристики территорий большинства городов изучены недостаточно (Трифорова Т.А., Ширкин Л.А., 2004, 2010); 2) учет отклонений статистики от логнормального закона распределения, связанных с возможной неравнозначностью воздействия на эксхалляцию радона специфичных для исследуемой территории факторов (геолого-геофизических, климатических, условий застройки и др.); 3) исследование полноты и достоверности имеющихся данных об уровнях загрязнения радоном среды помещений (Р 2.1.10.1920-04).

На этапе «идентификация опасности» на основе данных замеров установлены параметры для распределения значений ЭРОА в воздухе помещений в зданиях на территории г. Владимир (рис. 1).

Экспериментальные данные удовлетворительно аппроксимируется функцией, относящейся к классу экспоненциальных распределений:

$$p(A) = \frac{0,364}{A} \exp\left(-\left|\frac{\ln(A) - 2,873}{1,523}\right|^{3,563}\right)$$

где  $p(A)$  – плотность распределения вероятности;  $A$  – значения ЭРОА, Бк/м<sup>3</sup>. Для поиска коэффициентов в функции был применен многофакторный регрессионный анализ с применением метода наименьших квадратов и оптимизацией в среде Mathcad на основе автоматического перебора алгоритмов



Interior-Point (метод барьеров) и Active-Set. Точность решений контролировалась посредством коэффициента детерминации.

Получена кривая, где показатель степени составляет 3,653, который отличается от логнормального распределения ( $\alpha = 2$ ), что указывает на неравнозначность факторов эксхалиции радона. Статистика распределения значений ЭРОА определяет количественные показатели, полученные на всех четырех этапах оценки риска для здоровья, которые обобщены и приведены с оценкой неопределенностей, соответствующих границам 95% доверительного интервала (табл. 1, 2).

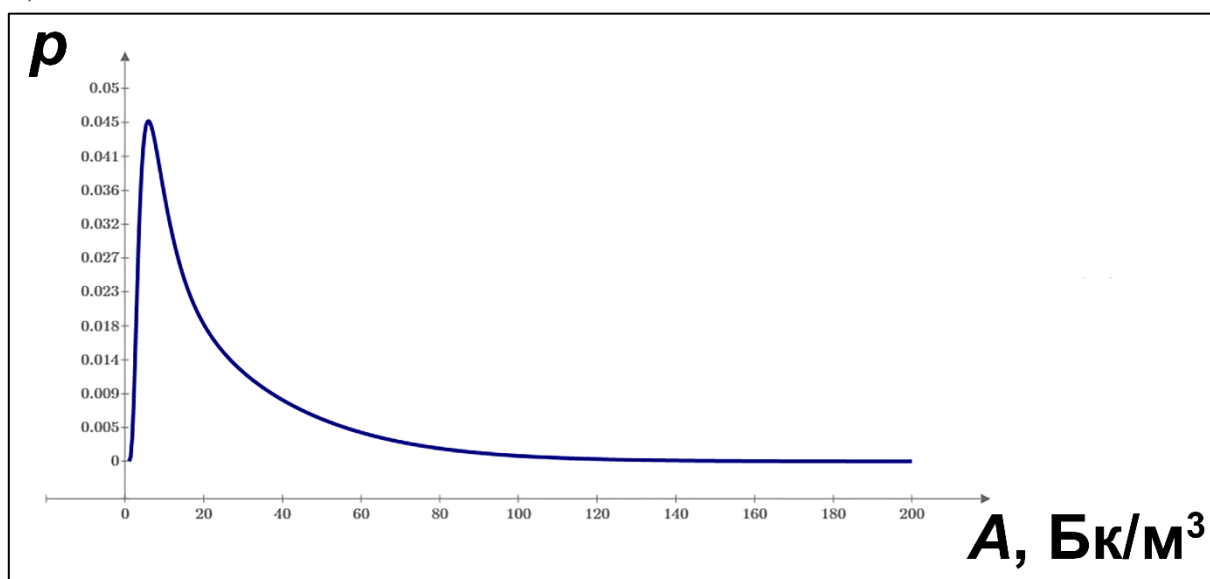


Рис. 1. Кривая плотности распределения вероятности  $p(A)$  для ЭРОА радона-222 в зданиях на территории г. Владимир

Распределение значений ЭРОА изотопов радона имеет вид ассиметричной кривой с крутым подъемом и очень пологим спадом, который определяет вероятность регистрации умеренных и высоких значений ЭРОА в воздухе помещений г. Владимир. Таким образом этап идентификации опасности сводится к обобщению имеющихся фактических данных об уровнях загрязнения радоном воздуха помещений на территории г. Владимир на основе аналитической модели класса экспоненциальных распределений.

**Оценка зависимости «доза – ответ».** Оценка эффективных доз от облучения населения радоном не является обязательной процедурой, так как оценка рисков и ущерба осуществляется через экспозицию по скрытой энергии  $\alpha$ -излучения, однако в настоящем исследовании эффективная доза от радонового облучения предлагается использовать в качестве условного

критерия выделения в сценарии экспозиции условий радонового облучения населения со средним (5 – 10 мЗв/год) и высоким уровнем ( $\geq 10$  мЗв/год), с низким уровнем (0,5 – 5 мЗв/год) и с фоновым уровнем дозовой нагрузки ( $\leq 0,5$  мЗв/год). Целесообразность использования эффективной дозы от радонового облучения в качестве критерия выделения в сценарии экспозиции условий радонового облучения экспонируемой популяции обусловлена рядом факторов: 1) согласно МКРЗ система защиты, включающая в себя эффективную дозу, остается наиболее приемлемым подходом для защиты от облучения и источников облучения (ICRP Publication 115, 2010); 2) значения эффективных доз облучения от природных источников излучения характеризуют степень радиационной безопасности населения (СП 2.6.1.2612-10); 3) уровни облучения населения изотопами радона определяют радиационную обстановку в жилых, общественных и других зданиях (СП 2.6.1.2612-10), в которых люди проводят большую часть времени (МУ 2.6.1.1088-02); 4) вариабельность объемной активности радона обуславливает высокую степень неоднородности распределения уровней облучения (ICRP Publication 126, 2014); 5) основная дозиметрическая величина, эффективная доза, устанавливает дозу для референтного индивида с характеристиками, усредненными по возрастам и обоим полам и при облучении от радона рассматривается как мера, пропорциональная радиационному риску / ущербу (ICRP Publication 115, 2010).

На этапе оценки зависимости «доза – ответ» на основе данных ЭРОА рассчитаны значения эффективной дозы и установлены параметры для распределения значений эффективной дозы радонового облучения в соответствии с обобщенной аналитической модели класса экспоненциальных распределений. Переход от ЭРОА к эффективной дозе осуществлялся в соответствии с коэффициентом, равным 9 нЗв на 1 Бк·ч·м<sup>-3</sup> ЭРОА радона (МУ 2.6.1.1088-02, ICRP Publication 115, 2010). Полученная кривая в среде Mathcad удовлетворительно аппроксимируется функцией с показателем степени равным 2,412:

$$p(E) = \frac{0,406}{E} \exp\left(-\left|\frac{\ln(E) + 6,694}{1,388}\right|^{2,412}\right)$$

где  $p(E)$  – плотность распределения вероятности;  $E$  – значения эффективной дозы, Зв/год.

Для экспонируемой популяции, т.е. популяции проживающих и работающих на первых этажах зданий, путем интегрирования полученной функции плотности распределения вероятности в соответствующих диапазонах эффек-

тивных доз оценены вероятности регистрации средних и высоких – 6,1 %, низких – 74,9 %, а также вероятности регистрации фоновых уровней радонового облучения – 18,9 %.

**Оценка экспозиции.** На этапе оценки экспозиции проводится окончательное уточнение сценария воздействия, характеризующего путь (движение) радона от места его образования до точки воздействия на человека. Сценарий воздействия / облучения радоном – описание специфических условий экспозиции; совокупность фактов, предположений и заключений о воздействии оцениваемого вредного фактора. С учетом выбранного сценария осуществляется анализ имеющихся данных об уровнях воздействия радона на население. В сценарии облучения радоном оценки экспозиции приводятся для обобщенной популяции жителей, в которых не делается возрастных различий в облучении, т.к. доза облучения легких на единичную экспозицию относительно не чувствительна к возрасту (NRC, 1999; Marsh and Birchall, 2000; Kendall and Smith, 2005; Marsh et al., 2005;). Причина этого состоит в наличии конкурирующих факторов, действие которых имеет тенденцию взаимно компенсироваться.

Альфа-излучение, испускаемое смесью короткоживущих дочерних продуктов радона-222 при их полном распаде до свинца-210, выступает в сценарии экспозиции – в качестве опасного физического агента. Энергия, передаваемая  $\alpha$ -частицами, вносит основной вклад в радоновое облучение. Поэтому, согласно (ICRP Publication 115, 2010) в оценках экспозиции по скрытой энергии  $\alpha$ -излучения использовалась величина удельной потенциальной энергии  $\alpha$ -излучения дочерних продуктов радона на 1 Бк·м<sup>-3</sup> радона в равновесии, равная  $3,47 \cdot 10^4$  МэВ·м<sup>-3</sup> или  $5,56 \cdot 10^{-9}$  Дж·м<sup>-3</sup>. При этом в сценарии не учитывались: 1) другие природные источники облучения, т.к. их суммарный вклад в дозовую нагрузку существенно меньше радонового облучения (60 – 80 %); 2) влияние фактора табакокурения, т.к. это самостоятельный этиологический фактор, а данные о распространенности табакокурения среди различных половозрастных групп населения на регулярной основе в России не собираются (Кононенко Д.В., 2013).

Принято считать, что облучение радоном относится к ситуации существующего природного облучения, поскольку его источником являются неизменные концентрации естественных радионуклидов в земной коре (ICRP Publication 103, 2007; ICRP Publication 115, 2010). Однако, деятельность человека может создавать или изменять пути поступления радона, повышая его кон-

центрацию внутри помещений по сравнению с фоном на открытой местности. Поэтому принципы регулирования данной ситуации облучения базируются на установлении референтных уровней и применении принципа оптимизации при принятии и реализации мер защиты (ICRP Publication 103, 2007; ICRP Publication 126, 2014). На наш взгляд, с точки зрения обеспечения радиационной безопасности процедуры оценки экспозиции, радиационного риска для здоровья от облучения населения радоном должны проводиться на регулярной основе, независимо от того как соотносится концентрация радона в воздухе помещений с референтными уровнями или с нормативами, указанными в НРБ-99/2009.

Транспорт радона от мест эманирования реализуется с потоком воздуха через поры почвы (грунта), а накопление может наблюдаться в воздухе помещений на первых этажах зданий. Люди облучаются радоном в домах, на рабочих местах и в многофункциональных зданиях. Вследствие того, что радон является инертным газом, почти весь он после вдыхания в дальнейшем выдыхается. Однако большая часть дочерних продуктов радона после вдыхания отлагается в дыхательных путях легких.

Сценарий экспозиции включает один маршрут воздействия, в котором учитывается вдыхание воздуха как внутри помещений, так и в приземном слое атмосферного воздуха на открытой местности. Для расчетов экспозиции населения в соответствии с данными о среднемировых значениях ЭРОА изотопов радона в приземном слое атмосферного воздуха принимается равным  $6,5 \text{ Бк/м}^3$  (UNSCEAR, 2000). Вариабельность объемной активности радона обуславливает высокую степень неоднородности распределения экспозиций и уровней облучения, что делает оправданным в нашем исследовании выделение в сценарии экспозиции условий высокого, среднего, низкого и фонового уровней радонового облучения (табл. 1, п. 3).

На основе оценок средневзвешенных уровней ЭРОА согласно статистике распределения ЭРОА (табл. 1, п. 2), рассчитана экспозиция по скрытой энергии  $\alpha$ -излучения ( $P$ , Дж·ч·м<sup>-3</sup>/год) для выделенных в сценарии экспозиции условий радонового облучения:

$$P = 5,56 \cdot 10^{-9} \cdot 8800 \cdot (0,2 \cdot A_{ул} + 0,8 \cdot A_{здан})$$

где  $A_{ул}$ ,  $A_{здан}$  – ЭРОА изотопов радона в воздухе на открытой территории населенного пункта и в жилых и общественных зданиях соответственно.

Правомерность использования статистических законов распределения

ЭРОА и эффективной дозы в оценках экспозиции и численности экспонируемых субгрупп популяции обусловлена: 1) выраженной асимметричностью и островершинностью кривых распределений; 2) необходимостью минимизации неопределённостей в определении радоновой экспозиции посредством анализа статистических законов распределения.

Ингаляция – основной путь поступления радона, при этом его дочерние продукты могут являться причиной рака легкого, т.к. из-за относительно коротких периодов полураспада (менее 30 мин.) дочерние продукты радона распадаются преимущественно в легких до выведения. Для других последствий в настоящее время нет убедительных данных о связи заболеваемости с облучением радоном и его ДПП (ICRP Publication 115, 2010). Таким образом оценке подлежат *экспозиция и риск* радиационно-индуцированного рака легкого как результат *изолированного воздействия* радонового облучения.

Рассчитывались как среднегодовая, так и накопленная к возрасту 70 лет (средней продолжительности жизни населения в г. Владимир) экспозиция (табл. 1, п.п. 4 – 5). При этом в расчетах было сделано два допущения: 1) об отсутствии миграции населения на протяжении всей жизни; 2) о постоянстве уровня ЭРОА радона в жилище на протяжении всей жизни. Причина, по которой необходимо было принять эти допущения в том, что полную и корректную реконструкцию условий облучения на протяжении столь длительного срока практически невозможно провести даже в условиях строгого эпидемиологического исследования (Кононенко Д.В., 2014).

В частоте воздействия учитывался тот факт, что помещениях люди проводят большую часть времени – около 80 % (UNSCEAR, 2000). В Форме федерального статистического наблюдения № 4-ДОЗ для населения РФ относительное время пребывания в помещениях также принято равным 0,8 (МР 2.6.1.0088-14).

Оценка экспозиции осуществлялась для экспонируемой популяции и остального постоянно проживающего городского населения. При этом численность экспонируемой популяции, оценивается величиной 22,1 % городского населения или 74,3 тыс. человек. На основе оценок вероятности регистрации эффективных доз радонового облучения рассчитаны численности субгрупп экспонированного населения для выделенных в сценарии экспозиции условий высокого, среднего, низкого и фонового уровней радонового облучения (табл. 1, п. 1).

Оцененные параметры экспозиции относятся исключительно к городу

Владимир, на территории которого насчитывается около 2,8 тысяч зданий. Необходимый объем выборки зданий определен на основе допустимой ошибки при выборочном наблюдении исходя из заданной вероятности, гарантирующей допустимую величину уровня ошибки (с учетом способа организации наблюдения). При уровне надежности 95 %, доли со средним и высоким уровнем облучения – 6,2 %, и предельной ошибкой выборки 5 % получается, что минимально необходимое для обследования количество зданий, отобранных методом простого случайного отбора, должно составлять 86 зданий или 3,2 % от общего числа зданий на территории г. Владимир. В настоящем исследовании общий объем выборки составил около 180 обследованных зданий.

Полученные результаты по пожизненной экспозиции характеризуют постоянное радоновое облучение населения в будущий период времени в течение предстоящей жизни с оценкой риска на момент достижения возраста 70 лет, соответствующий среднему возрасту на момент постановки диагноза – злокачественные новообразования трахеи, бронхов и легкого (С33, С34).

#### **Глава 4. Оценка и анализ риска радонового облучения для здоровья населения**

**Характеристика риска.** Оценка радиационного риска для здоровья населения при облучении радоном основывалась нами на следующих положениях:

1) существует необходимость выработки методики оценки радиационного риска для здоровья населения при облучении радоном, а также адаптации её для использования с российскими данными (Кононенко Д.В., 2017), т.к. существующие преимущественно зарубежные модели направлены на оценку относительного риска с учетом влияния фактора табакокурения и для практического применения являются сложными и громоздкими (Кононенко Д.В., 2014);

2) оценка последствий при облучении радоном традиционно базируется на эпидемиологических исследованиях, показывающих, что риск рака легкого увеличивается линейно с долгосрочной радоновой экспозицией, при этом значение номинального коэффициента риска, нормированного на единицу экспозиции принимается равным 0,14 на Дж·ч·м<sup>-3</sup> (ICRP Publication 115, 2010);

3) нет свидетельств наличия порога (ICRP Publication 115, 2010; ICRP Publication 126, 2014);

4) основу оценок влияния радиационного фактора на здоровье населения составляют прогнозные оценки ожидаемого риска и ущерба от рака легкого в течение предстоящей жизни для номинальной популяции на момент достиже-

ния возраста 70 лет, при этом модель оценки радиационного риска может быть адаптирована для конкретных облучаемых популяций населения с учетом половозрастного состава, показателей заболеваемости и смертности от злокачественных новообразований, качества медицинского обслуживания;

5) было сделано допущение о том, что половозрастное распределение показателей смертности от рака легкого, вызванного всеми причинами, для населения г. Владимир совпадает с общероссийским, а уровень летальности рака легкого составляет 0,89.

Применение многоуровневой оценки радиационного риска от радонового облучения (табл. 1) в оценках радиационной опасности среды помещений обусловлено рядом факторов:

Таблица 1

Результаты оценки радиационного риска

№	Параметр	Субпопуляция		
		Со средним и высоким уровнем облучения	С низким уровнем облучения	С минимальным (фоновым) уровнем облучения
1	Численность, чел.	4545 ± 388	55653 ± 3911	275802 ± 5119
2	Оценка среднегодового значения ЭРОА радона в воздухе помещений, Бк/м <sup>3</sup>	94,6 ДИ 95%: 74 – 109	20,5 ДИ 95%: 6,5 – 74	6,5
3	Индивидуальная эффективная доза от радонового облучения, мЗв/год	6,4 ДИ 95%: 5,0 – 8,0	1,5 ДИ 95%: 0,2 – 5,0	0,5
4	Среднегодовая экспозиция по скрытой энергии, Дж·ч·м <sup>-3</sup> /год	4,0·10 <sup>-3</sup> ДИ 95%: 2,9·10 <sup>-3</sup> – 4,3·10 <sup>-3</sup>	8,7·10 <sup>-4</sup> ДИ 95%: 3,2·10 <sup>-4</sup> – 2,9·10 <sup>-3</sup>	3,2·10 <sup>-4</sup>
5	Оценка пожизненной экспозиции по скрытой энергии α-излучения, Дж·ч·м <sup>-3</sup>	0,264 ДИ 95%: 0,210 – 0,300	0,061 ДИ 95%: 0,022 – 0,210	0,022
6	Дополнительный пожизненный абсолютный номинальный риск радон-индуцированного рака легкого, скорректированный на ущерб	3,7·10 <sup>-2</sup> ДИ 95%: 2,9·10 <sup>-2</sup> – 4,2·10 <sup>-2</sup>	8,0·10 <sup>-3</sup> ДИ 95%: 3,1·10 <sup>-3</sup> – 2,9·10 <sup>-2</sup>	3,1·10 <sup>-3</sup>

№	Параметр	Субпопуляция		
		Со средним и высоким уровнем облучения	С низким уровнем облучения	С минимальным (фоновым) уровнем облучения
7	Дополнительный пожизненный абсолютный номинальный риск радон-индуцированного смертельного рака легкого, взвешенный по летальности	$4,6 \cdot 10^{-2}$ ДИ 95%: $3,6 \cdot 10^{-2} - 5,3 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$ ДИ 95%: $3,9 \cdot 10^{-3} - 3,6 \cdot 10^{-2}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$
8	Дополнительный пожизненный абсолютный номинальный риск возникновения радон-индуцированного рака легкого	$4,7 \cdot 10^{-2}$ ДИ 95%: $3,6 \cdot 10^{-2} - 5,4 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$ ДИ 95%: $3,9 \cdot 10^{-3} - 3,6 \cdot 10^{-2}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$
9	Относительный риск возникновения рака легкого	11,85 ДИ 95%: 10,26 – 13,68	2,72 ДИ 95%: 2,47 – 3,01	–
10	Дополнительный популяционный среднегодовой радиационный риск возникновения рака легкого, год <sup>-1</sup>	3,0 ДИ 95%: 2,2 – 3,8	8,5 ДИ 95%: 2,9 – 31,0	15,5

1) радиационная опасность радона для здоровья населения определяется не только уровнями радиационного риска, но и условиями в которых этот риск проявляется; 2) риск возникновения злокачественного новообразования имеет приоритет, т.к. число впервые зарегистрированных онкологических заболеваний признается более надежным показателем, чем число умерших от рака; 3) в соответствии с Публикацией 103 МКРЗ, оценке подлежит не один, а три вида риска в определенной последовательности: а) дополнительный пожизненный абсолютный номинальный риск, скорректированный на ущерб, б) дополнительный пожизненный абсолютный номинальный риск, взвешенный по летальности, в) дополнительный пожизненный абсолютный номинальный риск возникновения радон-индуцированного рака легкого; 4) возможность перехода к последующим оценкам относительного риска возникновения радон-индуцированного рака легкого, дополнительного популяционного среднегодового риска и радиационного ущерба; 5) показатели абсолютного риска важны для процедур сравнительного анализа риска и разработки стратегий регулирования радоновой проблемы, а для целей оперативного управления риском от радонового облучения наиболее пригодны значения относительного риска.



Оценки относительного риска возникновения радон-индуцированного рака легкого для субгруппы популяции со средним и высоким уровнем облучения, а также для субгруппы с низким уровнем облучения, дают значения, с учетом доверительных 95% интервалов, существенно превышающие 1 (табл. 1, п. 9). Таким образом, полученные оценки радиационного риска являются статистически значимыми и могут рассматриваться в качестве обоснованной оценки для управления риском при относительно низких уровнях продолжительного облучения радоном в домах. Характеристика риска является связующим звеном между оценкой риска для здоровья и его управлением.

**Сравнительный анализ риска.** Ущерб здоровью, исчисляемый через дополнительный популяционный среднегодовой риск возникновения радон-индуцированного рака легкого, среднее количество лет сокращения продолжительности жизни, количество потерянных человеко-лет здоровой жизни в популяции, среднегодовой экономической ущерб, может использоваться в качестве критерия медико-социальной значимости радон-индуцированного рака легкого и показателя конечного экологического эффекта воздействия природных факторов в популяции на территории региона, города (рис. 1, табл. 2).

Ожидаемый суммарный популяционный номинальный среднегодовой радиационный риск возникновения радиационно-индуцированного рака легкого для г. Владимир составляет: в соответствии с центральной тенденцией – 27,1; в соответствии с верхней оценкой – 50,3 случая рака легкого в год.

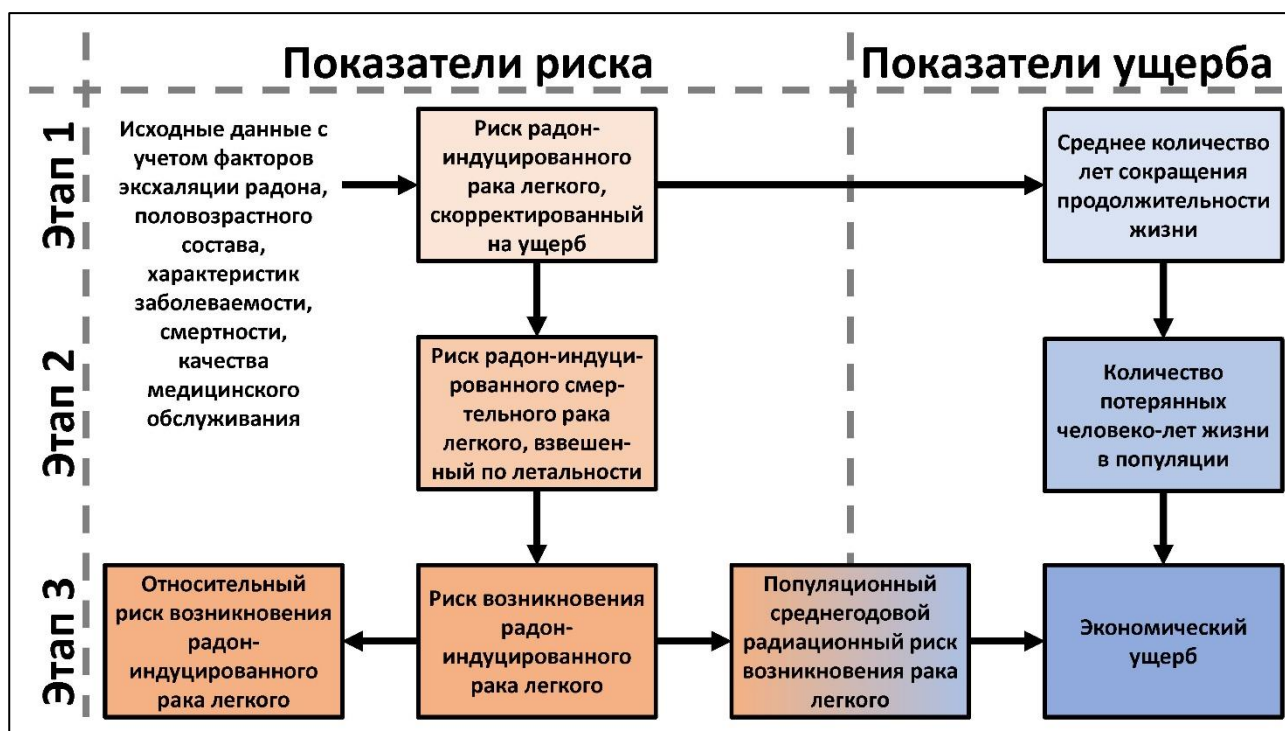


Рис. 1. Схема оценки радиационного риска и ущерба

Таблица 2

Характеристика радиационной опасности среды помещений в зданиях г. Владимира от радонового облучения

№	Параметр	Субпопуляция		
		Со средним и высоким уровнем облучения	С низким уровнем облучения	С минимальным (фоновым) уровнем облучения
1	Среднее количество лет сокращения продолжительности жизни, лет	0,55 ДИ 95 %: 0,43 – 0,64	0,13 ДИ 95 %: 0,05 – 0,43	0,05
2	Потери жизненного потенциала, чел-лет/год	36 ДИ 95 %: 26 – 45	101 ДИ 95 %: 35 – 368	184
3	Экономический ущерб, млн. руб./год: – центральная тенденция – верхняя оценка	8,4 10,4	23,5 85,6	42,8 45,4

Эпидемиологические оценки среднегодового числа регистрируемых случаев злокачественными новообразованиями трахеи, бронхов, лёгкого (С33, С34) на территории г. Владимир дают значение  $129 \pm 21$  (Злокачественные новообра-

зования в России в 2008 – 2014 г.г. – М.: МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИРЦ» Минздрава России). Таким образом, вклад радонового облучения в заболеваемость злокачественными новообразованиями трахеи, бронхов и легкого (С33, С34) может составлять до 38 %.

Суммарный среднегодовой популяционный ущерб или потери жизненного потенциала для всего населения г. Владимир в результате радиационно-индуцированного рака легкого оценивается величинами: в соответствии с центральной тенденцией – 321,4 чел-лет/год; в соответствии с верхней оценкой – 608 чел-лет/год. (табл. 2). Следовательно, суммарные экономические потери от дополнительной смертности в результате индуцированного радоном рака легкого, рассчитанные через внутренний региональный продукт, составляют (по ценам 2014 г.): в соответствии с центральной тенденцией – 74,8 млн руб./год; в соответствии с верхней оценкой – 141,4 млн руб./год.

Вариабельность является причиной неопределенностей в оценках рисков, наиболее существенных именно в области низких концентраций радона (ЭРОА < 74 Бк/м<sup>3</sup>).

## **ВЫВОДЫ**

1. Статистика распределения ЭРОА и эффективной дозы на территории города в целях учета вариации радона во времени и в пространстве может быть описана с использованием единого подхода посредством дифференциального закона распределения вероятностей, выраженного в логарифмическом масштабе исследуемых переменных и основанного на обобщенной аналитической модели класса экспоненциальных распределений. При этом в ходе аппроксимации полученных гистограмм оценке подлежат: показатель степени экспоненциального распределения, стандартное отклонение и центр распределения.

2. Установленное распределение значений ЭРОА радона-222 имеет вид ассиметричной кривой с крутым подъемом и очень пологим спадом, который определяет вероятность регистрации умеренных и высоких значений ЭРОА в воздухе помещений г. Владимир. ЭРОА радона, соответствующая центральной тенденции, оценивается величиной 19,1 Бк/м<sup>3</sup>, а верхняя оценка – 109 Бк/м<sup>3</sup>. При этом на территории г. Владимир вероятность регистрации в воздухе помещений первых этажей зданий значений объемной активности, превышающих 50 Бк/м<sup>3</sup> (или ЭРОА > 25 Бк/м<sup>3</sup>), составляет 37,4 %.

3. Для экспонируемой популяции, т.е. популяции проживающих и работающих на первых этажах зданий, вероятность регистрации средних и высоких

доз ( $\geq 5$  мЗв/год) радонового облучения составляет 6,1 %, низких доз облучения – 74,9 %, фоновых значений – 18,9 %.

4. Оценены параметры годовой экспозиции по скрытой энергии  $\alpha$ -излучения для выделенных в сценарии экспозиции условий радонового облучения и численности субгрупп популяции: 1) для субпопуляции со средним и высоким уровнем облучения (1,4 % от общей численности населения) –  $4,0 \cdot 10^{-3}$  Дж·ч·м<sup>-3</sup>/год; 2) для субпопуляции с низкими уровнями облучения (16,6 %) –  $8,7 \cdot 10^{-4}$  Дж·ч·м<sup>-3</sup>/год; 3) для субпопуляции с фоновым (минимальным) уровнем облучения (82,0 %) –  $3,2 \cdot 10^{-4}$  Дж·ч·м<sup>-3</sup>/год.

5. Радон в домах увеличивает абсолютный риск заболевания раком легкого для всего населения, при этом большинство случаев заболевания раком легкого (88,8 %), обусловленных радоном, вызваны низкими концентрациями радона (ЭРОА  $< 74$  Бк/м<sup>3</sup>), чем средними и высокими.

6. Радон в домах увеличивает статистически значимо показатели риска и ущерба от заболевания раком легкого для всей популяции городского населения даже при низких уровнях объемной активности радона, о чем свидетельствуют оценки относительного риска возникновения радон-индуцированного рака легкого.

7. Вклад радонового облучения в заболеваемость злокачественными новообразованиями трахеи, бронхов и легкого (С33, С34) составляет до 38 %.

8. Особенностью полученных данных является то, что наибольшие неопределенности в оценках рисков и ущербов возникают именно в области низких уровней радонового облучения.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Статьи в научных журналах, включенных в Перечень ВАК РФ:*

1. Ширкин Л.А., Семченко М.И., Трифонова Т.А. Оценка радиационного риска от радона в воздухе помещений на примере города Владимира // Радиация и риск, 2017, том 26, № 4, с. 63 – 73. – ISSN 0131-3878.
2. Семченко М.И., Трифонова Т.А., Ширкин Л.А. Прогнозные оценки индивидуальной годовой эффективной дозы от радонового облучения на примере города Владимира // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2015, т.17, №4(5), с. 977 – 980. – ISSN 1990-5378.
3. Семченко М.И., Трифонова Т.А., Ширкин Л.А. Оценка объемной активности радона в воздухе помещений на примере города Владимира // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2015,

т.17, №4(5), с. 972 – 976. – ISSN 1990-5378.

*Статьи в других научных изданиях:*

1. Семченко М.И., Ширкин Л.А. Оценка радиационного риска и ущерба для здоровья населения от радонового облучения // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2017: сборник статей по материалам науч.-практ. конференции с межд. участием (11–15 сентября 2017 г.) / под. ред. Ю.А. Омельчук, Н.В. Ляминой, Г.В. Кучерик, – Севастополь: СевГУ, 2017, с. 1206 – 1208. – ISBN 978-5-9907603-7-0.
2. Семченко М.И., Ширкин Л.А., Трифонова Т.А. Оценка радиационного риска для населения от радонового облучения на примере города Владимира // Экология речных бассейнов: Труды 8-й Междунар. науч.-практ. конф. / Под общ. ред. проф. Т.А. Трифоновой; Владим. гос. ун-т. им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, 2016, с. 272 – 278. – ISBN 978-5-93767-160-8.