

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

На правах рукописи



**Семченко Максим Игоревич**

**ОЦЕНКА РАДИАЦИОННОЙ ОПАСНОСТИ СРЕДЫ  
ПОМЕЩЕНИЙ ОТ РАДОНОВОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ  
Г. ВЛАДИМИРА**

03.02.08 – экология (биология)

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата биологических наук

Научный руководитель:

кандидат химических наук, доцент

Ширкин Л.А.

г. Владимир – 2018

## СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	3
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ .....	4
ГЛАВА 1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР.....	8
1.1 Радиационная опасность радона .....	8
1.2 Применения показателей радиационного риска и ущерба .....	17
1.3. Модели оценки риска .....	22
Выводы к главе 1.....	28
ГЛАВА 2 ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЪЁМНОЙ АКТИВНОСТИ РАДОНА И ЕГО ДОЧЕРНИХ ПРОДУКТОВ РАСПАДА.....	30
2.1 Объекты обследования .....	30
2.2 Предмет исследования .....	35
2.3 Оборудования для определения объёмной активности радона .....	41
2.4 Методы измерения ОА радона и его ДПР .....	45
Выводы к главе 2.....	49
ГЛАВА 3 ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАДОНА НА ТЕРРИТОРИИ ГОРОДА .....	51
3.1 Идентификация опасности .....	51
3.2 Оценка зависимости «доза–ответ».....	66
3.3 Оценка экспозиции .....	81
Выводы к главе 3.....	94
4. ОЦЕНКА И АНАЛИЗ РИСКА РАДОНОВОГО ОБЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ НАСЕЛЕНИЯ .....	101
4.1 Характеристика риска .....	101
4.2 Сравнительный анализ риска.....	120
Выводы к главе 4.....	127
Выводы .....	130
Список литературы.....	132

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ЭРОА - эквивалентная равновесная объёмная активность

МЭД ГИ - мощность эквивалентной дозы гамма-излучения

Аэфф - эффективная удельная активность

ВОЗ - Всемирная организация здравоохранения

ДПР – дочерние продукты распада

ОА - объёмная активность

ДИ - доверительный интервал

ВРП - внутренний региональный продукт

МКРЗ - Международная комиссия по радиологической защите

НКДАР ООН – Научный комитет по действию атомной радиации при  
Организации Объединенных Наций

ДНК - Дезоксирибонуклеиновая кислота

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Радон является доминирующим источником облучения населения [90], 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 [109]. 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 (ОА) радона, которая обуславливает высокую степень неоднородности распределения уровней облучения; с неопределенностями в оценках экспозиции населения; с появлением в публикациях международная комиссия по радиологической защите (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 [44, 108, 109, 110].

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 [32]. 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 [74].

**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 ОА радона ( $\text{ЭРОА} < 74 \text{ Бк/м}^3$ ).

**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 167 страницах машинописного текста, включает 5 таблиц и 17 рисунков. Работа состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы. Список литературы содержит 131 наименование 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. Трифионовой – за большую помощь в работе.

## Глава 1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

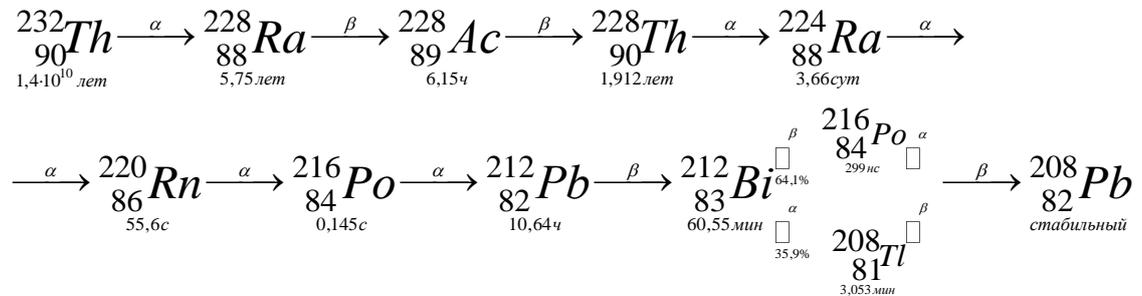
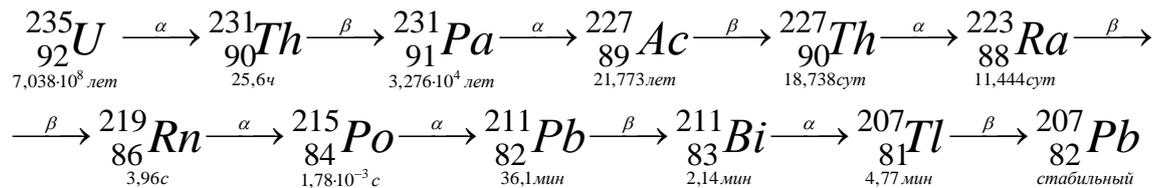
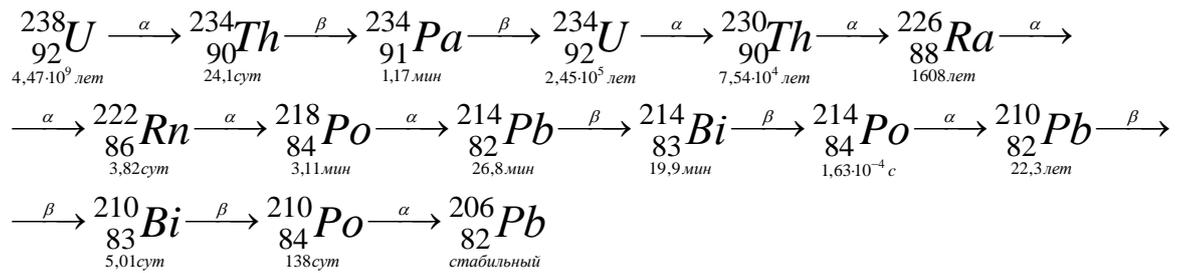
### 1.1 Радиационная опасность радона

Люди с давних времен стали замечать аномалии связанные с радоном, так еще в Центральной Европе 16 века заметили большую смертность шахтеров и только в конце 19 века диагностировали рак легкого, а предположить о связи между высокой заболеваемости и радиоактивным газом смогли лишь в 1924 году, не удивительно, что прошло больше четверти века, прежде чем разработали программы мониторинга облучения дочерними продуктами радона в урановых рудниках [110]. В 1956 году были обследованы 225 домов в Швеции и на их основе опубликованы первые результаты измерений концентрации радона в жилищах, которые показали высокие уровни концентраций радона в некоторых домах, построенных из бетона, содержащего радий-226 [101]. Полученным результатам этого исследования в мире было уделено мало внимания, полагая, что это являлось локальной шведской проблемой, однако впоследствии в ряде стран, провели исследования концентрации радона в зданиях, которые затем были обобщены в докладах научного комитета по действию атомной радиации при Организации Объединенных Наций (НКДАР ООН) [26]. Развитие легочной онкопатологии у шахтеров из за воздействия радона подтвердилось в первых результатах эпидемиологических исследований, проведенных в шестидесятых годах прошлого столетия. Несмотря на то, что радон уже давно признан причиной возникновения рака легкого он был утвержден как канцероген для дыхательных путей только в 1986 году Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) [26, 109]. В свою очередь в 1988 году Международное агентство по изучению рака объявила радон канцерогеном для легких людей, опираясь на проведенные исследования над животными и рассматривая результаты, полученные при относительно высоких объемных активностях радона и его дочерних продуктов [109].

Радон имеет довольно противоречивую историю, поскольку во времена

открытия радона с радиацией знакомы были мало и такое понятие как изотоп еще не существовало. Резерфорд и Оуэнс, Рамзай и Содди, Дорн, Дебьерн независимо друг от друга и практически одновременно (1900...1904 гг.) находили изотопы одного и того же элемента – элемента №86, но именно  $^{222}\text{Rn}$  (радон), открытый Дорном, это самый долгоживущий изотоп элемента №86 [64, 30]. Радон-222 (далее по тексту диссертации радон) – природный радиоактивный газ, не имеющий вкуса и запаха с периодом полураспада 3,82 суток, который образуется при распаде радия-226, являющегося членом цепочки распада урана-238 [109]. Радон является  $\alpha$ -излучателем с энергией излучения  $E_{\alpha}=5,49$  МэВ [4]. В свою очередь именно  $\alpha$  излучение имеет наибольшее влияния на организм, так альфа-излучение ( $\alpha$ ) представляет собой обладающую высокой энергией эмиссию ядер гелия, состоящих из двух протонов и двух нейтронов [1]. При  $\alpha$ -распаде энергетический спектр  $\alpha$ -частиц дискретен, так как ядро распадается на  $\alpha$ - частицу и дочернее ядро, при этом реакция обусловлена процессами сильных взаимодействий внутри ядра [4]. При сообщении популяции клеток 4-6 Гр потоком  $\alpha$ - частиц приводит к гибели 99.9% клеток, а при такой же поглощённой дозе рентгеновского или  $\beta$ - излучения гибнет только 20-30% облученных клеток, очевидно, что энергия ионизирующей частицы не пропорциональна биологическому эффекту [40]. Такое действие объясняется тем, что большее количество энергии приходится на меньшее расстояние пути и характеризуется линейной передачей энергии. Множество проведенных экспериментов показали, что относительная биологическая эффективность  $\alpha$ -лучей в 20 раз выше, чем у рентгеновского,  $\gamma$  и  $\beta$  излучений. Эманация тория  $^{220}\text{Tn}$  (торон) с массовым числом 220, открытая Резерфордом и Оуэнсом, член другого естественного радиоактивного семейства – семейства тория [64]. Торон из-за сравнительно короткого полураспада 55,6 секунды обладает низкой активностью в сравнении с радоном, но выше чем у  $^{219}\text{An}$  (актинона) являющегося радиоактивным продуктом распада урана-235, актинон открытый Дебьерном имеет период полураспада меньше 4 секунд [111].

Вклад актинона крайне мал, он почти полностью распадается до того как попадает в организм. За время существования Земли все короткоживущие радионуклиды распались, сохранились лишь радионуклиды с очень большим периодом полураспада [79] которые и составляют основной вклад в  $\alpha$  излучения [90]. Элемент №86 существует в каждом из 3 естественных радиоактивных рядов, ряд тория ( $4n$  Th-232), ряд радия ( $4n+2$  U-238) ряд актиния ( $4n+3$  U-235) [6, 102].



После различных радиоактивных превращений ряды заканчиваются образованием стабильных изотопов. Сам по себе радон как самостоятельный газ существует весьма недолго и почти полностью распадается за 20 суток [49]. При этом именно у радона высокая миграционная способность, которая позволяет ему концентрироваться в воздухе, достигая порой высоких значений ЭРОА в помещениях [91].

Выход радона в атмосферный воздух и соответственно его концентрация в приземистом слое в значительной мере зависит от местных

условий (содержания в почве и местах горных породах урана, а также от гидрогеологических и метеорологических особенностей территории и др.) [79, 15, 103]. Так вблизи месторождений и рудопроявлений, вдоль тектонических разломов в обрамлении впадин отмечаются аномальные концентрации радона ( $>50$  кБк/м<sup>3</sup>) в почвенном воздухе также тектонические разломы могут быть источниками выделения из недр земли радона, метана, водорода, такой процесс известен под названием дегазация земли [50]. В порах почвы находится много радона, ОА наблюдаемая на уровне 0,5–1 метра ниже уровня почвы, составляет от 2000 до 106 Бк·м<sup>-3</sup> [95, 128, 110]. Уран-238 содержится повсеместно, а поскольку радон является его продуктом распада то и его можно обнаружить везде [109].

Перенос радона с места его образования различен. Радон переносится путем диффузии, в поровых пространствах, зависящих от вида грунта, либо путем проникновения через разломы и трещины, обычно в меньших количествах радон перемещается в растворенной воде или при сжигании газа [110]. Сверхнормативная концентрация радона в помещениях в основном образуется вследствие его избыточных поступлений в здания из грунтовых оснований [48]. Примерное поступление радона из стройматериалов (21%), грунта под строением (56%), наружного воздуха (20%), воды (2%), при горении газа (1%) [4]. Для разных типов почвы коэффициент эманирования радона меняется от 20 Бк·м<sup>-3</sup> для серозема и песчаной до 50 Бк·м<sup>-3</sup> для краснозема и чернозема и до 90 Бк·м<sup>-3</sup> для почв горной тундры [79]. Обычно исследуемый уровень над землей варьируется от 1 до 100 Бк·м<sup>-3</sup> при этом типичные уровни радона в наружном воздухе примерно 10 Бк·м<sup>-3</sup>, меньшие уровни зачастую на побережьях и на маленьких островах [124, 125, 110].

Наблюдается значительная вариабельность ОА радона в воздухе помещений, обусловленная главным образом геологией территории и факторами, влияющими на разницу давлений снаружи и внутри здания, такие как скорость воздухообмена, отопление здания и метеорологические условия, не маловажным является площадь, соприкасающаяся с грунтом и

герметичность строения [109, 110, 87]. Такая зависимость от давления для насыщения радоном обычно важнее, чем диффузионный перенос радона, при одинаковом давлении диффузионный перенос радона уменьшается из-за более высокой плотности материала относительно почвы [110].

Перенос радона можно разделить на перенос из почвы в здания (рисунок 1.1) и на перенос в самом здании. Перенос радона в самом здании зависит от воздушных потоков в здании, метеорологических и сезонных параметров (особую роль играет разницы температур между наружным и внутренним воздухом), этажа и размера помещений, поведение людей присутствующих в здании [110]. В закрытых помещениях концентрация радона примерно в 8 раз выше, чем в наружном воздухе в районах с умеренным климатом [73].

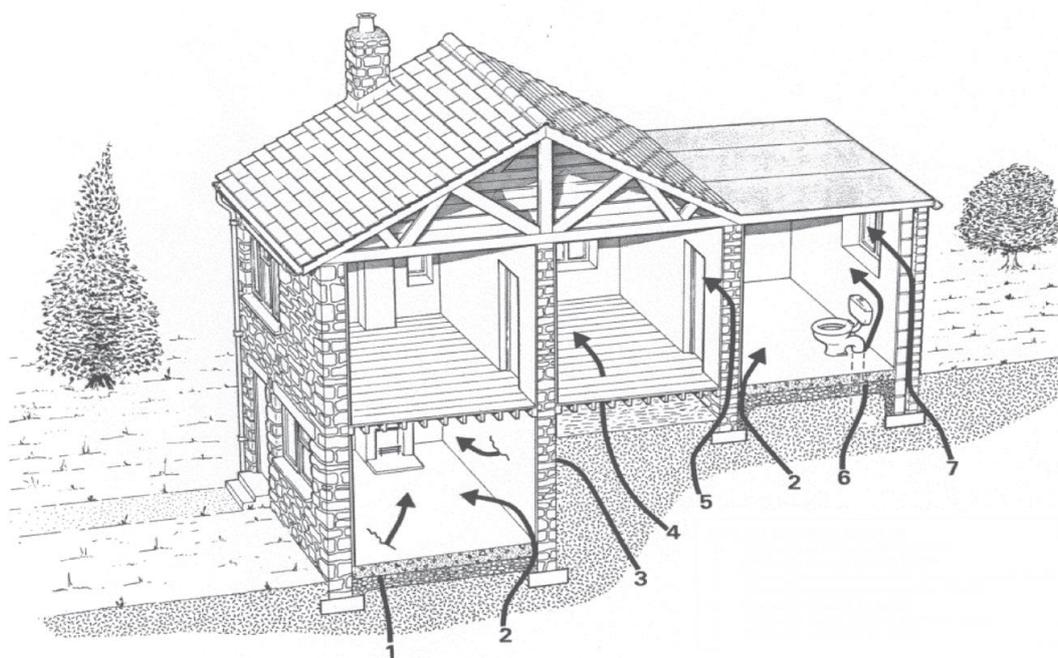


Рисунок 1.1. Пути поступления радона [110]

1 – трещины в основании, 2 – конструкционные швы, 3 – трещины ограждающих конструкций подвала, 4 – щели в полу, 5 – щели в стенах, 6 – зазоры коммуникационных каналов, 7 – полости в стенах

Уровень радона в подземных водах может достигать до значительных показателей, несмотря на малую растворимость радона в воде, газ при использовании воды попадает в помещения, что может повысить уровень

радона, но в большинстве коммунальных систем водоснабжения значительная часть радона распадается при транспортировке [110].

В некоторых работах отмечают, что ОА радона меняется со временем, следуя суточным, сезонным и долговременным вариациям [56, 122, 98, 100, 53, 86] с наиболее высоким уровнем в предрассветные часы и в зимнее время и наиболее низким уровнем в послеполуденное время и летом [84, 113, 126]. Но это не является строгим правилом, так как нередко наблюдается противоположная закономерность [84, 17, 12]. Особенно сильно суточные вариации ОА радона заметны на рабочих местах, где работы производятся преимущественно в одну смену, на таких местах ночные уровни ОА радона могут значительно превышать уровни, характерные для периода пребывания людей на рабочем месте [5, 120, 85]. Также уровень радона выше в жилищах, все обитатели которых отсутствуют в течение рабочего дня [56, 5]. Суточные изменения температуры наружного воздуха также могут оказывать влияние на уровни ОА радона [17]. При попадании в закрытое помещение радон начинает накапливаться. Поскольку радон намного тяжелее воздуха он концентрируется в основном на нижних этажах. К примеру, в Норвежские исследования показали, что уровень радона в кирпичных домах ниже чем в деревянных, поскольку деревянные дома имеют меньшую этажность по сравнению с кирпичными домами [73].

В независимости от источника радона его ОА в зданиях, по данным НКДАР ООН, может сильно варьироваться от  $10 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$  до  $70000 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$  [125], но среднемировое значение ОА радона в помещениях находится на примерном уровне  $40 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$  [110].

Более половины от общего радиационного облучения населения приходится на радон [109]. Одной из особенностей радона является его инертность, что делает сам газ не таким опасным, как его ДПР, такие как ( $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$  и  $^{214}\text{Bi}$ ) они не являются газами, но присутствуют в воздухе в виде не присоединённых и присоединённых к аэрозольным частицам радионуклидов. [110]. Полоний-218 и полоний-214 распадаются с

испусканием альфа-частиц [109]. В зависимости от диффузионных свойств аэрозолей продукты распада, находящиеся в воздухе, откладываются в носовых полостях, в легких, на стенках бронхов [102, 110]. Поэтому важными являются и условия в помещении, такие как запыленность.

Значительная часть поступивших с дыханием ДПР осаждаются в дыхательных путях легких [109], из-за относительно коротких периодов полураспада легочная ткань получает дозу облучения до их удаления путем абсорбции в кровь или переноса частиц в пищеварительный тракт [110]. Ядра радона распадаясь вызывают микроожог в легочной ткани, происходит это поскольку почти вся энергия  $\alpha$  частиц приходится на точку распада. Почти вся доза облучения от радона и его ДПР приходится на легкие, и совсем немного на другие системные органы и отдела желудочно-кишечного тракта [109]. В итоге вклад эквивалентной дозы облучения легких более 95% в величину эффективной дозы, обусловленной ингаляцией ДПР, а эффективная доза от вдыхания только газообразного радона чаще всего меньше 10% ингаляционного поступления ДПР [110]. В свою очередь рак легких, как и злокачественные новообразования, в целом являются значимой проблемой в России [18, 88, 19, 20, 21, 22, 23, 24].

Воздействия радона относят к ионизирующему облучению в малых дозах. В свою очередь воздействие малых доз ионизирующего излучения на здоровье относится к вероятностным процессам, при этом такая вероятность является индивидуальной и зависит от многих факторов (пол, возраст, величина дозы и др.) [75]. Хотя малые дозы радиации связывают с раковыми заболеваниями, для определения биологического эффекта от них нужен большой массив экспериментальных и эпидемиологических данных, несмотря на это другие причины раковых заболеваний и долгий скрытый период не позволяет определить точные данные о зависимости «доза-эффекта» при воздействии малых доз радиации [55, 100]. Однозначного ответа на возможные последствия воздействия радиации в малых дозах на уровне низкого и нормального естественного фонового облучения до сих пор

нет [79, 35]. Нормальный радиационный фон составляет 5-25 мкРентген/час [6]. Существует 2 точки зрения на воздействия радиации в малых дозах. Одна из них гипотеза беспорогового действия ионизирующей радиации, в которой с увеличением дозы радиации в любом диапазоне увеличивается вероятность попадания ионизирующей частицы, в чувствительную мишень которой является участком молекулы дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК) с развитием необратимого повреждения (мутации), здесь применима стохастическая теория мишени [43, 6]. Вторая гипотеза стимулирующего действия радиации утверждает, что малые дозы ионизирующего излучения способствуют, увеличению частоты клеточных делений, репарации повреждений ДНК, стимулирующих выделение некоторых ферментов уменьшающих риск возникновения рака. [43, 6]. Некоторые считают, что малые дозы излучения «поставляют» мутации ДНК в популяцию живых организмов, являясь источником эволюции вида [6].

Свои особенности есть и у оценки доз облучения и радиационно-индуцированных биологических последствий при внутреннем облучении организма [27]. Особенности действия малой дозы при ее малой мощности хорошо проявляются в биологических эффектах радона [43].

Не смотря на то, что реакция организма на облучение довольно индивидуальна, особенно в малых дозах и зависит от множества факторов, механизм нарушений схож. При облучении следуют изменения физико-химических процессов, в основе которых лежат взаимодействия ионизирующих излучений с клетками и тканями организма [39]. При взаимодействии излучения с веществом происходит поглощение энергии атомом этого вещества, при этом электрон покидает электронную орбиту, происходит ионизация [6]. Отрываясь от атомов электроны, возбуждают другие атомы, образуются свободные радикалы, приводящие к разнообразным реакциям в организме [79].

Защитные механизмы организма могут восстановить большое число клеток без вреда для себя, но большие нарушения приводят к изменению

функционирования органа, что может обернуться смертью [79]. Энергетическое распределение при облучении имеет вероятностный характер [40].

Ионизирующее излучение может модифицировать клетку, при этом если структура ДНК в клетке не восстановится, то такие перемены, вероятно, передадутся дальнейшему поколению клеток, такие мутации приводят к гибели самих клеток и их потомков либо являются причиной возникновения новообразований, что в итоге вызовет раковые заболевания органов и тканей [79, 6].

Модификация ДНК клетки при нарушении ее репарации приводит к стохастическим соматическим и генетическим поражениям [59]. С увеличением дозы чаще проявляются соматические, стохастические, генетические поражения и эффект возрастает при любом росте дозы радиации поскольку при поражении даже одной клетки может проявиться негативное воздействие [79]. Но все же реальное проявление стохастических эффектов некоторые полагают в пределах значений накопленной дозы в диапазоне 0,2-0,5 Зв, а сейчас дискутируется опасность доз даже порядка 0,01 Зв [43].

В нормальных условиях в каждой молекуле ДНК за 1 час происходит около 8000 повреждений, они восстанавливаются системами защиты, при этом считается, что при дозе в один Зв в каждой молекуле возникает дополнительные две тысячи повреждений [4].

При накоплении большого числа (несовместимого с жизнью) в ДНК повреждений наступает гибель клетки (некроз) [6].

Несмотря на то, что влияния радона изучается довольно давно и механизм вполне известен наилучшим оценочным фактором будет являться экспозиция. Экспозиция (воздействие) – контакт организма (рецептора) с химическим, физическим или биологическим агентом. Уровень экспозиции находится как рассчитанное или измеренное количество агента в конкретном объекте окружающей среды, находящееся в соприкосновении с так

называемыми пограничными органами человека (легкие, пищеварительный тракт, кожа) в течение какого-либо точно установленного времени.

Оценка экспозиции (Exposure assessment) – установления путей и их компонентов, на каком количественном уровне, в какое время, при какой периодичности и общей продолжительности имеет место, ожидаемое или реальное воздействие конкретного вредного фактора на населения или её части с учётом её численности. В основном из-за невысоких уровней радона, подход к поиску воздействия на населения заведомо предполагается через индукцию рака легкого. Из-за биологических особенностей взаимодействия с биологическими системами нет возможности применять нормальное распределения. Зато появляется возможность использовать логнормальное распределения, которое более часто используется для живой природы и в частности различных организмов. Данный подход можно также объяснить накоплением и релаксацией радона. На основании многочисленных данных [92, 96, 117, 94, 129] ясно, что распределение ОА радона может с достаточной точностью быть описано логнормальным распределением [53, 8].

## **1.2 Применения показателей радиационного риска и ущерба**

Довольно обширные работы были проведены для обеспечения сопоставимости оценок риска, полученных в исследованиях шахтеров и в исследовании облучений радоном в помещениях, имеющиеся в настоящее время результаты показывают достаточно хорошее согласие между оценками риска возникновения рака легкого, полученными в исследованиях шахт и жилых помещений [109, 122, 125, 131].

В публикации 60 МКРЗ [50], изданной на английском языке, было предложено различать понятия «harm» и «detriment», для которых в ее русском переводе предлагалось использовать термины «вред» и «ущерб» соответственно [70] правда, в отличие от целей оценки ущерба, подходы к его вычислению существенно менялись на протяжении многих лет [75].

Ущерб является концепцией МКРЗ. Ущерб показывает общий вред здоровью, полученный облученной группой и их потомками в результате воздействия на них источника радиации. Ущерб – это многоуровневое понятие. Его основными составляющими являются стохастические величины, такие как вероятность атрибутивного смертельного рака, взвешенная вероятность атрибутивного несмертельного рака, взвешенная вероятность тяжелых наследственных эффектов и количество потерянных лет жизни в случае причинения вреда.

Индивидуальный радиационный ущерб равен произведению пожизненной вероятности реализации стохастического или детерминированного эффекта на среднее число лет, которые в результате могут быть утрачены, последняя величина не зависит от дозы облучения и лежит в строго ограниченных пределах в зависимости от того, какой орган облучен.

Индивидуальный радиационный ущерб равен произведению дополнительного пожизненного абсолютного номинального риска радиационно-индуцированного рака легкого, скорректированного на среднее число лет, которые в результате могут быть потеряны, последняя величина равняется числу потерянных лет жизни, характерного для всех онкологических заболеваний в целом (15 лет).

Радон как важный источник радиационного воздействия был разобран в публикации 65 МКРЗ, в котором упоминалось об эпидемиологических исследованиях в местах проживания людей, но они не учитывались для обоснования уровня радиационного риска [107]. Полезность сбора данных в жилищах не вызывала сомнения поскольку использовать данные полученные только для шахтёров при оценке радиационного риска для населения не верно. Стоит напомнить, что в Публикации 65 МКРЗ был предложен условный дозовый переход, основанный на прямом сравнении ущерба на единицу экспозиции по радону и его дочерним продуктам и общего ущерба, связанного с единичной эффективной дозой, при этом первый был определен

по эпидемиологии шахтеров, а последний по результатам эпидемиологических исследований японцев, получивших гамма-облучения из-за ядерной бомбардировки [110].

В Публикации 103МКРЗ говорится о большой схожести между оценками риска от радона в исследованиях жилых помещениях и шахтеров [108].

НКДАР ООН выпустил доклад о радоновом облучении и рисках [125], а ВОЗ опубликовала руководство, трогаящее регулирования воздействия радоном в помещениях со стороны общественного здоровья [26, 125, 127, 110]. В декабре 2009 года было проведено техническое совещание при участии представителей потенциальных организаций-спонсоров для обсуждения заявления о радоне, с которым МКРЗ выступила в ноябре 2009 года, а также для оценки его значения применительно к пересмотренным основным нормам безопасности [71].

В более поздней Публикации 115 МКРЗ проведен анализ результатов эпидемиологических исследований с пересмотренными значениями ущерба и референтных уровней, выполненных для населения в домах и на рабочих местах с различными уровнями радона, представлены обновленные оценки риска рака легкого. Публикация 115 МКРЗ провела анализ, учитывающий исследования, сделанные по принципу случай-контроль, не смотря на то, что другие способы не применялись, он дает лучшие по надежности данные [109].

В Публикации 115 МКРЗ был изменен метод оценке эффективной дозы облучения при вдыхании ДПР радона [109]. Публикация 65 МКРЗ предлагала не использовать дозиметрические модели дыхательных путей при переходе от экспозиции по ЭРОА радона к эффективной дозе [107]. На эпидемиологических исследованиях по смертности летальным исходам шахтеров урановых рудников определили пожизненного риска (ущерба) от постоянного профессионального облучения. После перехода от экспозиции к эффективной дозе применялось прямое сравнение ущерба, связанного с

единицей эффективной дозы при внешнем облучении и единицей экспозиции радона. Согласно Публикации 60 МКРЗ ущерб на единицу эффективной дозы составляет  $5,6 \cdot 10^{-5}$  мЗв<sup>-1</sup> для персонала и  $7,3 \cdot 10^{-5}$  мЗв<sup>-1</sup> для людей, это отличие полностью обусловлено различиями коэффициентов ущерба для эффективной дозы согласно Публикации 60 МКРЗ [106]. Такой переход, выполненный на основании равенства ущербов, а не на дозиметрических моделях, был назван условным дозовым переходом (dose conversion convention). Главной особенностью данного метода является его использования только для облучения ДПР радона.

В докладе 2000 г. Комитет сохранил значение эффективной дозы 1,6 мЗв на мДж·ч·м<sup>-3</sup>, т.е. 9 нЗв на Бк·ч·м<sup>-3</sup> ЭРОА радона для облучения внутри и вне помещений, хотя и согласились, с использованием новых дозиметрических моделей которые показали значения выше коэффициента перехода к дозе [109].

Несмотря на меньшее значение, рассчитанное на основе условного дозового перехода [107], было решено оставить значение в 9 нЗв на Бк·ч·м<sup>-3</sup> ЭРОА [124, 125, 109].

Основные рекомендации Заявления МКРЗ по радону были вставлены в европейские и международные базовые стандарты безопасности, а в Публикации 126 МКРЗ обновлены и пересмотрены рекомендации по контролю облучения от радона с учетом накопленного опыта [110].

Многочисленные исследования уровней радона демонстрируют не линейную зависимость «доза-эффекта» и повышения уровня ионизирующего излучения в малых дозах. Как показано в исследованиях [43] природный радиационный фон в Бразилии (5 мЗв/год), Франция (1,8-3,5 мЗв/год), Индия (13 мЗв/год), Египет (4 мЗв/год), однако обследования состояния здоровья жителей этих регионов не выявили корреляции между уровнем природного радиационного фона и заболеваемостью раком. Существуют и более яркие примеры так, например в одном из исследований в Японии при 11 Бк/м<sup>3</sup> радона в домах, рак легкого наблюдался в двое чаще, чем при 35 Бк/м<sup>3</sup>, а

исследования китайцев выявили меньшую заболеваемость при проживании в домах с объёмной активностью в  $350 \text{ Бк/м}^3$  чем у проживающих с уровнем в  $70 \text{ Бк/м}^3$  [43]. Рак легкого возникает больше при действии низких и средних уровней радона, чем высоким, поскольку они встречаются в подавляющем большинстве случаев [28].

Международное агентство по атомной энергии предлагает правительству предоставлять информацию об уровнях радона в закрытых помещениях и о сопутствующих рисках для здоровья и в надлежащих случаях разрабатывает и осуществляет план действий по контролю облучения населения, обусловленного присутствием радона в закрытых помещениях [71]. Органы исполнительной власти субъектов Российской Федерации планируют и осуществляют мероприятия по оценке и понижению уровней воздействия на людей за счет природных источников излучения, в том числе и изотопов радона и продуктов их радиоактивного распада в воздухе помещений [58].

Анализ риска своей целью ставит выбор оптимальных в конкретной ситуации путей устранения или снижения риска [57]. Для определения негативных эффектов здоровью в результате воздействия малых доз, находят ущерб, который рассматривает как воздействия на отдельные элементы тела, различные по радиочувствительности к ионизирующему излучению, так и всего организма в целом. Линейная беспороговая теория гласит о зависимости риска стохастических эффектов от дозы, при этом величина риска пропорциональна дозе излучения и связана с дозой через линейные коэффициенты радиационного риска [52].

Применяется для установления пределов доз населения и персонала величина коэффициента риска  $0,05 \text{ Зв}^{-1}$  является усредненной.

В условиях нормальной эксплуатации источников ионизирующего излучения пределы доз облучения в течение года устанавливаются исходя из следующих значений индивидуального пожизненного риска, для персонала  $1,0 \cdot 10^{-3}$  и для населения  $5,0 \cdot 10^{-5}$  при этом уровень пренебрежимо малого

риска составляет  $10^{-6}$  [52, 61].

При решении о защите от источников потенциального облучения в течение года вводятся следующие граничные значения обобщенного риска (произведение вероятности события, приводящего к облучению, и вероятности смерти, связанной с облучением), для персонал  $2,0 \cdot 10^{-4}$ , год<sup>-1</sup> и для население  $1,0 \cdot 10^{-5}$ , год<sup>-1</sup> [52].

В МКРЗ 115 говорится, что эквивалентная доза облучения легких на единичную экспозицию относительно не чувствительна к возрасту, например, доза на легкие для взрослых отличается только на 10% от дозы для детей (старше 1 года), причина этого состоит в наличии конкурирующих факторов, действие которых имеет тенденцию взаимно компенсироваться. Дети имеют меньшую скорость дыхания, что понижает поступление и дозу на легкие, в то же время это снижение частично компенсируется меньшей массой ткани-мишени, что увеличивает дозу, у детей дыхательные пути меньше, что увеличивает диффузионное осаждение, но также частично компенсируется меньшим временем нахождения воздуха в легких, что снижает диффузионное осаждение [109].

При облучении радоном все оценки радиационных рисков проводятся не с применением коэффициентов номинального риска на единицу эффективной дозы, а с использованием всевозможных моделей радиационного риска, основанных на прямых эпидемиологических данных по облучению радоном и его ДПР [109, 107, 105, 119, 75, 14, 98].

### 1.3 Модели оценки риска

В России не существует единой официальной методики оценки риска для здоровья населения при облучении радоном и его короткоживущими дочерними продуктами распада [15, 69], хотя радоновой проблемой занимаются давно [38, 37]. Вопросом выборки методики оценки риска в России задались с момента появления постановления главного

государственного санитарного врача РФ и главного государственного инспектора по охране природы от 10 ноября 1997 г. № 25, 03-19/24-3483 «Об использовании методологии оценки риска для управления качеством окружающей среды и здоровья населения в Российской Федерации» [32, 65]. Не проработанность вопроса упоминалась в Решении коллегии Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека от 5 февраля 2010 г. «О внедрении методологии оценки риска для здоровья населения и задачи по ее совершенствованию», для реализации которого был издан Приказ Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека № 57 от 18.02.2010 г. [32, 67]. Так как до сих пор не существует единого руководства по оценке радиационных рисков, которое наряду с руководством по оценке химических рисков являлось бы базовым документом по оценке влияния радиационного фактора на здоровье, приходится обращаться к множеству работ, в которых представлены различные методы определения относительного риска. Например, в статьях Кононенко Д.В. особое внимание отдается 4 моделям, которые разберем более подробно [31].

1-модель, предложенная Национальной академией наук США (United States National Academy of Sciences, NAS) в докладе «BEIR VI» (1999 г.) [118]

2-модель «EPA-2003» [123], разработанная в 2003 г. Агентством по охране окружающей среды США на основе модели «BEIR VI».

3-модель «Wismut-2006» [99], разработанная в 2006 г. в Германии также на основе модели «BEIR VI».

4-франко-чешская объединенная модель «FCZ» [109], разработанная в 2003 г.

1. В 115 публикации МКРЗ наиболее часто упоминается модель, предложенная Национальной академией наук США (United States National Academy of Sciences, NAS) в докладе Шестого комитета по биологическому ионизирующему излучению (Biological Effects of Ionizing Radiation) «BEIR VI» (1999 г.) [118]. Комитет BEIR VI, был сформирован в 1994 году, чтобы

пересмотреть риск воздействия на здоровья, вызванного воздействием радона в домах при этом был использован самый прямой способ оценки риска, связанный с радоном в домах, обследовали показатели радона среди людей, страдающих раком легких и сравнивали их с экспозицией среди людей у которых не развился рак легких, исследования не дали окончательный ответ [118].

Комитет BEIR VI решил использовать информацию о раке легкого от исследований горняков, которые более подвержены воздействию радона. В частности был представлен анализ, состоящий из 11 когорт шахтеров который насчитывает 68000 мужчин, из которых 2700 умерли от рака легких [118]. Далее была описана зависимость смертности от рака легких и получены две модели риска развития рака легких от воздействия радона.

При преобразовании рисков радона из шахт в дома комитет столкнулся с несколькими проблемами:

1) Большинство горняков получили облучение радона, которое было в среднем, во много раз выше, чем у людей в большинстве домов. Было решено, что риск развития рака легких увеличивается линейно по мере увеличения экспозиции.

2) Большинство шахтеров в исследованиях курильщики, а также все вдыхают пыль и другие загрязняющие вещества в шахтах.

3) Почти все шахтеры мужчины.

Комитет использовал информацию о шахтерах и дополнил ее информацией из лабораторных исследований о том, как радон вызывает рак легких. Затем совместил с фактами о численности населения США, включая измерения уровней радона в домах и оценку количества смертей от рака легких из-за радона в них. Этот обзор привел к выбору линейной беспороговой связи между риском рака легких и воздействием радона, однако комитет признал, что другие отношения, в том числе пороговые и нелинейные отношения, не могут быть исключены с полной уверенностью, особенно на самых низких уровнях воздействия [25].

Несмотря на то, что исследования случай-контроль дают прямую оценку риска для радона в помещениях, полученные оценки в результате этих исследований очень неточны. Особенно если они оценены для некурящих и курящих отдельно, из-за небольшого избыточного риска рака легких. Другим недостатком исследования являются ошибки в оценке воздействия и ограниченный потенциал для изучения модифицирующих факторов, особенно курение сигарет.

Комитет проанализировал данные с помощью модели относительного риска, в которой воздействие радона оказывает мультипликативное влияние на частоту рака легких. В частности, комитет смоделировал избыточный относительный риск, который представляет собой мультипликативное приращение к избыточному риску заболевания за пределами фона. Модель представляет избыточный относительный риск как линейную функцию от экспозиции радоном и его ДПР. Эта модель позволяет влиять на воздействие с гибкостью с течением времени, которое прошло с момента воздействия, с частотой экспозиции и с достигнутым возрастом [31].

Отчет «BEIR VI» предлагал 2 разные модели, различающиеся параметром  $\gamma_z$ . Модель EAC (Exposure-Age-Concentration) предполагает, что риск на единицу экспозиции увеличивается с уменьшением мощности экспозиции до определенного значения. Модель EAD (Exposure-Age-Duration) предполагает, что риск на единицу экспозиции увеличивается с увеличением времени экспозиции до определенного уровня [118]. Предложенные модели связаны между собой и не имеют больших преимуществ друг над другом [31].

Модели риска могут использоваться для прогнозирования риска развития рака легких, связанного с воздействием радона, как для отдельных лиц, так и для всего населения.

В своих расчетах комитет использовал данные смертности от рака легких в 1985-1989 годах и о распространенности курения в США в 1993 году.

Очень полезным выводом может являться, что поправочный коэффициент при переходе от атмосферы урановой шахты к атмосфере в жилище можно принять равным единице, что в свою очередь расширяет возможности данного исследования.

2. Модель «**EPA-2003**», разработанная в 2003 г. Агентством по охране окружающей среды США на основе модели «**BEIR VI**» пересматривает оценки рисков, проводимых для радонового облучения в домах [123].

Данная модель модифицировала и расширила подход, используемый в **BEIR VI**. Во-первых, построена одна модель, которая дает числовые результаты на полпути между тем, что было бы получено с использованием двух предпочтительных моделей **BEIR VI**, во-вторых, отметив, что определение избыточного риска **BEIR VI** эффективно исключает преждевременную смерть, вызванную радоном у людей, которые в противном случае в конечном итоге умерли от рака легких, EPA изменяет расчеты **BEIR VI**, включая все радон-индуцированные смерти от рака легких, в-третьих, EPA использует более подробные данные о распространенности курения и более поздние данные о смертности для своих расчетов, чем использовалось в **BEIR VI**, в-четвертых, в то время как **BEIR VI** оценил дробное увеличение рака легких из-за радона, EPA также дает численные оценки риска на единицу воздействия [124].

EPA пересматривает вопрос о неопределенности оценок рисков. EPA использует альтернативный подход, основываясь на своих оценках неопределенности с использованием предпочтительных моделей **BEIR VI**, с некоторым явным учетом неопределенностей модели. Однако, как и **BEIR VI**, EPA не смогла оценить все соответствующие источники неопределенности.

3. Модель «**Wismut-2006**» была сделана на основе результатов исследования когорты немецких шахтеров, работавших на урановом руднике компании «**Wismut**» с 1946 по 1998 г. [99, 31]. В работе численность когорты составила 59001 человек, средняя продолжительность диспансерного наблюдения – 30,5 лет, в сумме 1801630 человеко-лет, авторы предположили,

что модель ЕАС более предпочтительна, чем ЕАД [31].

Данная работа проводилась для исследования риска смертности от рака и сердечно-сосудистых заболеваний, связанных с радоном.

4. При совместном анализе чешской и французской когорт была разработана Франко-чешская объединённая модель (Franco Czech model «FCZ»), в этом методе моделируется риск, связанный с суммарной экспозицией радона, и учитывается модифицирующее влияние времени после облучения и возраста при облучении как непрерывных переменных [109]. Плюсом данной модели является, что она опирается на периоды работы с наилучшим качеством оценок экспозиции.

Франко-чешская объединённая модель («FCZ») созданная в 2003 г. международным коллективом по контракту с Еврокомиссией сообщает о взаимосвязи между воздействием радона и риском рака легких во французских и чешских когортах шахтеров, численностью в 10100 человек. Горняки из этих двух когорт характеризуются низким уровнем воздействия, измеряемого в течение длительного периода (средняя продолжительность воздействия 10 лет) и хорошим качеством индивидуальных оценок воздействия. Проанализирован модифицирующий эффект качества воздействия на риск. Всего было зарегистрировано 574 смерти от рака легких, что на 187% выше, чем ожидалось, из национальной статистики, этот значительно повышенный риск сильно связан с накопленным воздействием радона, время, прошедшее с момента воздействия экспозиции и возраст при экспозиции, были наиболее важными факторами [123].

Данные представленные в рассматриваемой работе обеспечивают отличную основу для количественной оценки рисков, связанных с хроническим облучением при относительно низкой мощности дозы.

Средняя продолжительность наблюдения превысила аналогичный показатель в совместном анализе 11 когорт горняков (24 года по сравнению с 15). Критерии включения позволили сосредоточиться на шахтерах с высококачественными оценками воздействия и количественно соотносить

воздействие-ответ. Избыточный относительный риск увеличился с кумулятивным воздействием радона и уменьшился с возрастом в момент воздействия и времени с момента увеличения экспозиции. Модель, полученная из этого совместного анализа (FCZ), представляет собой линейную модель, которая учитывает изменяющиеся эффекты возраста при медианном воздействии, а также время со времени медианного воздействия [31].

Большое внимание уделяется избыточному относительному риску. Поскольку именно с ним можно работать при принятии управленческих решений.

Без документа, на основе которого строится официальная количественная оценка влияния радиационного фактора на здоровье населения, невозможно будет сопоставлять влияние различных факторов на здоровье населения [74].

Рекомендации по контролю за содержанием радона должны включать дополнительно к установлению референсного уровня также строительные нормы и правила, инструкции по процедуре измерения и другие соответствующие компоненты национальной программы контроля радона [9].

Именно для радона нет методологии расчёта риска, но для него вполне подходит оценка риска здоровья населения при влиянии химических веществ, загрязняющих окружающую среду [57, 78] которая подразумевает выполнение следующих необходимых этапов 1) идентификацию опасности; 2) оценку зависимости «доза–ответ»; 3) оценку экспозиции; 4) характеристику риска; 5) в отдельный этап можно выделить применяемую на стадии управления риском сравнительную характеристику потенциальной опасности среды помещений в зданиях города Владимира от радонового облучения. Все этапы можно разделить на отдельные пункты и адаптировать их к данной работе.

## Выводы к главе 1

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 [78, 48, 15, 49] 2) правомерность применения показателей радиационного риска и ущерба как интегральных критериев оценки радиационной опасности среды помещений от радонового облучения в организации и в регионе [58, 71, 75, 28] 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 [9, 74, 32].

## **Глава 2 ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЪЁМНОЙ АКТИВНОСТИ РАДОНА И ЕГО ДОЧЕРНИХ ПРОДУКТОВ РАСПАДА**

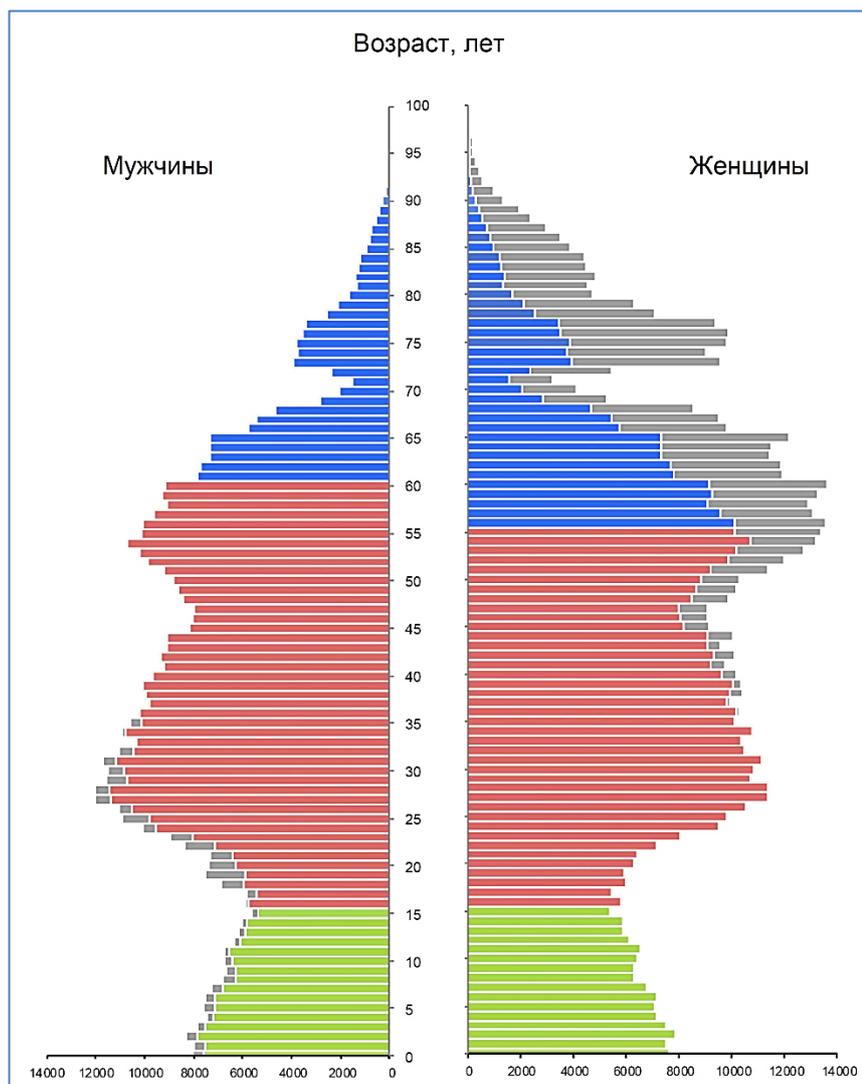
### **2.1 Объекты обследования**

Объект исследования – усредненное число населения г. Владимир примерно 350 тыс. чел. (на 2014 г.). Город Владимир (рисунок 2.1) находится в России и является административным центром Владимирской области, он расположен в основном на левом берегу реки Клязьмы и находится в 176 километрах к востоку от Москвы. 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 разнообразен. На территории города грунты сформированы на серых лесных и дерново-подзолистых почвах. Крупные города до 70-90% поверхности закрыты асфальтобетоном и иным искусственно созданным покрытием. Площадь города 124,59 км<sup>2</sup>. Климат умеренно-континентальный. Средняя годовая температура воздуха во Владимире составляет +3,9 °С. Продолжительность периода со средней суточной температурой воздуха  $\leq 0$  °С составляет 148 сут. Город относится к зоне влажного климата. Годовая относительная влажность составляет 76 %. Снег случается 122 дня за год, а дождь идет в среднем около 135 дней, осадков выпадает 585 мм. Средняя годовая скорость ветра составляет около 4 м/с. В годовом ходе среднее месячное давление изменяется от 991 мбар в июле до 998 мбар в холодные месяцы. Пределы колебания атмосферного давления из года в год средних годовых величин невелики (992...998 мбар).



Рисунок 2.1. Город Владимир

Особенностью популяции трудоспособного населения (Рисунок 2.2) 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. На территории города насчитывается около 2800 зданий, а численность экспонируемой популяции, т.е. популяции проживающих и работающих на первых этажах зданий оценивается нами величиной 76890 человек.



- - мужчины и женщины 0-15 лет
- - мужчины 16-59 лет, женщины 16-54 года
- - мужчины 60 лет и более, женщины 55 лет и более
- - разница между численностью мужчин и женщин

Рисунок 2.2. Возрастно-половая структура населения на 2014 год [7]

Некоторую информацию можно получить из опубликованных данных Роспотребнадзором [76]. По материалам доклада [82] на участке площадью 40 м<sup>2</sup> в лесопарке граничащий с территорией стадиона МОУ СОШ №32 с мощностью эквивалентной дозы гамма-излучения (МЭД ГИ) 0,35мкЗв/час, территория старой промышленной свалки на выезде из города Владимира в сторону города Боголюбово, обнаружено 27 локальных повышений МЭД ГИ интенсивностью излучения в наиболее активных точках составляющую от 1,06 до 37,0 мкЗв/час обусловленную загрязнением техногенными

радионуклидами, которые появились из за производств в 60-х годах XX века использующих в технологии светосостав постоянного действия на основе Ra-226. Других радиационных аномалий в 2014 году на территории Владимира не обнаружено.

В государственном докладе Управления Роспотребнадзора представлен предварительный анализ радиационно-гигиенической паспортизации за 2009 год показывающий, что в структуре коллективных доз облучение населения Владимирской области, наибольший вклад вносят природные и медицинские источники ионизирующего излучения, из них в общей структуре облучения, как примерно в целом по России, так и во Владимире - 69,8%, приходится на природные источники, за счет медицинского облучения - 30%, при этом на другие источники приходится всего 0,2% [11].

Уровни облучения населения изотопами радона, а также гамма-излучением природных радионуклидов определяют радиационную обстановку в жилых, общественных и других зданиях, в которых люди проводят большую часть времени [60, 63]. Облучения населения природными источниками ионизирующего излучения формируется за счет природных радионуклидов, содержащихся в местах пребывания населения которые вносят значимый вклад в дозу облучения населения от 52% до 93% [82, 66, 29].

Превышений гигиенических нормативов в зданиях, которые были обследованы за период 2007 - 2009 годы не зарегистрированы, а средние значения ЭРОА радона находятся в пределах 25,0 - 37,0 Бк/м<sup>3</sup> [11].

В 2014 году радиоактивных загрязнений во Владимире не обнаружено, но обнаружены превышения по содержанию радона на земельном участке под размещение гостиничного комплекса города Владимир, стадион «Торпедо» [82].

Наличие групп населения с эффективной дозой за счет природных источников выше 5 мЗв/год на территории Владимира не выявлено [82].

Не маловажным в облучении населения является гамма-излучение

природных радионуклидов, содержащихся в строительных материалах и конструкциях зданий [68], а также рассеянных в окружающей среде [60]. Хотя строительные материалы в целом имеют второстепенное значение для облучения радоном, но в некоторых случаях могут быть источником радона, кроме того, обычно единственным источником торона в воздухе помещения является торий в строительных материалах [110]. В докладе [11] говорится, что в период с 2007 года по 2009 год обследовали основных производителей строительных материалов и изделий во Владимире и Владимирской области в целом, а также импортная продукция строительных материалов и минерального сырья, которая исследовалась на содержания природных радионуклидов радия-226, тория-232 и калия-40 с определением нормируемой НРБ-99/2009 эффективной удельной активности (Аэфф), при этом было выявлено, что продукция местных производителей по нормам НРБ-99/2009 эффективной удельной активности относится к 1 классу и не превышает 370 Бк/кг, что позволяет использовать продукцию без ограничения по радиационному признаку [52]. Наибольшие значения Аэфф обнаружены в огнеупорных изделиях изготовленных в Китае [11]. В 2014 году все исследованные строительные материалы и сырье относились к 1-му классу и могли использоваться в строительстве без ограничений [82].

Иногда весомым является и внутреннее облучение людей за счет перорального поступления природных радионуклидов, содержащихся в воде источников питьевого водоснабжения и продуктах питания [60].

Перечисленные природные источники излучения в основном и определяют радиационную обстановку на территории населенных пунктов [60]. Иногда люди получают большую дозу облучения от природных источников из-за специфики работ некоторых предприятий, но на территории Владимира отсутствуют предприятия, в которых по характеру их деятельности возможно повышенное облучение работников природными источниками [82].

По данным радиационно-гигиенической паспортизации, медицинские

облучения занимают 2 место в общей структуре облучения после естественных источников [11].

В 2009 году вклад в коллективную дозу от медицинского облучения ожидался на уровне 30%, что составит 0,70 мЗв/чел. в год, средняя доза по Российской Федерации за 2007 год - 0,72 мЗв [11].

## 2.2 Предмет исследования

Предмет исследования является радиационная опасность среды помещений для здоровья населения от радонового облучения в зданиях на территории г. Владимира (рисунок 2.3). В целом этапы настоящего исследования соответствуют рекомендациям Р 2.1.10.1920-04 из которого берем этапы оценки риска для здоровья населения, ICRP Publication 103 где наиболее интересна схема оценки риска, ICRP Publication 115 в которой показаны коэффициенты риска, ICRP Publication 126 излагает требования референтных уровней, а основой настоящего исследования явилась методология анализа риска для здоровья, реализованного с применением принципов, методов и критериев эпидемиологии, медицинской демографии и радиационной безопасности [78, 108, 110, 109].



Рисунок 2.3. Проведение измерений

В публикации МКРЗ 103 рекомендуют брать верхний референтный уровень индивидуальной дозы равный 10 мЗв (эффективная доза, по согласованию, соответствующая концентрации радона  $600 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$  в жилых помещениях и  $1500 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$  для производственных), а выше этого уровня следует рассматривать как составляющую профессионального облучения [108]. Принимая во внимание новые данные в публикации МКРЗ 115 [109] были снижены верхние значения референтного уровня для радона в жилищах с  $600 \text{ Бк}/\text{м}^3$  до  $300 \text{ Бк}/\text{м}^3$ , а с учетом того, что длительность пребывания в домах и на рабочих местах отличается примерно в три раза, то на рабочих местах рекомендуют  $1000 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ . В свою очередь Комиссия МКРЗ в 126 настоятельно рекомендует установить национальный производный референтный уровень в разумно достижимо низком диапазоне от 100 до  $300 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$  [110].

Оценка риска здоровью при анализе радиационной опасности среды помещений для здоровья населения от радонового облучения подразумевает выполнение, как правило, следующих этапов [57, 78]: идентификация опасности; оценка зависимости «доза–ответ»; оценка экспозиции; характеристика риска. Заключительным этапом анализа является 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.

В данной работе мы рассматриваем только радон, что упрощает использования данного метода, поскольку мы знаем определяемое вещество.

Идентификация опасности (Hazard identification) – началом процедуры оценки риска для здоровья будет попытка выявить все возможно опасные факторы и посмотреть на сколько они корректны, не маловажным является проверка воздействия эффектов при определенных условиях на организм людей [78].

Первым пунктом идентификации опасности является выявление источников поступления загрязнения. Вторым пунктом идет идентификация всех загрязняющих веществ. Третьим пунктом будет характеристика возможно негативных эффектов и оценка доказательств возникновения и прогрессирования их у человека. Четвертым пунктом определяются возможные маршруты экспозиции. Пятым пунктом будут определения важнейших для дальнейшего исследования веществ, приоритетных путей их воздействия, включая необходимые загрязненные среды и маршруты поступления веществ в организм человека. Шестым пунктом определяются те негативные последствия, которые могут вызываться приоритетными веществами при исследуемых путях воздействия, продолжительности экспозиции и маршруты их проникновения в организм человека. Седьмой пункт содержит обобщённые сведения и их достоверность о загрязнение окружающей среды и находящихся в ней объектов, а также решения о дополнительном сборе информации и уровнях веществ в различных условиях. Восьмым пунктом будет подбор данных о количественных критериях, нужных для дальнейшего рассмотрения риска здоровью (референтные дозы и уровни, факторы канцерогенного потенциала) [78].

В заключение первого этапа можно сказать, что идентификация опасности имеет скрининговый характер, основной задачей которого является нахождение наиболее важных веществ, анализ которых позволяет с достаточной надёжностью охарактеризовать уровни риска, возникновения заболеваний, их причины. Данная информация будет использоваться для второго этапа оценки зависимости «доза (концентрация) – ответ» и планирования исследований по оценке экспозиции.

Доза (Dose) – «основная мера экспозиции, характеризующая количество вещества, воздействующее на организм» [78].

Ответ (Response) – доля человеческой популяции или популяции лабораторных животных, проявляющая определённую неблагоприятную реакцию на определённую дозу вредного фактора.

Зависимость «доза-ответ» (Dose-response relationship) – «корреляция между уровнем экспозиции (дозой) и долей экспонированной популяции, у которой развился специфический эффект» [78].

Целью этого этапа будет анализ и обобщение всей доступной информации о гигиенических нормативах, безопасных уровнях воздействия (референтных дозах и концентрациях), критических органах/системах и негативных эффектах, а также оценка применимости этих данных для решения задач по оценке риска.

Анализ зависимости «доза-ответ» рассматривает последствия после воздействия изучаемого фактора, также рассматривает влияние различных уровней и их изменения.

Международная методология оценки риска предполагает, что этап оценки зависимости «доза – ответ» сильно отличается для канцерогенов и не канцерогенов. В данной работе рассматривается только канцерогенные эффекты.

Зависимость «доза-ответ» для канцерогенов является беспороговой величиной, поскольку вредный эффект может наступить при сколь угодно малой дозе, причем для разных веществ. Вероятность наступления негативного эффекта различны. Также нельзя забывать, что данное понятие даст значимые результаты только для популяции в целом, поскольку для отдельной особи результат может проявиться, как при воздействии крайне малых доз так и не проявится при смертельных уровнях, причем в целом должна наблюдаться тенденция увеличения числа пострадавших особей с увеличением дозы.

Эффективная доза облучения – величина, используемая как мера биологического ущерба от возникновения отдаленных последствий облучения всего тела человека и отдельных его органов и тканей с учетом их радиочувствительности. Представляющая совокупность эквивалентной дозы в органах и тканях на соответствующие взвешивающие коэффициенты. Эффективная доза позволяет привести случаи неравномерного облучения

тканей и органов человека к эквивалентному по ущербу равномерному облучению с равными эффективными дозами, которым соответствуют равные ущербы. Эффективную дозу можно рассматривать как меру радиологического ущерба, не учитывая возможность реализации этого ущерба в виде появления у облученного какого-то заболевания в оставшийся период жизни. Единицей эффективной дозы является зиверт (Зв). Эффективная доза, вычисляемая с использованием тканевых весовых коэффициентов, учитывает относительный вклад в суммарный ущерб здоровью популяции таких радиологических последствий облучения, как онкологические заболевания и наследственные эффекты [77].

Подводя итоги 2 этапа можно сказать, что оценка канцерогенного риска воздействия факторов окружающей среды должна осуществляться с привлечением новейших научных данных о степени доказанности их канцерогенности для человека и величине факторов канцерогенного потенциала, полученных из наиболее приоритетных источников научной информации.

На третьем этапе рассматривается экспозиция (воздействие).

Экспозиция человека ДПР радона (индивидуальная ингаляционная экспозиция) – это главная количественная характеристика воздействия радона на человека. По сути, она равна произведению концентрации скрытой энергии альфа излучения во вдыхаемом воздухе на время воздействия. Точнее определяется как интеграл скрытой энергии по времени воздействия.

Первым пунктом оценки экспозиции даётся характеристика факторам риска. Окружающие условия необязательно являются причиной факторов риска, но могут способствовать проявлению заболеваний.

Факторы риска (Risk factors) – «факторы, провоцирующие или увеличивающие риск развития определенных заболеваний; некоторые факторы могут являться наследственными или приобретенными, но в любом случае их влияние проявляется при определенном воздействии» [78].

Вторым пунктом будет маршрут воздействия (Exposure pathway) –

«путь химического вещества от источника его образования и поступления в окружающую среду до экспонируемого организма» [78].

Наиболее часто третий пункт оценки экспозиции разделяют на стадию оценки воздействующих концентраций и расчета поступления.

Оценка экспозиции – один из важнейших и, как правило, наиболее точный из всех этапов исследования риска. Оценка экспозиции одновременно представляет собой интегральный компонент всего процесса – как оценки риска, так и управления риском.

Четвертый этап реализует характеристику риска (Risk characterization), которая позволяет объединить данные о вредных эффектах веществ, уровне экспозиции, характеристиках зависимости «доза-ответ», рассмотренные ранее, с задачей качественной и количественной оценки риска, рассмотрение различных негативных эффектов для здоровья людей [78].

Плюсом подхода, применяемого на методологии оценки риска здоровью, несомненно, является возможность рассмотрения как прошлых, так и будущих ситуаций и построения на их основе прогнозов. Данная система позволит применять управленческие решения на основе результатов оценки рисков, тем более, что это соответствует современному тренду перехода от предельно допустимых уровней к оценке риска.

Дополнительный абсолютный риск – выражение для риска, основанное на предположении, что дополнительный риск от радиационного облучения добавляется к основному (фоновому) риску, причем приращение зависит от дозы, но не зависит от естественного основного, или фонового риска [109]. Для радонового облучения рассчитывается пожизненный дополнительный абсолютный риск возникновения рака легкого.

Радиационный риск – вероятность возникновения радиационно-индуцированного стохастического эффекта с учетом модификаций данного параметра, позволяющих проводить оценки для отдельных компонент радиационного вреда при оценке тяжести последствия облучения [108].

Форма характеристики риска может быть разной от описательной до

полуколичественной и даже количественной, но чаще всего используется комбинация этих подходов. Характеристика риска связывает оценку риска для здоровья и управления риском.

Отдельным пятым этапом выделили применяемую на стадии управления риском сравнительную характеристику потенциальной опасности среды помещений в зданиях г. Владимир от влияния радона.

### **2.3 Оборудования для определения объёмной активности радона**

Существует множество приборов и методик для нахождения различных уровней радона [36, 62, 13]. Методики нахождения ОА радона и его ДПР в воздухе можно разбить на три группы [3]. Измерениями называют определения значения физической величины опытным путем с применением специальных технических средств [42].

Быстрые измерения с отбором проб воздуха - проба отбирается за короткий отрезок времени, после чего анализируется, данный метод очень удобен для определения разового текущего значения ОА радона, а также для нахождения средних уровней ОА радона и его ДПР она применима к поиску источника, что позволяет оперативно принимать управленческие решения [3].

Непрерывные измерения - проба одновременно отбирается и анализируется, это позволяет наблюдать уровень в текущий момент времени, обычно такой способ мониторинга используют при необходимости постоянного контроля или непрерывного наблюдения [3].

Интегральное измерение - длительная экспозиция от нескольких дней до года, данная методика дает среднюю ОА за измеренный период времени [3]. Такой метод позволяет получить более точное среднее значение.

Результаты измерений должны содержать величину измеренного параметра и оценку погрешности его определения с доверительной вероятностью 0,95 [103].

Такие приборы как AlphaGUARD PQ, Genitron, PPA-01M-01, PPA-01M-03, PPA-04 похожи между собой. Радиометры типа PPA-01M и PPA-04 работают на основе регистрации альфа-излучения продуктов распада радона и торона с использованием электростатического осаждения ионов ДПР с последующим спектрометрическим анализом проб [2]. Радиометр PPA-01M-01 «Альфарад» часто применяется в государственных органах контроля и надзора, а модель радиометра PPA-01M-03 расширяет возможности и позволяет измерять метеорологические условия [3]. Метод электроосаждения обладает селективными свойствами и позволяет отдельно увидеть вклад в ОА радона и торона [41].

Часто среднюю ОА находят с помощью измерения сорбции на активированном угле [3]. Построена методика на том, что радон хорошо поглощается активированным углем из атмосферы. Измерения, таким образом, имеют свои преимущества, такие как сравнительно невысокая цена и простота изготовления. Полученные данные показывают усредненное значение объёмной активности радона за несколько дней. Основным недостатком является то, что абсорбент надо оставлять на время нескольких суток, что иногда является невозможным либо проблематичным. Примером прибора использующий такой вид измерения может являться комплекс измерительный для мониторинга радона «КАМЕРА» НТЦ «НИТОН», Россия.

Применения твердотельных трековых детекторов. Они работают на возможности  $\alpha$ -частиц образовывать треки при преодолении всевозможных веществ особенно диэлектриков, такой трек может быть выявлен при помощи особых растворов, они создают на поврежденных участках появления пустотелых цилиндрических или конических путей, идущих вглубь вещества их называют выявленными треками, их можно подсчитать с использованием особого искрового счетчика треков [3]. Данный метод использует Комплект «ТРЕК-РЭИ-1М» ГК РЭИ, Россия.

Метод основанный на сборе свободных или присоединенных к

аэрозолям атомов ДПР позволяет определить уровень ЭРОА, путем прокачки необходимого объема воздуха через фильтр за определенное время с дальнейшим измерением активности фильтра [3]. Для этого метода применяются такие приборы как РАА-10 ООО «НТМ - Защита», Россия, РАМОН-02 ТОО «СОЛО-ЛТД», г. Алматы, РАА-20П2 «ПОИСК», НТЦ «Нитон», Россия, РАА-3-01, НТЦ «Амплитуда», Россия. Обследования общей активности имеют преимущества в простоте аппаратуры, но нуждаются в длительных временных затратах [3].

Измерения в основном проводились радиометром радона РРА-01М-01. Поскольку в данной работе имеется сравнительный анализ с данными представленными измерений ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Владимирской области», имеется необходимость описать основные приборы используемые ими в измерении радона. Такими приборами являются измерительный комплекс для наблюдения за радоном «Камера-01» и радиометр радона РРА-01М-03 с пробоотборным устройством ПОУ-04.

Измерительный комплекс для мониторинга радона «Камера-01» предназначен для измерения средней за 1-6 суток ОА радона в воздухе помещений, измерение ОА радона в пробах воздуха. В Комплексе для измерений ОА радона используется активированный уголь как абсорбент для удержания радона и последующего его определения в лаборатории. Применение определения активности радона, с помощью абсорбентов не отличается от типа пробоотбора и похож для всех методов измерений на основе активированного угля. Пределы допускаемой основной относительной погрешности измерений  $\pm 30\%$ . При обследовании использовался метод пассивной сорбции измерений средней ОА радона. Диапазон измерений средней ОА радона в воздухе помещений при данном методе от 20 до 100000 Бк/м<sup>3</sup>.

Радиометр радона РРА-01М-03 предназначен для проведения измерений ОА радона и количества распадов <sup>216</sup>Ро в воздухе жилых и рабочих помещений, а также на открытом воздухе в пределах

эксплуатационных параметров радиометра. Предел допускаемой основной относительной погрешности во всем диапазоне измерения  $\pm 30\%$ .

Пробоотборное устройство ПОУ-04 совместно используется с радиометрами радона серии РРА. Устройство позволяет реализовать такие режимы измерений, как измерение ОА радона в неблагоприятных метеоусловиях, при большом определении экспрессным методом ОА радона в стационарных условиях. Прибор измеряет ОА радона в воздухе в пределах 30 - 30000 Бк/м<sup>3</sup>.

Радиометр РРА-01М-01 (рисунок 2.4) применяется для экспрессных измерений ОА радона в воздухе. Уровни измерения ОА радона, составляет от 20 до  $2.0 \cdot 10^4$  Бк·м<sup>-3</sup>. Предел допускаемой основной относительной погрешности, в поддиапазоне от 20% до 100 Бк·м<sup>-3</sup>,  $\pm 30$  в поддиапазоне от 100 до  $2.0 \cdot 10^4$  Бк·м<sup>-3</sup>,  $\pm 20\%$ . Чувствительность радиометра, не менее  $1.2 \cdot 10^{-4}$  с<sup>-1</sup>·Бк<sup>-1</sup>·м<sup>3</sup>. Измерение ОА радона основано на электростатическом осаждении заряженных ионов <sup>218</sup>Po из отобранной пробы воздуха на поверхность датчика. ОА радона определяется по количеству зарегистрированных альфа-частиц при распаде атомов <sup>218</sup>Po, осевших на датчик. Результаты измерений выводятся на матричный жидкокристаллический дисплей.



Рисунок 2.4. Радиометр радона «Альфарад»

Радиометр имеет различённые режимы измерения, но фактически все измерения проводились в режиме Air1 (рисунок 2.5). В котором отбор и измерение пробы воздуха производится в течение 20 минут. В этом режиме осуществляется отбор пробы воздуха с помощью встроенной воздуходувки, измерение ОА радона. Если полученное значение ниже предела нижней границы диапазона измерений ОА радона, то радиометр по окончании измерений покажет  $Q < 20 \text{ Вк}/\text{м}^3$ .



Рисунок 2.5. Отображаемая информация радиометр радона «Альфарад»

Технические характеристики используемых приборов соответствовали требованиям МУ 2.6.1.2838-11 [72].

#### **2.4 Методы измерения ОА радона и его ДПР**

Проанализированы результаты около 200 замеров по данным обследований 60 помещений, находящихся в различных зданиях, на территории 3 административных районов г. Владимир (рисунок 2.6). Измерения в пригородах не учитывались. Также были включены данные более 300 замеров проводимых в ФГУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Владимирской области» полученных с 2009-2015 год в различных точках г. Владимира на первых подвальных и полуподвальных этажах зданий различного назначения.

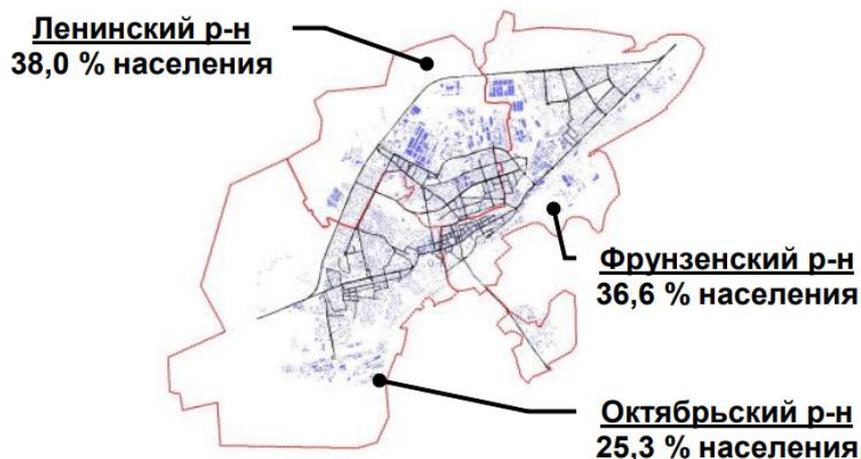


Рисунок 2.6. Распределения население административных районов города Владимира [80]

Поскольку люди работают и живут в помещениях, где влияние радона является случайным, радон контролируется не путем регулирования индивидуальных облучений, это обусловлено довольно большой сменой различных помещений в течение жизни, а путем контроля помещений для обеспечения общей защиты присутствующих в них людей [110]. После окончания строительства, капитального ремонта или реконструкции, сдающихся в эксплуатацию зданий и сооружений проводится контроль содержания радона [72, 59].

Оценивают ЭРОА радона в воздухе по показаниям исследований ОА радона при введении коэффициент  $F_{Rn}$ , который определяет сдвиг радиоактивного равновесия между радоном и его короткоживущими ДПР в воздухе [71, 20].

Измерения проводились в соответствии с рекомендациями из методических указаний МУ 2.6.1.2838-11. Наличие установленных и закрытых окон и дверей, включенная в штатном режиме система вентиляции с механическим побуждением при ее наличии, а также окончание или приостановление работ [72, 104].

Измерения ЭРОА радона в помещениях проводились выборочно, отдавая предпочтения первым этажам, полуподвальным и подвальным помещениям. Число помещений выбиралось в зависимости от возможностей

обследования.

Учитывались при проведении измерений строительные и конструктивные характеристики зданий, от которых зависит содержания радона в воздухе помещений, такие как этажность здания, материалы из которого построено здание, наличие подвалов под зданием, наличие вентиляции, и других характеристик.

В методических указаниях [72] рекомендуется включать помещения в которых люди проводят наибольшее количество времени. Это подтверждается и в методических рекомендациях [45] в которых можно прочесть, что в каждой обследуемой жилой единице измерения ОА изотопов радона в воздухе проводятся в помещении с максимальной длительностью пребывания людей, как правило, в спальнях.

Наибольшая вероятность получить высокие значения радона в здании это подвальные помещения (рисунок 2.7), поэтому в первую очередь надо проводить измерения именно в них. Также в методических указаниях [72] говорится, что результаты таких измерений используются для корректировки объема контроля и выбора помещений для обследования это выражается в значениях при ЭРОА изотопов радона в воздухе подвальных помещений превышающих  $100 \text{ Бк/м}^3$ .



Рисунок 2.7. Проведение измерений в подвале

Следует отметить рекомендации по отбору проб из методических

указаний [72] в которой говорится, что в каждой обследуемом помещении проводится одно измерение ЭРОА изотопов радона, отбор проб воздуха при быстрых измерениях ЭРОА изотопов радона или установку квазиинтегральных или интегральных средств измерений ОА радона производят на высоте одного, двух метров от пола не ближе полуметра от стен помещения.

Измерения среднегодового значения ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений производственных зданий и сооружений проводят, так же как и для жилых помещений, единственным отличием будет применения значения ЭРОА изотопов радона не  $100 \text{ Бк/м}^3$  как в жилых помещениях, а  $150 \text{ Бк/м}^3$  [72]. После окончания строительства, капитального ремонта или реконструкции производственных зданий и сооружений, среднегодовая ЭРОА дочерних продуктов радона в воздухе помещений должна не превышать  $150 \text{ Бк/м}^3$  [58].

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 [72, 60, 58]. 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.

После получения данных они не просто сравниваются с нормативами, а подлежат дальнейшей обработки. При статистической обработки использовались натуральные логарифмы, а не сами значения ОА поскольку для описания плотности распределения вероятностей регистрации ОА и ЭРОА радона зачастую берётся логарифмически нормальная зависимость.

[103].

Подводя итоги исследования для принятия управленческих решений необходимо знать каков экономический ущерб. Его оценивали через показатели потерь жизненного потенциала от преждевременной смертности и годового валового регионального продукта на душу населения. При расчетах пользовались (Методика расчета медико-социальной и экономической эффективности... утв. Минздравсоцразвития РФ 14.03.2005; МР 5.1.0029-11) [16, 47].

## **Выводы к главе 2**

1. 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.

2. 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. Основой данной работы была методология анализа риска здоровью, 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.

3. Единица исследования – данные измерений ЭРОА радона в помещениях на первых, подвальных и полуподвальных этажах зданий различного назначения в г. Владимир. ОА радона измеряли радиометром радона РРА-01М-01 «Альфарад», измерительным комплексом для мониторинга радона «Камера-01», радиометром радона РРА-01М-03, пробоотборным устройством ПОУ-04.

4. Проанализированы результаты около 200 замеров по данным обследований помещений, расположенных в различных зданиях, на территории 3 административных районов г. Владимир. 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.

5. Заключительный этап анализа представляет собой характеристику опасности среды помещений в постройках города Владимира от радонового облучения, произведенную на основе критериев натурального и экономического ущерба [16, 47].

### **Глава 3 ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАДОНА НА ТЕРРИТОРИИ ГОРОДА**

#### **3.1 Идентификация опасности**

На этапе «идентификация опасности» на основе данных замеров ОА радона в воздухе помещений г. Владимира, проведенных за 7 летний период в зданиях, отобранных методом простого случайного отбора, получены параметры статистического закона распределения значений ЭРОА, которые позволили оценить вероятность регистрации значений ЭРОА радона.

Активность радиоактивного изотопа определяется числом радиоактивных распадов в единицу времени и радон не является исключением.

Распад радона подчиняется закону радиоактивного распада:

$$n = n_0 \cdot \exp(-\lambda' t) \quad (3.1.1)$$

где  $n_0$  первоначальная концентрация ядер,  $\text{м}^{-3}$ ;

$n$  - концентрация ядер радона,  $\text{м}^{-3}$ ;

$t$  – время;

$\lambda'$  – постоянная распада,  $\text{с}^{-1}$ .

Постоянная распада является обратной величиной средней продолжительности жизни ядер радона и связана с периодом полураспада  $T_{1/2}$ :

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda'} \quad (3.1.2)$$

$T_{1/2}$  – период полураспада, с.

выразив  $\lambda'$  получим:

$$\lambda' = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \quad (3.1.3)$$

ОА радона, то есть число актов распада на единицу объема  $q$  [Бк/м<sup>3</sup>], связана со скоростью распада:

$$\frac{dn}{dt} = -n_0 \lambda' \cdot \exp(-\lambda \cdot t) \quad (3.1.4)$$

отсюда выводим формулу:

$$q = n \cdot \lambda' \quad (3.1.5)$$

где  $q$  - единица объема [Бк/м<sup>3</sup>].

Следовательно зная ОА  $q$  радона можно рассчитать среднюю концентрацию радона  $n$  по соотношению:

$$n = \frac{q}{\lambda'} = \frac{q \cdot T_{1/2}}{\ln 2} \quad (3.1.6)$$

Опасность представляет не только радон, но и его короткоживущие ДПР которые являются металлами <sup>218</sup>Po (RaA); <sup>214</sup>Pb (RaB); <sup>214</sup>Bi (RaC); <sup>214</sup>Po (RaC') они в свою очередь не могут находиться в атмосфере в свободном состоянии долго и присоединяются к другим нерадиоактивным аэрозолям (пыль, дым, туман и др.), находящимися в атмосферном воздухе, свободные ДПР радона присоединяются к ним, образуя радиоактивные аэрозоли. Поэтому основная доза облучения органов дыхания человека определяется дочерними продуктами радона.

В случаи с радоном равновесное состояние с его дочерними продуктами распада может достигаться в замкнутых, практически невентилируемых помещениях. Тогда концентрация радона и его ДПР будет определяться системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} n_{Rn} = n_{Rn,0} \cdot \exp(-\lambda'_{Rn} t) \\ n_{RaA} = \frac{n_{Rn} \lambda'_{Rn}}{\lambda'_{RaA}} \\ n_{RaB} = \frac{n_{RaA} \lambda'_{RaA}}{\lambda'_{RaB}} \\ n_{RaC} = \frac{n_{RaB} \lambda'_{RaB}}{\lambda'_{RaC}} \\ n_{RaC} = \frac{n_{RaC} \lambda'_{RaC}}{\lambda'_{RaC'}} \end{array} \right. \quad (3.1.7)$$

На практике ДПР радона в воздухе помещений, как правило не находится в равновесии. Это обусловлено проветриванием помещений, осаждением аэрозольных частиц, содержащие присоединенные ДПР радона и т. д. В этом случае ОА радона не может полностью отражать радиационную опасность контролируемой атмосферы. Радиационную опасность реальной неравномерной смеси радона и его ДПР характеризуют некоторой равновесной смесью, энергия которой эквивалентна скрытой энергии ДПР радона данной неравновесной смеси. Поэтому вводится ЭРОА радона  $A_{Rn}$ :

$$E'_a = 3,44 \cdot 10^4 \cdot A_{Rn} \quad (3.1.8)$$

или:

$$A_{Rn} = 2,9 \cdot 10^{-5} E'_a \quad (3.1.9)$$

Где  $A_{Rn}$  значения ЭРОА радона (Rn), Бк/кг<sup>3</sup>.

$E'_a$  - энергия альфа излучения

ЭРОА неравновесной смеси ДПР в воздухе именуют ОА радона такой неравновесной смеси радона с его короткоживущими ДПР, которая имеет такой же уровень скрытой энергии альфа активности короткоживущих ДПР, как и данная неравновесная смесь:

$$A_{Rn} = 0,10 \cdot q_{RaA} + 0,52 \cdot q_{RaB} + 38 \cdot q_{RaC} \quad (3.1.10)$$

Данная формула фигурирует в МУ 2.6.1.2838-11 [71].

Где  $q_{RaA}$ ,  $q_{RaB}$ ,  $q_{RaC}$  - ОА в воздухе соответственно  $q_{RaA}$  ( $^{218}\text{Po}$ ),  $q_{RaB}$  ( $^{214}\text{Pb}$ ),  $q_{RaC}$  Бк/м<sup>3</sup>.

В условиях радиоактивного равновесия радона и его ДПР выполнялось бы следующее равенство для ОА  $q_{RaA} = q_{RaB} = q_{RaC}$  и поэтому ЭРОА соответствует ЭРОА радона ( $A_{Rn}$ ). Даже при отсутствии радиоактивного равновесия между радоном и его ДПР допускается проводить оценку ЭРОА по результатам измерений ОА радона, но в этом случае для пересчета измеренных данных ОА радона ( $q_{Rn}$ ) в значения  $A_{Rn}$  используется коэффициент  $F_{Rn}$ , характеризующий сдвиг радиоактивного равновесия между радоном и его короткоживущими ДПР в воздухе [71]. Поскольку ЭРОА радона ( $A_{Rn}$ ) всегда меньше ОА радона ( $q_{Rn}$ ) она связана формулой:

$$A_{Rn} = F_{Rn} \cdot q_{Rn} \quad (3.1.11)$$

Коэффициент равновесия для радона в домах различается в довольно небольших пределах (0,3 - 0,6), поэтому для оценки ЭРОА радона проводят измерения ОА радона и найденные значения умножают на среднее значение коэффициента равновесия радона ( $F_{Rn}$ ) [45].

По мнению МКРЗ, для большинства практических задач, связанных с регламентацией радона в жилищах и на рабочих местах, допустимо априорно использовать среднее значение коэффициента равновесия 0,4. В России вентиляция в среднем меньше и часто используется среднее значение  $F_{Rn}=0,5$ , к примеру, данное значение приводят для использования в методических указаниях МУ 2.6.1.2838-11 [72].

Нормами НРБ-99/2009 [119] регламентировано содержание радона в воздухе жилых и общественных зданий по величине среднегодовой ЭРОА их дочерних продуктов в воздухе помещений, которая определяется следующим образом:

$$A' = A_{Rn} \quad (3.1.12)$$

где  $A'$  значения ЭРОА (Rn) радона, Бк/кг<sup>3</sup>

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) четкая картина закономерностей распределения радона на территории и в разных временных интервалах отсутствует для большинства городов. [81, 80]; 2) учет отклонений статистики от логнормального закона распределения, связанных с возможной неравнозначностью воздействия на эксхалацию 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 [78].

Исследования помещений на наличие ОА радона показывают как колебания уровней по времени, так и его различные значения в исследуемом воздухе помещений. С учётом инструментальной погрешности измерений набран массив данных ЭРОА радона, найдено распределение частот встречаемости уровней ЭРОА в воздухе помещений в г. Владимир.

Для исключения допущения математических ошибок первоначальные данные рассчитывались в Microsoft Excel, а остальные значения заносились и рассчитывались в среде Mathcad. Mathcad считает данные со всеми значащими цифрами, а выдает их округленными значениями, которые и были представлены в работе.

Идентификацию опасности в данной работе можно разделить на 2 этапа. Первые данные будут получены до аппроксимации значений и построения графика. Вторая половина нахождения после аппроксимации значений и построения графика и является основой для последующих расчетов.

По найденной выборке значений натуральных логарифмов ОА радона была оценена медиана, так как она наиболее хорошо описывает центр распределения результатов, попытка данного вычисления как среднее арифметическое дало бы принципиально неверные значения в данном случае.

Для построения гистограмм необходимо изначально задать

переменные. Первую из них мы можем найти как  $A'_{II}$ . Вторая является распределение степени  $\alpha$ , как некоторая характерная для данного распределения которую изначально задаем 2, характерную для распределения Гаусса. Вычисляем стандартное отклонение  $\sigma$  для значений логарифма ЭРОА изотопов радона.

Центр распределения для значений ЭРОА изотопов радона ( $A'_{II}$ , Бк/м<sup>3</sup>) в городе Владимире определяется по формуле:

$$A'_{II} = (q_{Rn} + \Delta_{Rn}) \cdot F_{Rn} \quad (3.1.13)$$

$A'_{II}$  - центр распределения для ЭРОА изотопов радона;

$\Delta_{Rn}$  - значения погрешности прибора.

В стандартную формулу была добавлена  $\Delta_{Rn}$  для более точных расчетов, каждая величина рассчитывалась отдельно для объёмной активности изотопов радона и их дочерних продуктов распада. Вычисления производились по средствам Microsoft Excel и была построена программа в среде Mathcad для аппроксимации и вычисления различных значений при помощи экспериментальных данных по ЭРОА радона (приложение 1).

Находим центр распределения для значений ЭРОА изотопов радона ( $A'_{II}$ , Бк/м<sup>3</sup>) на территории города Владимира.

$$A'_{II} = (q_{Rn} + 1,16) \cdot 0,5 \quad (3.1.14)$$

Где  $q_{Rn}$  является каждым из значений объёмной активности изотопов радона и дочерних продуктов распада.

Расчет центральной тенденции до аппроксимации для значений ЭРОА производим через экспоненту:

$$A''_{II} = e^{Ln(A'_{II})} \quad (3.1.15)$$

Центр распределения для значений ЭРОА изотопов радона ( $A''_{II}$ , Бк/м<sup>3</sup>) на территории города Владимира были вычислены до аппроксимации через медиану. Значение, найденное с помощью медианы 2,97. Находим необходимое значение через экспоненту равную  $e^{2,97}$ .

$$A''_{\text{ц}} = 19,49 \text{ Бк/м}^3$$

Стандартное отклонение для значений логарифма ЭРОА изотопов радона ( $\sigma$ ) находится по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - x_{\text{ц}})^2}{n-1}} \quad (3.1.16)$$

где  $n$  - количество измерений.

$x_i$  - значение полученного логарифма ЭРОА радона;

$x_{\text{ц}}$  - центр распределения для логарифма ЭРОА радона;

Подставим известные значения в формулу стандартного отклонения для значений логарифма ЭРОА изотопов радона ( $\sigma$ ):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\ln(A_i) - 2,97)^2}{n-1}} \quad (3.1.17)$$

Среднее квадратичное отклонение ЭРОА для  $\ln(A)$  составило  $\sigma = 0,893$ .

Значения до аппроксимации используются как начальные значения в итерационном алгоритме аппроксимации функции.

Классическое интегральное определение гамма-функции описывается следующей формулой:

$$\Gamma(\alpha, z) = \int_z^{\infty} e^{-t} t^{\alpha-1} dt \quad (3.1.18)$$

Поскольку мы задаем  $z$ , вычисляем гамма-функцию  $\Gamma(z)$  с помощью следующей формулы:

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} t^{z-1} \cdot e^{-t} \cdot dt \quad (3.1.19)$$

где  $\sigma$  – стандартное отклонение для значений логарифма ЭРОА изотопов радона;  $\Gamma(z)$  – гамма-функция;  $\alpha$  – постоянная для распределения, показатели степени которого могут принимать как положительные дробные значения.

При  $\alpha < 1$  модель получается с пологими спадами, похожие на распределения Коши. При  $\alpha = 1$  модель совпадает с распределением Лапласа,

при  $\alpha = 2$  – соответствует нормальному распределению Гаусса, при  $\alpha > 2$  модель описывает распределения похожие на трапецеидальные, которые повторяют логистические регрессии, при  $\alpha \rightarrow \infty$  соответствует равномерному распределению. Видно, что показатель степени  $\alpha$  определяет все параметры формы экспоненциальных распределений и следовательно, для плотности вероятности распределения значений ЭРОА.

Распределения значений ЭРОА изотопов радона характеризуется гистограммой, построенной в логарифмическом масштабе (рисунок 3.1).

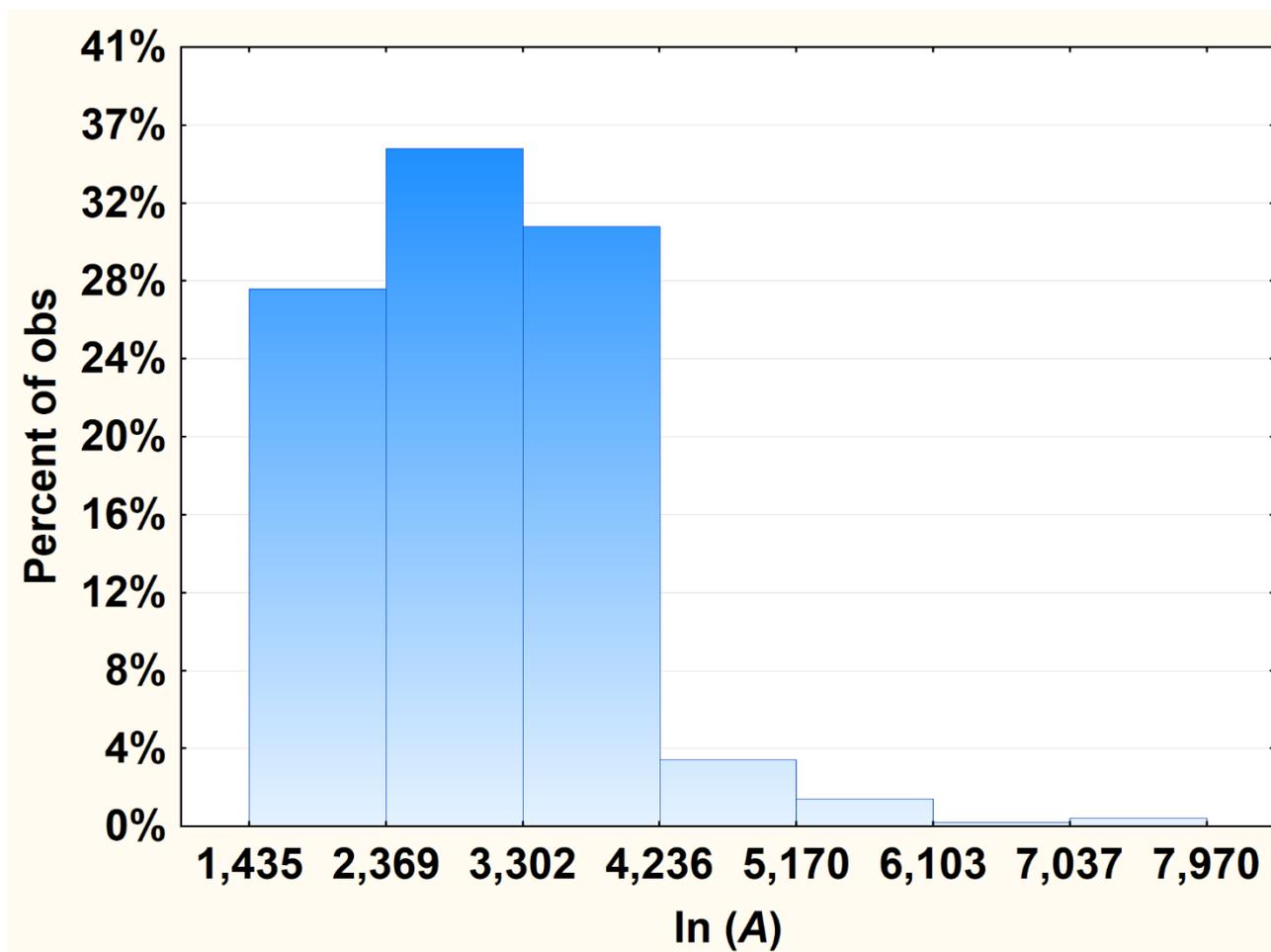


Рисунок 3.1. Гистограмма распределения значений ЭРОА изотопов радона в логарифмическом масштабе

Гистограмма распределения значений ЭРОА изотопов радона удовлетворительно аппроксимируется функцией, относящейся к классу экспоненциальных распределений. В данном случае – это уплощенное распределение типа Шапо, где показатель степени  $\alpha > 2$  (рисунок 3.2).

Данное распределение имеют одновременно плоскую вершину и медленно спадающие «хвосты».

По оси ординат указана доля проб, по оси абсцисс располагаются значения логарифма ЭРОА  $\ln(a)$  радона, полученные через параметры формы экспоненциальных распределений и следовательно, для плотности вероятности распределения значений ЭРОА.

По гистограмме вычисляем среднее квадратичное отклонение (показатель размаха ЭРОА для  $\ln(A)$ ):

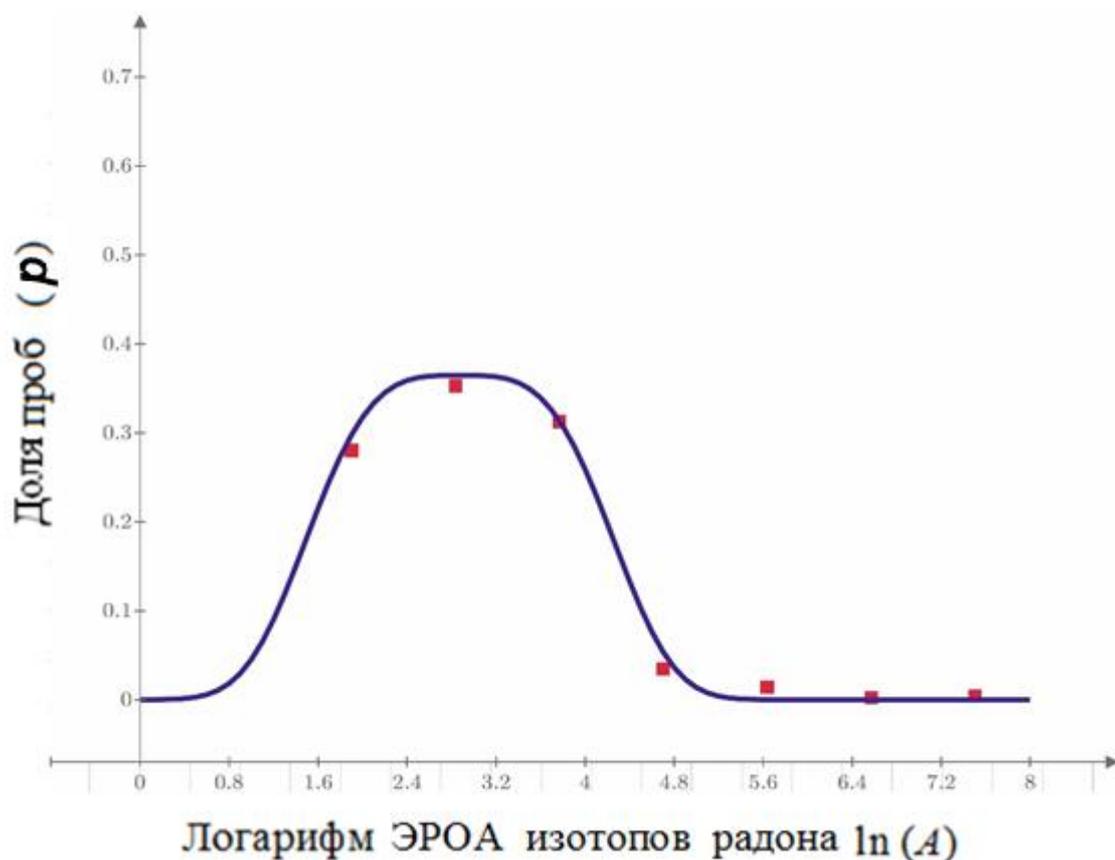


Рисунок 3.2. Аппроксимация гистограммы распределения значений логарифма ЭРОА функцией плотности распределения вероятности  $P(\ln A)$

Красными точками обозначены величины, полученные на основе экспериментальных данных проведенных замеров. Рассматривая данную гистограмму видно, что в логарифмическом масштабе она имеет семеричный вид. Данная тенденция обусловлена тем, что основная доля в городе

Владимире приходится на низкие и средние уровни содержания радона, места с высоким уровнем радона попадаются реже, как и места с крайне низкими уровнями радона.

Выраженная гистограмма распределения частот встречаемости значений ЭРОА, которая аппроксимируется функцией  $pa(a)$ , и по своему виду относится к классу экспоненциальных распределений, описываемых единой аналитической моделью [114]:

$$pa(a) = \frac{\alpha 1}{2 \cdot \lambda a \cdot \sigma a \cdot \Gamma(1/\alpha 1)} \exp\left(-\left|\frac{a-ac}{\lambda a \cdot \sigma a}\right|^{\alpha 1}\right) \quad (3.1.20)$$

Гистограмма распределения частот встречаемости значений ЭРОА удовлетворительно аппроксимируется функцией  $pa(a)$ , откуда распределение значений ЭРОА изотопов радона на территории города Владимира будет иметь вид:

$$pa(a) = \frac{3,563}{2 \cdot \lambda a \cdot \sigma a \cdot \Gamma(1/3,563)} \exp\left(-\left|\frac{a-ac}{\lambda a \cdot \sigma a}\right|^{3,563}\right) \quad (3.1.21)$$

Стандартное отклонение для значений логарифма ЭРОА изотопов радона ( $\sigma a$ ) находим с помощью формулы:

$$\sigma a = \frac{\sqrt{\sum (\ln(A_i) - \ln(A_{\mu}))^2}}{n-1} \quad (3.1.22)$$

Стандартное отклонение для значений логарифма ЭРОА изотопов радона ( $\sigma a$ ):

$$\sigma a = \frac{\sqrt{\sum (\ln(A_i) - 17,7)^2}}{n-1} \quad (3.1.23)$$

$\lambda a$  – коэффициент, определяемый по формуле:

$$\lambda a = \sqrt{\Gamma(1/\alpha 1) / \Gamma(3/\alpha 1)} \quad (3.1.24)$$

Находим  $\lambda a$ :

$$\lambda a = \sqrt{\Gamma(1/3,563) / \Gamma(3/3,563)} \quad (3.1.25)$$

где  $\alpha 1=3,563$  – показатель степени, близкий по виду к логнормальному распределению.

Используя Mathcad узнаем  $\lambda\alpha$ .

$$\lambda\alpha = 1,692$$

Расчет для нижней границы ЭРОА, (Бк/м.куб) производим через экспоненту:

$$A_{\min} = e^{(ac-ka\cdot\sigma a)} \quad (3.1.26)$$

$$A_{\min} = e^{2,873-2,018\cdot 0,9} \quad (3.1.27)$$

$$A_{\min} \approx 2,9$$

$ka$  энтропийный коэффициент.

Расчет центральной тенденции для значений ЭРОА производим через экспоненту:

$$A_{Ц} = e^{(ac)} \quad (3.1.28)$$

$$A_{Ц} = e^{2,873} \quad (3.1.29)$$

$A_{Ц}$  – координата центра распределения для ЭРОА изотопов радона;  $\sigma a$  – стандартное отклонение для значений логарифма ЭРОА изотопов радона после аппроксимации;  $\alpha 1$  – некоторая характеристика для распределения ЭРОА изотопов радона найденная после аппроксимации значений;  $A$ - переменная измерений для значений ЭРОА радона;  $pa(a)$  – распределения для значений ЭРОА изотопов радона;  $ac$  – центр распределения для натурального логарифма ЭРОА изотопов радона.

Значения логарифма центра распределения  $\ln(A_{Ц}, \text{ Бк/м}^3)$  после аппроксимации будут равны 2,873 или  $A_{Ц} = 17,7 \text{ Бк/м}^3$ . Стандартное отклонение для отклонения  $\ln(A) \sigma a = 0,9$ .

После аппроксимации, значение центральной тенденции и стандартного отклонения существенно не меняются, что говорит о правильности данного метода.

Предсказываемая консервативная оценка наибольших значений ЭРОА

изотопов радона ( $A_{max}$ ), относящаяся к рассматриваемой статистике распределения ЭРОА, соответствует верхней оценке ЭРОА и находится по формуле через энтропийный коэффициент  $ka$ :

$$\ln A_{max} = \ln A_{ц} + ka \cdot \sigma\alpha \quad (3.1.30)$$

отсюда

$$A_{max} = \exp(\ln A_{ц} + ka \cdot \sigma\alpha) \quad (3.1.31)$$

Для экспоненциальных распределений энтропийный коэффициент находится однозначно в зависимости от показателя степени  $\alpha$  по формуле:

$$ka = \frac{1}{\alpha 1} e^{1/\alpha 1} \sqrt{\frac{\Gamma(1/\alpha 1)}{\Gamma(3/\alpha 1)}} \cdot \Gamma(1/\alpha 1) \quad (3.1.32)$$

Подставим значения в формулу энтропийного коэффициента ( $ka$ ) ЭРОА радона:

$$ka = \frac{1}{3,563} e^{1/3,563} \sqrt{\frac{\Gamma(1/3,563)}{\Gamma(3/3,563)}} \cdot \Gamma(1/3,563) \quad (3.1.33)$$

Вероятное максимальное значение ЭРОА изотопов радона ( $A$ , Бк/м<sup>3</sup>) находится по формуле через энтропийный коэффициент, который для данного распределения с  $\alpha 1 = 3,563$  равен  $ka = 2,018$ :

$$A_{max} = \exp(2,873 + 2,018 \cdot 0,9) \quad (3.1.34)$$

Максимальное значение ЭРОА изотопов радона ( $A_{max}$ , Бк/м<sup>3</sup>), характерное для территории Владимира определяется уровнем 108,8 Бк/м<sup>3</sup>.

Возможность  $p(A)$  нахождения значений ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений и на территории на определенных уровнях значений от  $A_1$  до  $A_2$  оценивалась по формуле:

$$p(A) = \int_{A_1}^{A_2} \frac{\alpha 1}{2\lambda \cdot \sigma\alpha \cdot \Gamma(1/\alpha 1)} \exp\left(-\left|\frac{\ln(A) - ac}{\lambda\alpha \cdot \sigma\alpha}\right|^{\alpha 1}\right) dA \quad (3.1.35)$$

Для дальнейших расчетов необходимо преобразовать формулу нахождения  $p(A)$  в форму распределения значений ЭРОА изотопов радона для  $pA(A)$ .

$$pA(A) = \frac{\alpha 1}{2\lambda \cdot \sigma a \cdot \Gamma(1/\alpha 1) \cdot A} \exp\left(-\left|\frac{\ln(A) - ac}{\lambda \alpha \cdot \sigma a}\right|^{\alpha 1}\right) \quad (3.1.36)$$

Зная все переменные, подставляем в форму распределения значений ЭРОА изотопов радона  $pA(A)$  на территории города Владимир и получаем:

$$pA(A) = \frac{0,364}{A} \exp\left(-\left|\frac{\ln(A) - 2,873}{1,523}\right|^{3,563}\right) \quad (3.1.37)$$

По оси ординат указана доля проб ( $p$ ), по оси абсцисс располагаются значения эквивалентной равновесной ОА изотопов радона ( $A$ , Бк/м<sup>3</sup>).

где  $p(A)$  – плотность распределения вероятности;  $A$  – значения ЭРОА.

В данном случае получена кривая, где показатель степени  $\alpha 1 = 3,563 > 2$  отличается от нормального распределения (рисунок 3.3).

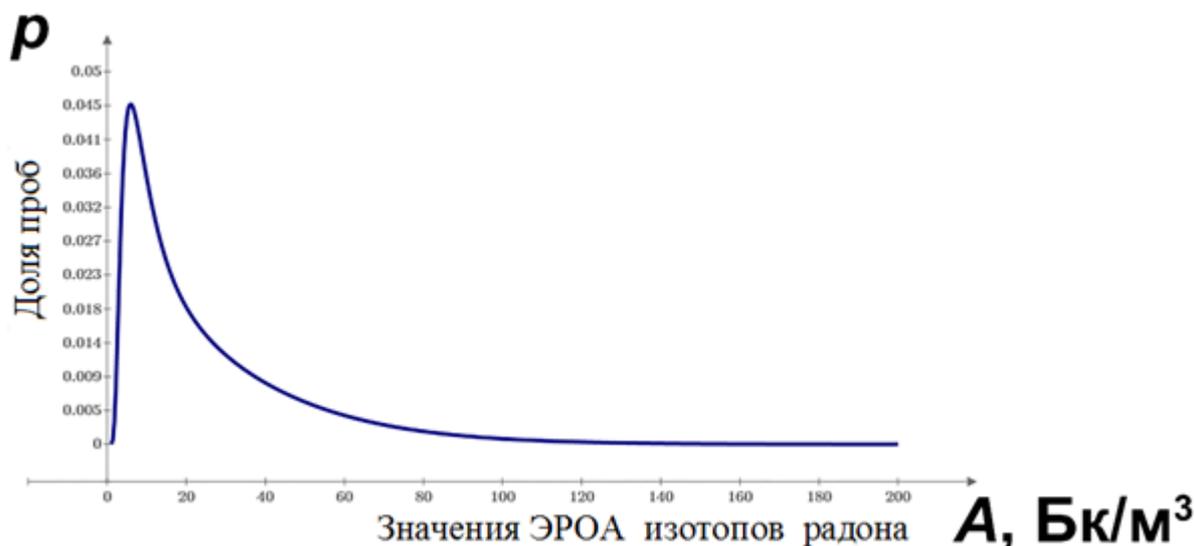


Рисунок 3.3. Кривая плотности распределения вероятности  $p(A)$

Распределение значений ЭРОА изотопов радона в нелогарифмическом масштабе имеет вид ассиметричной кривой с пологим спадом (рисунок 3.3).

По данной гистограмме видно, что основная доля приходится на низкие и средние уровни радона, именно поэтому основную опасность представляют не высокие уровни, которые встречаются довольно редко, а вполне умеренные не выходящие за пределы принятых норм.

Для данной функции выполняется условие нормирования:

$$\int_0^{\infty} pA(A) dA = 1 \quad (3.1.38)$$

Функция также может быть выражена через переменную  $a1$ , которая вычисляется как натуральный логарифм ЭРОА:

$$a1 = \ln(A) \quad (3.1.39)$$

тогда функция примет вид

$$p(a) = 0,364 \exp\left(-\left|\frac{a1 - 2,873}{1,523}\right|^{3,563}\right) \quad (3.1.40)$$

Для данной функции также выполняется условие нормирования:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} pa(a) da = 1 \quad (3.1.41)$$

Вероятности регистрации различных значений ЭРОА изотопов радона оценивается по формуле:

$$\int_{\ln A}^{+\infty} pa(a) da \quad (3.1.42)$$

Вероятность регистрации значений ЭРОА изотопов радона свыше 100 Бк/м<sup>3</sup>:

$$\int_{\ln 100}^{+\infty} pa(a) da \quad (3.1.43)$$

Вероятность регистрации значений ЭРОА изотопов радона свыше 100 Бк/м<sup>3</sup> можно найти через формулу:

$$P_{A2} = \int_{\ln 100}^{+\infty} pa(a) da \quad (3.1.44)$$

$$P_{A2} = 0,017$$

Данный результат получили, подставив переменные:

$$p(a) = \frac{0,364}{A} \exp\left(-\left|\frac{\ln(A) - ac}{\lambda a \cdot \sigma a}\right|^{a1}\right) \quad (3.1.45)$$

где  $a = \ln(A)$ .

$$P_{A2} = \int_{\ln 100}^{+\infty} 0,364 \exp\left(-\left|\frac{a - 2,873}{1,523}\right|^{3,563}\right) \cdot da \quad (3.1.46)$$

Вероятность регистрации значений ЭРОА изотопов радона больше 100 Бк/м<sup>3</sup> соответствует 1,7 %.

Характерной чертой существующих эпидемиологических данных является то, что во всех подвыборках с ОА радона выше 50 Бк/м<sup>3</sup> отношение шансов статистически достоверно больше единицы [109].

Вероятности нахождения значений ЭРОА изотопов радона свыше 50 Бк/м<sup>3</sup> оценивается по формуле.

$$\int_{\ln 50}^{+\infty} p(a) da \quad (3.1.47)$$

Где  $p(a)$  – функция плотности распределения вероятности (дифференциальный закон распределения).

$da$  - дифференциал переменной  $a$ .

Вероятность нахождения уровней свыше 50 Бк/м<sup>3</sup> ЭРОА изотопов радона можно найти через формулу:

$$P_{A1} = \int_{\ln 50}^{+\infty} p(a) da = 0,141 \quad (3.1.48)$$

Данный результат получили, подставив переменные:

$$p(a) = \frac{0,364}{A} \exp\left(-\left|\frac{\ln(A) - ac}{\lambda a \cdot \sigma a}\right|^{a1}\right) \quad (3.1.49)$$

где  $x = \ln (A)$ .

$$P_{A1} = \int_{\ln 50}^{+\infty} 0,364 \exp \left( - \left| \frac{a - 2,873}{1,523} \right|^{3,563} \right) \cdot da \quad (3.1.50)$$

Возможность обнаружения уровней ЭРОА изотопов радона свыше 50 Бк/м<sup>3</sup> составляет 14,1 %.

Для Владимира центр значений распределения ЭРОА радона оценивается величиной  $A_{Ц} = 17,7$  Бк/м<sup>3</sup>. Среднее квадратичное отклонение ЭРОА для  $\ln (A)$  составляет  $\sigma a = 0,9$ . Ожидаемая верхняя оценка максимальных значений ЭРОА изотопов радона  $A_{max}$ , принадлежащая к рассматриваемой статистике распределения ЭРОА и найденная как верхняя граница энтропийного интервала, не превышает 108,8 Бк/м<sup>3</sup>. При этом возможность нахождения уровней ЭРОА изотопов радона свыше 50 Бк/м<sup>3</sup> составляет 14,1 %, а свыше 100 Бк/м<sup>3</sup> соответствует 1,7 %.

### 3.2 Оценка зависимости «доза–ответ»

Предположения о том, что возникновения рака легкого повышается и при малых дозах воздействия ОА радона, при этом такие небольшие уровни преобладают в различных помещениях, а мультипликативный характер между спонтанной частотой возникновения рака легкого и ингаляционным облучением ДПР радона существует, вполне обоснованы [109].

Использовался условный дозовый переход (dose conversion convention) позволяющий от ЭРОА к эффективной дозе перейти на основании равенства ущербов, а не на дозиметрических моделях, а применяется такой метод только к облучению ДПР радона [109].

Эффективные дозы не представляют наилучших оценок ни доз, ни рисков для отдельных людей. Однако Комиссия МКРЗ продолжает считать, что ее система защиты, имеющая эффективную дозу, остается лучшим подходом для защиты от облучения и их источников. Введения различий в данную систему защиты между жизнью отдельных людей не связанных с

радиационным облучением, привела бы к дополнительным трудностям без увеличения защиты и к системе, которая будет слишком тяжелой и вероятно, селективной.

Переход от экспозиции  $P$  по скрытой энергии к эффективной дозе  $E$  осуществляется по формуле:

$$E=K \cdot P \quad (3.2.1)$$

где  $K$  – коэффициент дозового перехода, Зв/(Бк·ч·м<sup>-3</sup>).

Одной из главных особенностей Публикации 115 МКРЗ является изменение подхода к оценке эффективной дозы облучения при вдыхании ДПР радона.

В докладе 2000 г. НКДАР сказано, что последующие расчеты с применением других дозиметрических моделей привели к более высоким числам коэффициента перехода к дозе. Все же принимая во внимания меньшие найденные результаты на основе условного дозового перехода [107], решили сохранить прежнее значение 9 нЗв на Бк·ч·м<sup>-3</sup> (ЭРОА) и применять их в расчетах доз облучения, поскольку они удовлетворяют диапазону вероятных значений [124, 125, 109].

Как и для индикации опасности для оценки зависимости «доза–ответ» в данной работе разделим на 2 части. В первой части будут получены данные до аппроксимации значений и построения графика. После аппроксимации данных будет получены значения и построен график для нахождения эффективной годовой дозы.

Для расчета индивидуальной годовой эффективной дозы ( $E$ , Зв/год) по данным оценок ЭРОА при вдыхании воздуха с содержанием радона в черте города Владимир, как в помещениях, так и на улице, использовалась формула [60]:

$$E(A) = 1,05 \cdot 9,0 \cdot 10^{-9} \cdot t \cdot (0,2A_{ул} + 0,8A_{здан}) \quad (3.2.2)$$

где  $9,0 \cdot 10^{-9}$  – дозовый коэффициент (Зв/(час·Бк/м<sup>3</sup>)), принимаемый в

соответствии с работой НКДАР ООН за 2000 г. [123];  $t = 8800$  ч – время годовой экспозиции для населения; 0,8 - доля времени нахождения людей в помещениях; 0,2 – доля времени нахождения людей на улице; 1,05 – коэффициент учитывающий вклад материнских радионуклидов;  $A_{здан}$  – среднее значение ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений, Бк/м<sup>3</sup>;  $A_{ул} = 6,5$  Бк/м<sup>3</sup> – среднее значение ЭРОА изотопов радона в воздухе на открытой территории населенного пункта, принятое в соответствии с информацией о среднемировых значениях ЭРОА изотопов радона в воздухе [60].

Подставим значения в формулу:

$$E = 1,05 \cdot 9,0 \cdot 10^{-9} \cdot 8800 \cdot (0,2 \cdot 6,5 + 0,8 \cdot A_{здан}) \quad (3.2.3)$$

Значение индивидуальной эффективной дозы можно найти для центральной ( $E_{ц}$  Зв/год) и <sup>верхней</sup> тенденции ( $E_{max}$  Зв/год).

Для каждого измерения считали эффективную дозу ( $E$ ) отдельно.

$$E_i = 1,05 \cdot 9,0 \cdot 10^{-9} \cdot 8800 \cdot (0,2 \cdot 6,5 + 0,8 \cdot A_i) \quad (3.2.4)$$

Полученные значения  $E_i$  представлены на основе анализа гистограммы. Для нахождения  $E$  берем медиану всех найденных значений  $E_i$ .

$A_i$  - каждое из найденных значений  $A_{здан}$ .

$E_i$  - каждое из найденных годовых индивидуальных эффективных доз.

Прогнозируемые значения индивидуальной годовой эффективной дозы внутреннего облучения населения для измерений, проводившихся во Владимире, обрабатываются похожим способом, по аналогичным формулам, что и для ЭРОА изотопов радона. Это значит, что для построения гистограмм необходимо изначально задать переменные. Первую из них мы можем найти как  $E'_{ц}$ , данное значение описывается медианой. Второе значение является распределением степени  $\alpha$ , как некоторая характерная для данного распределения которую изначально задаем как 2, характерную для распределения Гаусса. Также вычисляется стандартное отклонение  $\sigma'$  для значений логарифма индивидуальной годовой эффективной дозы от радонового облучения во Владимире.

Находим центр распределения индивидуальной годовой эффективной дозы до аппроксимации ( $E'_{Ц}$ , Зв/год) внутреннего облучения жителей на территории населенного пункта за счет ингаляции короткоживущих материнских дочерних продуктов изотопов радона где  $E'_{Ц}$  равняется медианой всех значений логарифма  $E$ .

используется

Значения до аппроксимации как начальные значения в итерационном алгоритме аппроксимации функции.

Расчет центральной тенденции до аппроксимации для значений индивидуальной эффективной дозы производим через экспоненту:

$$E'_{Ц} = e^{\ln(E'_{Ц})} \quad (3.2.5)$$

Расчет центральной тенденции до аппроксимации для значений индивидуальной эффективной дозы производим через медиану. Значение найденное с помощью медианы -6,57. Находим необходимое значение через экспоненту равную  $e^{-6,57}$ .

$$E_{Ц} = e^{-6,57} \quad (3.2.6)$$

$$E_{Ц} = 0,0014$$

Стандартное отклонение для значений логарифма индивидуальной годовой эффективной дозы ( $\sigma'$ ) находится по формуле:

$$\sigma' = \sqrt{\frac{\sum (y_i - y_u)^2}{n-1}} \quad (3.2.7)$$

$$\sigma' = \sqrt{\frac{\sum (\ln(E_i) + 6,57)^2}{n-1}} \quad (3.2.8)$$

$$\sigma' = 0,83$$

$y_u$  - центр распределения логарифма индивидуальной годовой эффективной дозы.

$y_i$  - значение полученного логарифма индивидуальной годовой эффективной дозы.

Данные значения были рассчитаны при помощи программы Microsoft Excel, график и последующие расчёты построены в среде Mathcad (приложение 1).

Строится гистограмма, где находим логарифм плотность вероятности для годовой эффективной дозы  $\ln(E, \text{Зв/год})$  от радонового облучения на территории г. Владимир.

Выраженная гистограмма плотности вероятности для годовой эффективной дозы, которая аппроксимируется функцией  $pe(e)$ , и по своему виду может быть отнесена к классу экспоненциальных распределений, описываемых единой аналитической моделью [51]:

$$pe(e) = \frac{\alpha^2}{2\lambda e \cdot \sigma e \cdot \Gamma(1/\alpha^2)} \exp\left(-\left|\frac{e - e_c}{\lambda e \cdot \sigma e}\right|^{\alpha^2}\right) \quad (3.2.9)$$

где  $\sigma e$  – стандартное отклонение для значений логарифма  $E$ , определяемой по формуле:

$$\sigma e = \frac{\sqrt{\sum (\ln(E_i) - \ln(E_u))^2}}{n-1} \quad (3.2.10)$$

$\lambda e$  – коэффициент, определяемый по формуле:

$$\lambda e = \sqrt{\Gamma(1/\alpha^2) / \Gamma(3/\alpha^2)} \quad (3.2.11)$$

$\alpha^2$  – некоторая характерная для годовой эффективной дозы, найденная после аппроксимации значений.

Показатель степени  $\alpha$  однозначно определяет все параметры формы экспоненциальных распределений и следовательно, для плотности вероятности индивидуальной годовой эффективной дозы.

При построении гистограммы по оси ординат указана доля проб, а по оси абсцисс располагаются значения логарифма индивидуальной годовой дозы.

Распределение значений индивидуальной годовой эффективной дозы внутреннего облучения населения города Владимира выражается

гистограммой (рисунок 3.4).

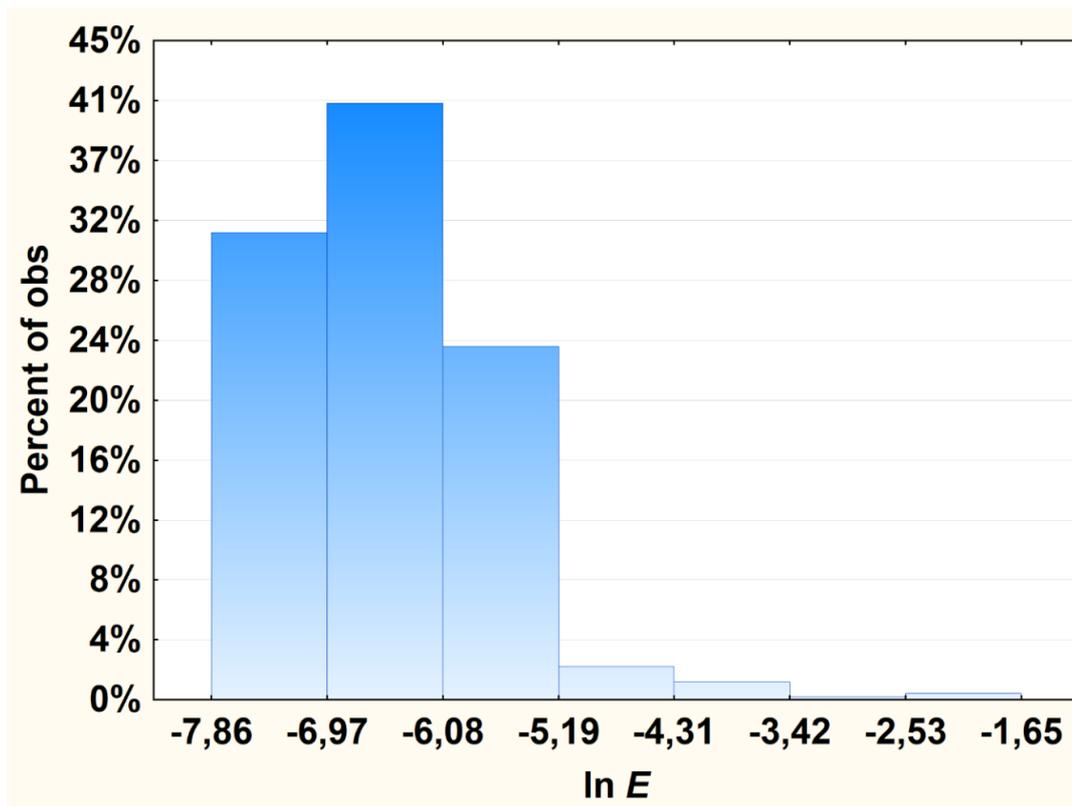


Рисунок 3.4. Гистограмма распределения значений логарифма индивидуальной годовой эффективной дозы внутреннего облучения населения г. Владимир за счет материнских и короткоживущих дочерних продуктов изотопов радона в воздухе помещений

Гистограмма распределения значений логарифма индивидуальной годовой эффективной дозы внутреннего удовлетворительно аппроксимируется функцией, относящейся к классу экспоненциальных распределений (рисунок 3.5.). В данном случае – это распределение близкое по виду к нормальному распределению, где показатель степени  $\alpha_2 = 2,412$  (рисунок 3.5.).

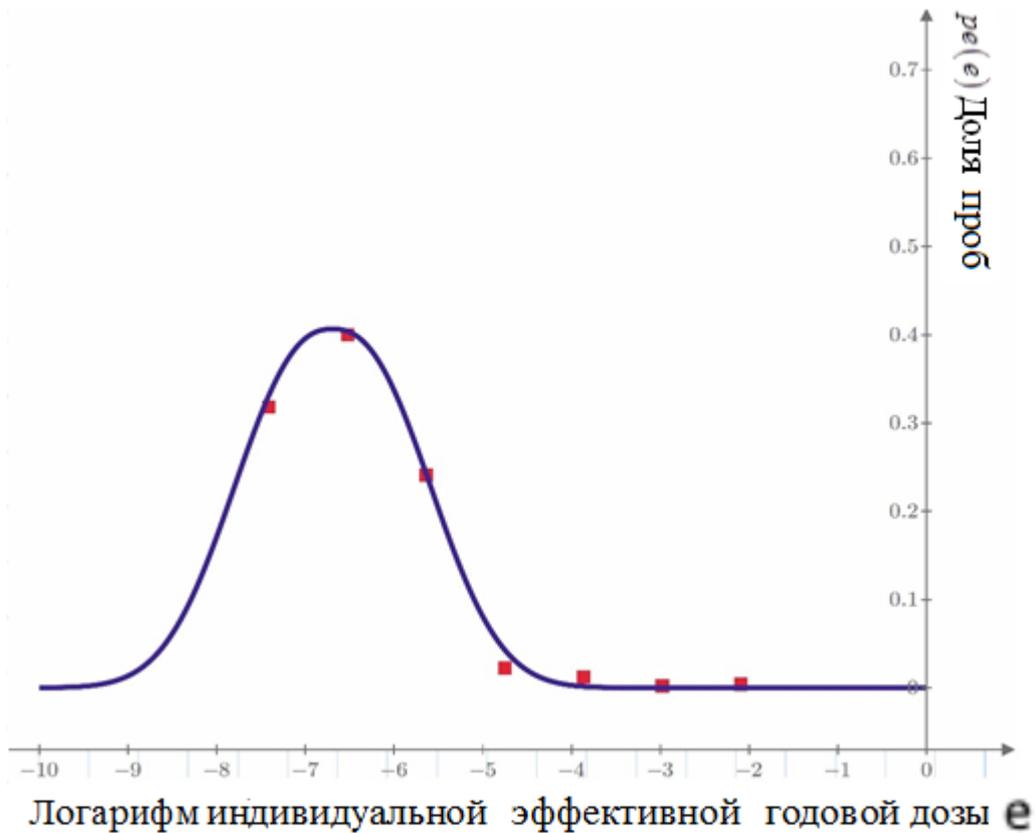


Рисунок 3.5. Аппроксимация гистограммы распределения значений логарифма годовой эффективной дозы функцией плотности распределения вероятности  $pe(e)$

Красными точками обозначены величины, полученные на основе экспериментальных данных проведенных замеров.

Статистика распределения частот встречаемости для значений индивидуальной годовой эффективной дозы внутреннего облучения взрослых жителей  $pe(e)$  города Владимира также может быть описана формулой где показатель степени  $\alpha_2 = 2,412$ :

$$pe(e) = \frac{2,412}{2 \cdot 1,535 \cdot 0,904 \Gamma(1/2, 412)} \exp\left(-\left|\frac{e-1,24}{1,535 \cdot 0,904}\right|^{2,412}\right) \quad (3.2.12)$$

Стандартное отклонение для значений логарифма ЭРОА изотопов радона ( $\sigma_e$ ) находим с помощью формулы:

$$\sigma_e = \frac{\sqrt{\sum (\ln(E_i) - 1,24)^2}}{n-1} \quad (3.2.13)$$

Находим  $\lambda e$ :

$$\lambda e = \sqrt{\Gamma(1/2, 412) / \Gamma(3/2, 412)} \quad (3.2.14)$$

$$\lambda e = 1,535$$

После аппроксимации и построения графика стандартное отклонение для  $\ln(E)$  составляет  $\sigma e = 0,904$ . Центр распределения для значений индивидуальной годовой эффективной дозы облучения ( $E_{Ц}$ , мЗв/год) на территории Владимира будет  $e c = -6,694$  или  $E_{Ц} = 1,24$  мЗв/год.

Также можно построить график, который будет использоваться для оценки распределения доз, и повторять гистограмму, но выполненный не в логарифмическом масштабе, он строиться по формуле:

$$pE(E) = \frac{\alpha^2}{2 \cdot \lambda e \cdot \sigma e \cdot \Gamma(1/\alpha^2) \cdot E} \exp\left(-\left|\frac{\ln(E) - e c}{\lambda e \cdot \sigma e}\right|^{\alpha^2}\right) \quad (3.2.15)$$

Данная формула приняла форму распределения индивидуальной эффективной дозы рассчитываемую через  $pE(E)$ .

Распределение значений индивидуальной годовой эффективной дозы облучения в нелогарифмическом масштабе имеет вид ассиметричной куполообразной кривой, аналогичной кривой логнормального распределения, – с крутым подъемом, скругленной вершиной и очень пологим спадом (рисунок 3.6):

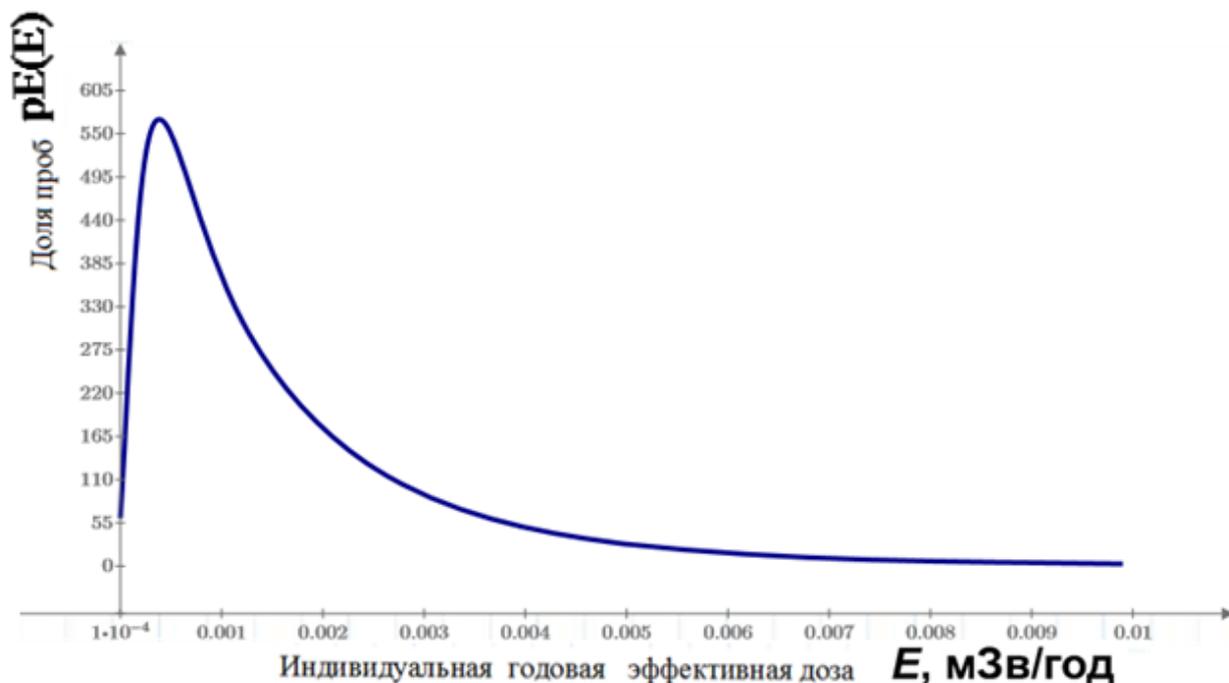


Рисунок 3.6. Кривая плотности распределения вероятности  $p(E)$

График описывается формулой:

$$pE(E) = \frac{2,412}{2 \cdot 1,535 \cdot 0,904 \Gamma(1/2, 412) \cdot E} \exp\left(-\left|\frac{\ln(E) - (-6,694)}{1,535 \cdot 0,904}\right|^{2,412}\right) \quad (3.2.16)$$

Получили значения индивидуальной эффективной дозы  $pE(E)$  на территории города Владимира:

$$pE(E) = \frac{0,406}{E} \exp\left(-\left|\frac{\ln(E) - (-6,694)}{1,388}\right|^{2,412}\right) \quad (3.2.17)$$

Данная функция используется для оценки распределения доз. По вертикали указана плотность вероятности по горизонтали доза в (Зв/год).

При расчёте вероятности получения эффективной дозы облучения за счет материнских и короткоживущих дочерних продуктов изотопов радона в воздухе учитываем плотность распределения вероятности:

$$p(y) = 0,406 \exp\left(-\left|\frac{y - \ln(-6,694)}{1,388}\right|^{2,412}\right) \quad (3.2.18)$$

где  $e = \ln(E)$ .

$p(y)$ - плотность распределения вероятности для логарифма эффективной дозы.

Максимальное значение индивидуальной эффективной дозы можно найти ( $E_{max}$ , Зв/год), характерное для территории города Владимира оценивается величиной Бк/м<sup>3</sup>:

$$p(E) = \frac{0,406}{E} \exp\left(-\left|\frac{\ln(E) - \ln(-6,694)}{1,388}\right|^{2,412}\right) \quad (3.2.19)$$

После аппроксимации значения центральной тенденции и стандартного отклонения существенно не меняется, что говорит о правильности данного метода.

Для дальнейшей работы необходимо найти различные дозовые нагрузки (Зв/год) для различных диапазонов.

При изучении эффекта воздействия радона так же надо учитывать, что нет таких членов популяции, которые не подвергались бы облучению при ингаляционном поступлении ДПР радона, поэтому нижняя граница рассчитывается относительно некоторого наименьшего (фонового) диапазона воздействия [54].

Дозовая нагрузка при фоновом уровне облучения:

$$E_{\phi} = 1,05 \cdot 9,0 \cdot 10^{-9} \cdot t \cdot (A_{yl}) \quad (3.2.20)$$

$$E_{\phi} = 1,05 \cdot 9,0 \cdot 10^{-9} \cdot 8800 \cdot (A_{yl}) \quad (3.2.21)$$

$$E_{\phi} = 5,4 \cdot 10^{-4}$$

$A_{yl}$  - Также является фоновым показателем.

$E_{min} = E_{\phi}$  Поскольку фоновый уровень является минимальным.

ЭРОА при дозовой нагрузке в 5 мЗв/год.

Данное значение выражаем через уравнение:

$$E(A) - 0,005 = 0 \quad (3.2.22)$$

Решение этого уравнения есть А от 73,5

Среднегодовой уровень ЭРОА и среднегодовая эффективная доза при низких дозовых нагрузках выше 0,5 мЗв/год, но менее 5 мЗв/год.

$$a_1 = \frac{\int_{\ln(6,5)}^{\ln(A01)} a \cdot p a(a) da}{\int_{\ln(6,5)}^{\ln(A01)} p a(a) da} \quad (3.2.23)$$

$$a_1 = \frac{\int_{\ln(6,5)}^{\ln(73,5)} a \cdot p a(a) da}{\int_{\ln(6,5)}^{\ln(A01)} p a(a) da} \quad (3.2.24)$$

Где а - логарифм ЭРОА.

$$A1 = e^{a_1} \quad (3.2.25)$$

$$A1 = 20,504$$

$$E1 = 1,05 \cdot 9,0 \cdot 10^{-9} \cdot t \cdot (0,2A_{ул} + 0,8A_{здан}) \cdot A1 \quad (3.2.26)$$

$$E1 = 1,5 \cdot 10^{-3}$$

A01 - уровень ЭРОА в 5 мЗв/год найденный в беккерелях.

A1- средняя ЭРОА для а1

E1- средняя индивидуальная эффективная доза для а1

Уровень ЭРОА (Бк/м.куб.) при дозовой нагрузке в 10 мЗв/ год

$$E(A) - 0,01 = 0 \quad (3.2.27)$$

Среднегодовой уровень ЭРОА и среднегодовая эффективная доза при высоких дозовых нагрузках выше 5 мЗв/год.

$$a_2 = \frac{\int_{\ln(A01)}^{\infty} a \cdot p a(a) da}{\int_{\ln(A01)}^{\infty} p a(a) da} \quad (3.2.28)$$

$$a_2 = \frac{\int_{\ln(73,5)}^{\infty} a \cdot p a(a) da}{\int_{\ln(73,5)}^{\infty} p a(a) da} \quad (3.2.29)$$

Где  $a_1$  и  $a_2$  обозначения границ заданной функции.

$$A_2 = e^{a_2} \quad (3.2.30)$$

$$A_2 = 94,6$$

$$E_2 = 1,05 \cdot 9,0 \cdot 10^{-9} \cdot t \cdot (0,2A_{\text{ул}} + 0,8A_{\text{здан}}) \cdot A_2 \quad (3.2.31)$$

$$E_2 = 6,4 \cdot 10^{-3}$$

$A_2$ - средняя ЭРОА для  $a_2$

$E_2$ - средняя индивидуальная эффективная доза для  $a_2$

Расчет центральной тенденции и верхней оценки для значений индивидуальной годовой эффективной дозы:

$$E(A) - 0,005 = 0 \quad (3.2.22)$$

Центральная тенденция, Зв/год:

$$E_{\text{ц}} = \exp(ec) \quad (3.2.32)$$

$$E_{\text{ц}} = 1,2 \cdot 10^{-3} \quad (3.2.33)$$

Прогнозируемая консервативная оценка максимальных ( $E_{\text{max}}$ ) и минимальных ( $E_{\text{min}}$ ) значений индивидуальной эффективной дозы, относящаяся к рассматриваемой статистике распределения эффективной дозы, соответствует верхней оценке эффективной дозы и находится по формуле через энтропийный коэффициент  $ke$ .

Для экспоненциальных распределений энтропийный коэффициент находится однозначно в зависимости от показателя степени  $\alpha_2$  по формуле:

$$ke = \frac{1}{\alpha_2} \cdot e^{1/\alpha_2} \sqrt{\frac{\Gamma(1/\alpha_2)}{\Gamma(3/\alpha_2)}} \cdot \Gamma(1/\alpha_2) \quad (3.2.34)$$

$$ke = \frac{1}{2,412} \cdot e^{1/2,412} \sqrt{\frac{\Gamma(1/2, 412)}{\Gamma(3/2, 412)}} \cdot \Gamma(1/2, 412) \quad (3.2.35)$$

Вероятное максимальное значение ( $E_{\max}$ , мЗв/год) и минимальное значение ( $E_{\min}$ , мЗв/год) индивидуальной годовой эффективной дозы облучения рассчитываются по формуле через энтропийный коэффициент, который для данного распределения с  $\alpha 2 = 2,412$  равен  $ke = 2,06$ .

Нижняя граница дозы, Зв/год:

$$\ln E_{\min} = ec - ke \cdot \sigma e \quad (3.2.36)$$

отсюда:

$$E_{\min} = \exp(ec - ke \cdot \sigma e) \quad (3.2.37)$$

$$E_{\min} = \exp(-6,694 - 2,06 \cdot 0,904) \quad (3.2.38)$$

$$E_{\min} = 1,9 \cdot 10^{-3}$$

Верхняя оценка, Зв/год:

$$\ln E_{\max} = ec + ke \cdot \sigma e \quad (3.2.39)$$

отсюда:

$$E_{\max} = \exp(ec + ke \cdot \sigma e) \quad (3.2.40)$$

$$E_{\max} = \exp(-6,694 + 2,06 \cdot 0,904) \quad (3.2.41)$$

$$E_{\max} = 8 \cdot 10^{-3}$$

В публикации 126 МКРЗ указывается, что риск увеличивается статистически значимо даже при умеренных содержаниях радона на уровнях 50–100 Бк/м<sup>3</sup> [110].

Чтобы провести характеристику радиационной опасности от радонового воздействия во Владимире нужен анализ статистических

параметров распределения индивидуальной годовой эффективной дозы внутреннего облучения населения.

Степень радиационной безопасности населения от природных источников излучения условно разделяют на следующие уровни эффективных доз облучения, менее 5 мЗв/год считающийся приемлемым уровнем облучения, свыше 5 до 10 мЗв/год является повышенным облучением, более 10 мЗв/год уже высокое облучение [10, 58]. В Публикации 65 Комиссия предположила, что при превышении годовой эффективной дозы 10 мЗв являются необходимыми и оправданными. [107, 110], но могут быть рассмотрены и меньшие уровни Комиссия рекомендует уровни от 3 мЗв/год. Хотя данные значения не являются ориентировочными значениями и не показывают качественные изменения в соответствующем риске для здоровья людей, все же по выше изложенным причинам ориентировка на них не лишена смысла и вполне оправдана.

Возможность  $w$  определения уровней индивидуальной эффективной дозы на территории в некотором диапазоне значений от  $E_1$  до  $E_2$  рассматривалась по формуле:

$$w = \int_{\ln E_1}^{\ln E_2} \frac{\alpha^2}{2\lambda e \cdot \sigma e \cdot \Gamma(1/\alpha^2)} \exp\left(-\left|\frac{e - \ln(E_{II})}{\lambda e \cdot \sigma e}\right|^{\alpha^2}\right) de \quad (3.2.42)$$

где  $e = \ln(E)$ .

Вероятность получить индивидуальную годовую эффективную дозу облучения, превышающую 5 мЗв/год за счет материнских и короткоживущих дочерних продуктов изотопов радона в воздухе рассчитывается по формуле:

$$w_2 = \int_{\ln 0,005}^{+\infty} p e(e) de \quad (3.2.43)$$

$$P_{E_1} = 0,061$$

Данный результат получили, подставив переменные:

$$w_2 = \int_{\ln 0,005}^{+\infty} 0,406 \exp \left( - \left| \frac{e - \ln(-6.694)}{1,388} \right|^{2,412} \right) \cdot de \quad (3.2.44)$$

Вероятность регистрации средних и высоких доз облучения (свыше 5 мЗв/год) за счет материнских и короткоживущих дочерних продуктов изотопов радона в воздухе, т.е. ситуация, когда облучение населения считается повышенным, оценивается величиной 6,1 %.

Вероятность получить индивидуальную годовую эффективную дозу облучения, превышающую фоновый уровень (0,5 мЗв/год), но менее 5 мЗв/год, за счет материнских и короткоживущих дочерних продуктов изотопов радона в воздухе рассчитывается по формуле:

$$w_1 = \int_{\ln 0,0005}^{\ln 0,005} pe(e) de \quad (3.2.45)$$

$$w_1 = 0,749$$

Данный результат получили, подставив переменные:

$$w_1 = \int_{\ln 0,0005}^{\ln 0,005} 0,406 \exp \left( - \left| \frac{e - \ln(-6.694)}{1,388} \right|^{2,412} \right) \cdot de \quad (3.2.46)$$

Вероятность регистрации низких доз облучения (0,5 – 5 мЗв/год) за счет материнских и короткоживущих ДПР радона в воздухе оценивается величиной 74,9 %.

Вероятность получить индивидуальную годовую эффективную дозу облучения, соответствующую фоновым уровням (0,5 мЗв/год), за счет материнских и короткоживущих ДПР радона в воздухе рассчитывается по формуле:

$$w_0 = \int_{-\infty}^{\ln 0,0005} pe(e) de \quad (3.2.47)$$

$$w_0 \approx 0,189$$

Данный результат получили, подставив переменные:

$$w_0 = \int_{-\infty}^{\ln 0,0005} 0,406 \exp \left( - \left| \frac{e - \ln(-6.694)}{1,388} \right|^{2,412} \right) \cdot de \quad (3.2.48)$$

Вероятности регистрации фоновых уровней радонового облучения оценивается величиной 18,9 %.

Очевидно, что на территории г. Владимир эффективная, полученная доза только за счет материнских и короткоживущих дочерних изотопов радона в воздухе помещений, характеризуется как:

- повышенная для 6,1 % экспонируемой популяции;
- низкая для 74,9 % экспонируемой популяции;
- фоновая для 18,9 % экспонируемой популяции.

Характерной особенностью существующих эпидемиологических данных [109] будет то, что во всех подвыборках с ОА радона больше 50 Бк/м<sup>3</sup> зависимость доза-эффект хорошо описывается линейной зависимостью.

Собранные статистические и вероятностные параметры позволяют оценить радиационную опасность радонового воздействия во Владимире, этому способствовали проведенные наблюдения и измерения ОА радона.

### 3.3 Оценка экспозиции

Чтобы оценить радиационное влияние ДПР радона на человека, используется экспозиция по эквивалентной ОА радона:

$$P = T \cdot A_{Rn} \quad (3.3.1)$$

Где  $P$  - оценка годовой экспозиции по скрытой энергии ЭРОА (Бк·ч·м<sup>-3</sup>)

$T$  - период времени воздействия.

Окончательное уточнение пути прохождения вещества, от его возникновения до попадания в организм проводится на этапе оценки экспозиции. Выбирается сценарий и проводится анализ найденных данных об уровнях воздействия радона на население.

Облучение радоном может иметь свой сценарий, в котором содержится разбор особенностей экспозиции, а также описания всевозможных факторов

воздействия и предположений. Цель проекта задаёт состав сценария воздействия и подходящую модель рассматриваемой территории (таблица 3.1).

Таблица 3.1

## Сценарий облучения радоном

Элемент	Характеристика
1. Агент(ы)	<p>Альфа-излучение, испускаемое смесью короткоживущих дочерних продуктов радона при их полном распаде до свинца-210, выступает в сценарии экспозиции в качестве опасного физического агента. Энергия, передаваемая <math>\alpha</math>-частицами, вносит основной вклад в радоновое облучение. Поэтому в оценках экспозиции по скрытой энергии <math>\alpha</math>-излучения использовалась величина удельной потенциальной энергии <math>\alpha</math>-излучения дочерних продуктов радона на <math>1 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}</math> радона в равновесии, равная <math>3,47 \cdot 10^4 \text{ МэВ} \cdot \text{м}^{-3}</math> или <math>5,56 \cdot 10^{-9} \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3}</math> [109]. 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 информация о количестве курящих среди всевозможных половозрастных групп населения на постоянной основе в России не собираются [33].</p>
2. Источник(и)	<p>Радоновое облучение является ситуацией существующего природного облучения, поскольку его источник это неизменные концентрации естественных радионуклидов в земной коре [108, 109]. Человек может влиять на пути поступления радона, повышая его концентрацию в помещениях по сравнению с фоном на открытой территории. Поэтому принципы регулирования его влияния базируются на установлении референтных уровней и применении принципа оптимизации при решении о принятии и дальнейшем выполнении мер защиты [108, 110]. Вследствие чего, с точки зрения обеспечения радиационной безопасности процедуры оценки экспозиции, радиационного риска для здоровья от облучения населения радоном должны проводиться на регулярной основе,</p>

Элемент	Характеристика
	независимо от того как соотносится концентрация радона в воздухе помещений с референтными уровнями или с нормативами, указанными в НРБ-99/2009.
3. Транспорт / накопление	Транспорт радона от мест эманирования реализуется с потоком воздуха через поры почвы (грунта), а накопление может наблюдаться в воздухе помещений на первых этажах зданий. Облучение радоном населения происходит на рабочих местах в домах и в многофункциональных зданиях. Несмотря на инертность радона, большая часть его ДПР после вдыхания отлагается в дыхательных путях легких, а он сам выдыхается.
4. Маршрут(ы) воздействия	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 информацией о среднемировых уровнях ЭРОА изотопов радона в приземном слое атмосферного воздуха принимается равным $6,5 \text{ Бк/м}^3$ [124]. Вариабельность ОА радона обуславливает высокий уровень неоднородности распределения экспозиций и уровней облучения, что делает оправданным выделение в сценарии экспозиции условий высокого, среднего, низкого и фоновой уровней радонового облучения.
5. Воздействующая концентрация	На основе оценок средневзвешенных уровней ЭРОА согласно статистике распределения ЭРОА, рассчитана экспозиция по скрытой энергии $\alpha$ -излучения для выделенных в сценарии экспозиции условий радонового облучения. Целесообразность использования статистических законов распределения ЭРОА и эффективной дозы в оценках экспозиции и численности экспонируемых субгрупп популяции обусловлена: 1) в силу выраженной асимметричности и островершинности кривых распределений; 2) необходимостью минимизации неопределённостей в определении радоновой экспозиции посредством анализа статистических законов распределения.
6. Пути	Ингаляция – основной путь поступления радона, при этом

Элемент	Характеристика
поступления	его ДПР являются одной из причин возникновения рака легкого, т.к. из-за относительно коротких периодов полураспада (менее 30 мин.) дочерние продукты радона распадаются преимущественно в легких до выведения. На сегодняшний день для других последствий нет убедительных данных о связи заболеваемости с облучением радоном и его ДПР [109]. Таким образом оценке подлежат экспозиция и риск радиационно-индуцированного рака легкого как результат изолированного воздействия радонового облучения.
7. Продолжительность экспозиции	Рассчитывались как среднегодовая, так и накопленная к возрасту 70 лет (средней продолжительности жизни населения в г. Владимир) экспозиция. 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 в течение всей жизни. Данное допущение было принято из-за невозможности провести полную и корректную реконструкцию условий облучения на протяжении столь длительного срока даже в рамках строгого эпидемиологического исследования [31].
8. Частота воздействия	В частоте воздействия учитывался тот факт, что в помещениях люди проводят большую часть времени – около 80% [124]. В Форме федерального статистического наблюдения № 4-ДОЗ для населения РФ относительное время пребывания в помещениях также принято равным 0,8 [83, 89].
9. Экспонируемая популяция	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 тысяч 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. В сценарии облучения радоном оценки экспозиции приводятся для обобщенной

Элемент	Характеристика
	<p>популяции жителей, в которых не делается возрастных различий в облучении, т.к. доза облучения легких на единичную экспозицию относительно не чувствительна к возрасту [119, 115, 112, 116]. Причина этого состоит в наличии конкурирующих факторов, действие которых имеет тенденцию взаимно компенсироваться.</p>
10.Географический охват	<p>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.</p>
11.Период оценки	<p>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).</p>

Необходимо понимать, что при оценке экспозиции в расчете пришлось сделать 2 допущения об отсутствии миграции населения в течение всей жизни и о постоянстве показателя ЭРОА радона в жилище в течение всей жизни. Это было сделано из-за невозможности ведения постоянного мониторинга, но статистически исследования все равно имеют достаточную точность.

Удельная потенциальная энергия альфа-излучения дочерних продуктов радона  $1 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$  радона в равновесии  $= 3,47 \cdot 10^4 \text{ МэВ} \cdot \text{м}^{-3} = 5,56 \cdot 10^{-9} \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3}$ .  
Оценка годовой экспозиции по скрытой энергии радона ( $P(A)$ ,  $\text{Дж} \cdot \text{ч} \cdot \text{м}^{-3}$ ):

$$P(A) = 5,56 \cdot 10^{-9} \cdot t \cdot (0,2 \cdot A_{\text{ул.}} + 0,8 \cdot A_{\text{здан}}) \quad (3.3.2)$$

Значение оценки годовой экспозиции радона по скрытой энергии можно узнать как за 1 год, так и за всю жизнь.

Где  $t_{\text{ж}}$  - средняя продолжительность жизни.

Оценка годовой экспозиции по скрытой энергии ( $P(A)$ ,  $\text{Дж} \cdot \text{ч} \cdot \text{м}^{-3}$ ) выражается формулой:

$$P(A) = 5,56 \cdot 10^{-9} \cdot 8800 \cdot (0,2 \cdot 6,5 + 0,8 \cdot A_{\text{здан}}) \quad (3.3.3)$$

Значение удельной потенциальной энергии альфа-излучения дочерних продуктов радона разделили на центральную оценку  $P_{\text{ц}}$ , нижнюю границу  $P_{\text{min}}$  и максимальную оценку  $P_{\text{max}}$  при этом вероятность проявления стохастического эффекта проявления можно узнать как за год так и пожизненно. Для Владимира средняя продолжительность жизни около 70 лет.

Оценка годовой экспозиции по скрытой энергии при средних и высоких уровнях облучения ( $P_{\text{Rn(CuB)}}$ ).

Для верхней оценки:

$$P(e^{(ac+ka \cdot \sigma a)}) = 4,3 \cdot 10^{-3} \quad (3.3.4)$$

$$P_{\text{Rn(CuB)}}^{\text{max}} = P(e^{(ac+ka \cdot \sigma a)}) \cdot t_{\text{ж}} \quad (3.3.5)$$

$$P_{\text{Rn(CuB)}}^{\text{max}} = 4,3 \cdot 10^{-3} \cdot 70 \quad (3.3.6)$$

$$P_{\text{Rn(CuB)}}^{\text{max}} = 3 \cdot 10^{-1}$$

Для центральной тенденции:

$$P2 = P(A2) \quad (3.3.7)$$

$$P2 = 4 \cdot 10^{-3}$$

$$P_{\text{Rn(CuB)}}^{\text{II}} = P2 \cdot t_{\text{ж}} \quad (3.3.8)$$

$$P_{\text{Rn(CuB)}}^{\text{II}} = 4 \cdot 10^{-3} \cdot 70 \quad (3.3.9)$$

$$P_{Rn(CuB)}^U = 0,264$$

Для нижней границы:

$$P(A01) = 2,9 \cdot 10^{-3} \quad (3.3.10)$$

$$P_{Rn(CuB)}^{\min} = P(A01) \cdot t_{жс} \quad (3.3.11)$$

$$P_{Rn(CuB)}^{\min} = 2,9 \cdot 10^{-3} \cdot 70 \quad (3.3.12)$$

$$P_{Rn(CuB)}^{\min} = 2,1 \cdot 10^{-1}$$

Оценка экспозиции по скрытой энергии при низких уровнях облучения ( $P_{Rn(H)}$ ).

Для верхней оценки:

$$P(A01) = 2,9 \cdot 10^{-3} \quad (3.3.13)$$

$$P_{Rn(H)}^{\max} = P(A01) \cdot t_{жс} \quad (3.3.14)$$

$$P_{Rn(H)}^{\max} = 2,9 \cdot 10^{-3} \cdot 70 \quad (3.3.15)$$

$$P_{Rn(H)}^{\max} = 2,1 \cdot 10^{-1}$$

Для центральной тенденции:

$$P1 = P(A1) \quad (3.3.16)$$

$$P(A1) = 8,7 \cdot 10^{-4}$$

$$P_{Rn(H)}^U = P(A1) \cdot t_{жс} \quad (3.3.17)$$

$$P_{Rn(H)}^U = 8,7 \cdot 10^{-4} \cdot 70 \quad (3.3.18)$$

$$P_{Rn(H)}^U = 6,1 \cdot 10^{-2}$$

Для нижней границы:

$$P(6,5) = 3,2 \cdot 10^{-4} \quad (3.3.19)$$

$$P_{Rn(H)}^{\min} = P(6,5) \cdot t_{жс} \quad (3.3.20)$$

$$P_{Rn(H)}^{\min} = 3,2 \cdot 10^{-4} \cdot 70 \quad (3.3.21)$$

$$P_{Rn(H)}^{\min} = 2,2 \cdot 10^{-2}$$

Оценка годовой экспозиции по скрытой энергии соответствующая фоновым уровням облучения ( $P_{Rn(\Phi)}$ ).

$$P0 = P(A0) \quad (3.3.22)$$

$$P_0 = 3,18 \cdot 10^{-4}$$

$$P_{Rn(\Phi)}^{\min} = P_0 \cdot t_{ж} \quad (3.3.23)$$

$$P_{Rn(\Phi)}^{\min} = 3,18 \cdot 10^{-4} \cdot 70 \quad (3.3.24)$$

$$P_{Rn(\Phi)}^{\min} = 2,2 \cdot 10^{-2}$$

Вероятность получить ту или иную дозу применялась для описания радонового облучения в помещениях для населения находящихся в них около 80% времени. Данный подход позволяет не учитывать назначения помещения, но не исключает крайне больших индивидуальных годовых доз, при которых нужны защитные меры. Низкие уровни воздействия не дают полной ясности, поскольку различные механизмы и высокая вариабельность проявлений способствуют непредсказуемости адаптивного ответа при ряде условий [52].

Оценка годовой экспозиции по скрытой энергии альфа-излучения при средних и высоких дозах облучения  $E = 6,4$  мЗв/год, т.е. при  $A = 94,6$  Бк/м<sup>3</sup>:

$$P = 4,0 \cdot 10^{-3} \text{ Дж} \cdot \text{ч} \cdot \text{м}^{-3} / \text{год}$$

Границы доверительного интервала (ДИ) 95 %:  $2,9 \cdot 10^{-3} - 4,3 \cdot 10^{-3}$  Дж·ч·м<sup>-3</sup>/год.

Оценка годовой экспозиции по скрытой энергии при низких дозах облучения  $E = 1,5$  мЗв/год, т.е. при  $A = 20,5$  Бк/м<sup>3</sup>:

$$P = 8,7 \cdot 10^{-4} \text{ Дж} \cdot \text{ч} \cdot \text{м}^{-3} / \text{год}$$

$$\text{Границы ДИ 95 \%: } 3,2 \cdot 10^{-4} - 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ Дж} \cdot \text{ч} \cdot \text{м}^{-3} / \text{год}$$

Оценка годовой экспозиции по скрытой энергии, соответствующая минимальным (фоновым) уровням облучения, т.е. при  $A = 6,5$  Бк/м<sup>3</sup>:

$$P_{\min} = 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ Дж} \cdot \text{ч} \cdot \text{м}^{-3}$$

С помощью общей численности населения (рисунок 3.7, таблица 3.2) можно вычислить численность экспонированной популяции, которая является приоритетным фактором для решения вопроса о необходимости мероприятий в области здравоохранения и природоохранных мероприятий, встающие при применении результатов оценки риска в целях «управления

риском».

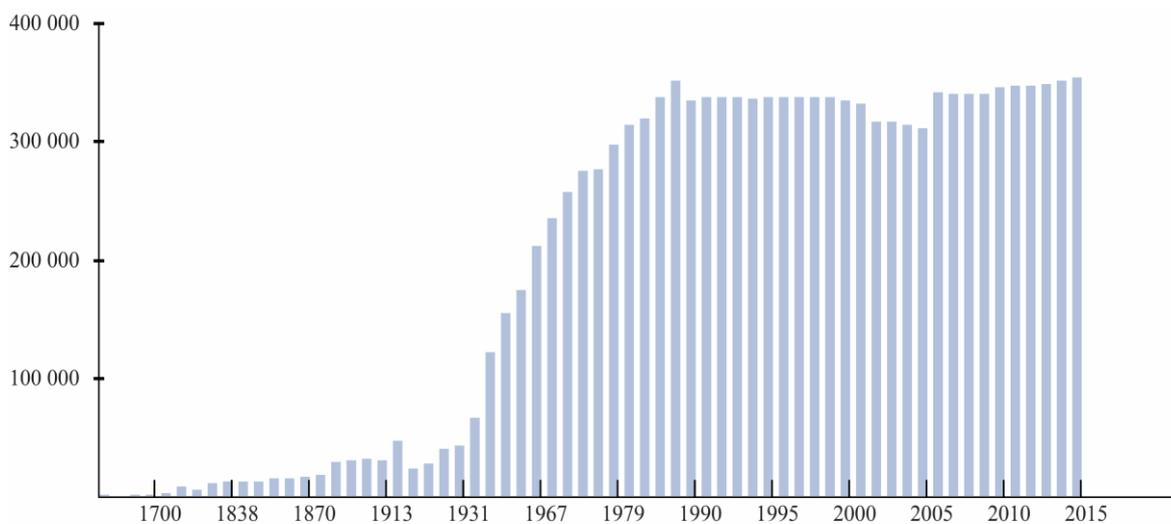


Рисунок 3.7. Динамика численности населения г. Владимир

Таблица 3.2

Численность населения г. Владимир

Год	Численность населения
1985	319000
1986	336000
1989	349702
1990	334000
1991	336000
1992	336000
1993	336000
1994	335000
1995	336000
<u>1996</u>	337000
<u>1997</u>	336000
<u>1998</u>	336000
<u>1999</u>	336000
<u>2000</u>	334000
<u>2001</u>	331700

Год	Численность населения
<u>2002</u>	315954
<u>2003</u>	316000
<u>2004</u>	313000
<u>2005</u>	310500
<u>2006</u>	340700
<u>2007</u>	339900
<u>2008</u>	339500
<u>2009</u>	339779
<u>2010</u>	345373
<u>2011</u>	346177
<u>2012</u>	345907
<u>2013</u>	347930
<u>2014</u>	350087
<u>2015</u>	352681

Медианная численность населения г. Владимир принимаемая в оценках радиационного риска стохастических эффектов и ДИ 95 %:

$$\text{man}_0 = 336000 \pm 17666 \text{ чел.}$$

Из-за физических свойств радона и наиболее большей его распространённости на нижних этажах берем для подсчета численность популяции проживающих именно на них. Для нас наибольший интерес представляют люди, подвергающиеся повышенной дозе и высокой дозе. Поэтому для расчетов мы должны узнать общую численность населения, после чего выявить, сколько живёт на нижних этажах.

Оценка численности экспонируемой популяции.

Среднегодовая численность городской популяции лучше брать не за 1 год, а за несколько лет. Данная функция вычисляется через медиану.

Погрешности оценок, численности населения определяется через формулу:

$$\Delta_{0,95} = 1,96 \cdot \text{man}_1$$

$\text{man}_1$  - среднее значения населения в г. Владимир вычисленная через

медиану.

$\Delta_{0,95}$  – погрешность оценки с 95% ДИ.

1,96- Коэффициент Стьюдента для 95% ДИ.

$$\Delta_{0,95}=21641$$

Численность экспонируемой популяции ( $n_{эп}$ ), т.е. популяции проживающих и работающих на первых, подвальных и полуподвальных этажах зданий:

$$man_e = man_0 \cdot w_e \quad (3.3.25)$$

где  $man_0$ - общая численность популяции

$$man_e = 336000 \cdot 0,221 \quad (3.3.26)$$

$$man_e = 74256 \text{ чел.}$$

Оценка абсолютной погрешности:

$$\Delta e_{95} = w_e \cdot \Delta_{0,95} + man_0 \cdot 0,001 \quad (3.3.27)$$

$$\Delta e_{95} = 0,221 \cdot 21641 + 336000 \cdot 0,001 \quad (3.3.28)$$

$$\Delta e_{95} = 5119$$

$w_e$  - процентное соотношение популяции проживающих на первых подвальных и полуподвальных этажах строений. Собственные оценки проживающих на первых подвальных и полуподвальных этажах зданий.

Оценка относительной погрешности:

$$\Delta_{E1} = \frac{\Delta e_{0,95}}{man_e} \quad (3.3.29)$$

$$\Delta_{E1} = \frac{5119}{74256} \quad (3.3.30)$$

$$\Delta_{E1} \approx 0,069$$

$\Delta_{E1}$  – Оценка относительной погрешности популяции с повышенной дозовой нагрузкой (более 5 мЗв/год).

Вероятность получить индивидуальную годовую эффективную дозу облучения, превышающую 5 мЗв/год за счет материнских и короткоживущих дочерних продуктов изотопов радона в воздухе рассчитывается по формуле:

$$man2 = mane \cdot w2 \quad (3.3.31)$$

Оценка численности городской субпопуляции со средним и высоким уровнем облучения (более 5 мЗв/год) и ДИ 95 %:

$$man2 \approx 74256 \cdot 0,061 \quad (3.3.32)$$

$$man2 = 4545 \text{ чел.}$$

Оценка абсолютной погрешности:

$$\Delta 2_{0,95} = w2 \cdot \Delta e_{0,95} + mane \cdot 0,001 \quad (3.3.33)$$

$$\Delta 2_{0,95} = 0,061 \cdot 5119 + 74256 \cdot 0,001 \quad (3.3.34)$$

$$\Delta 2_{0,95} = 388$$

Оценка относительной погрешности:

$$\Delta_{E2} = \frac{\Delta 2_{0,95}}{man2} \quad (3.3.35)$$

$$\Delta_{E2} = \frac{388}{4545} \quad (3.3.36)$$

$$\Delta_{E2} = 0,085$$

$\Delta_{E2}$  - Оценка относительной погрешности с низкой дозовой нагрузкой (0,5 – 5 мЗв/год).

Вероятность получить индивидуальную годовую эффективную дозу облучения, с низкой дозовой нагрузкой (0,5 – 5 мЗв/год) за счет материнских и короткоживущих дочерних продуктов изотопов радона в воздухе рассчитывается по формуле:

$$man1 = w1 \cdot mane \quad (3.3.37)$$

$$man1 = 74256 \cdot 0,749 \quad (3.3.38)$$

$$man1 = 55653$$

Оценка абсолютной погрешности:

$$\Delta 1_{0,95} = w1 \cdot \Delta e_{0,95} + mane \cdot 0,001 \quad (3.3.39)$$

$$\Delta 1_{0,95} = 0,749 \cdot 5119 + 74256 \cdot 0,001 \quad (3.3.40)$$

$$\Delta I_{0,95} = 3911$$

Оценка относительной погрешности:

$$\Delta_{E3} = \frac{\Delta I_{0,95}}{man1} \quad (3.3.41)$$

$$\Delta_{E3} = \frac{3911}{55653} \quad (3.3.42)$$

$$\Delta_{E3} = 0,07$$

$\Delta_{E3}$  - Оценка относительной погрешности с фоновой нагрузкой до 0,5 мЗв/год.

Вероятность получить индивидуальную годовую эффективную дозу облучения, с фоновой нагрузкой 0,5 мЗв/год за счет материнских и короткоживущих дочерних продуктов изотопов радона в воздухе рассчитывается по формуле:

$$man0 = w0 \cdot mane + (1 - we) \cdot man_0 \quad (3.3.43)$$

$$man0 = 74256 \cdot 0,189 + (1 - 0,221) \cdot 336000 \quad (3.3.44)$$

$$man0 = 275802$$

Оценка абсолютной погрешности:

$$\Delta 0_{0,95} = mane \cdot 0,001 + (1 - we) \cdot \Delta e_{0,95} \cdot man_0 \cdot 0,001 \quad (3.3.45)$$

$$\Delta 0_{0,95} = 74256 \cdot 0,001 + (1 - 0,221) \cdot 5119 - 336000 \cdot 0,001 \quad (3.3.46)$$

$$\Delta 0_{0,95} = 16597$$

Оценка относительной погрешности:

$$\Delta_{E4} = \frac{\Delta 0_{0,95}}{man0} \quad (3.3.47)$$

$$\Delta_{E4} \approx \frac{16597}{275802} \quad (3.3.48)$$

$$\Delta_{E4} = 0,06$$

Уточненная оценка численности экспонируемой популяции, чел.

$$man1 = mane \cdot (1 - we) \quad (3.3.49)$$

$$mane1 = 74256 \cdot (1 - 0,221) \quad (3.3.50)$$

$$mane1 = 57845$$

Оценка абсолютной погрешности:

$$\Delta e1_{0,95} = (1 - we) \cdot \Delta e_{0,95} \cdot mane \cdot 0,001 \quad (3.3.51)$$

$$\Delta e1_{0,95} = (1 - 0,221) \cdot 5119 - 74256 \cdot 0,001 \quad (3.3.52)$$

$$\Delta e1_{0,95} = 3913$$

Оценка относительной погрешности:

$$\Delta_{E5} = \frac{\Delta e1_{0,95}}{mane1} \quad (3.3.53)$$

$$\Delta_{E5} = \frac{3913}{57845} \quad (3.3.54)$$

$$\Delta_{E5} \approx 0,068$$

Таким образом уточненная оценка численности экспонируемой популяции дает значение  $57845 \pm 3913$ .

Оценка годовой экспозиции по скрытой энергии при средних, высоких и низких уровнях облучения была представлена для верхней оценки, центральной тенденции и нижней границы. Также были определены относительные погрешности.

### Выводы к главе 3

1. 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 возможность регистрации уровней ЭРОА радона в воздухе помещений и на территории г. Владимира.

2. 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, поскольку требуются: 1) учет пространственно-временных закономерностей распределения радона на территории города, т.к. геолого-геофизические параметры территорий большинства городов изучены плохо [81, 80] 2) учет отклонений статистики от логнормального закона распределения, связанных с возможной неравнозначностью воздействия на эксхалацию 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 [33].

3. На этапе «идентификация опасности» на основе данных замеров установлены параметры для закона распределения значений ЭРОА в воздухе помещений в зданиях на территории г. Владимир. Экспериментальные данные удовлетворительно аппроксимируется функцией, относящейся к классу экспоненциальных распределений. 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.

4. Получена кривая, где показатель степени составляет 3,563, который отличается от логнормального распределения ( $\alpha = 2$ ), что указывает на неравнозначность факторов эксхалации 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.

5. 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.

6. 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, содержащая эффективную дозу, является лучшим подходом для защиты от облучения и источников облучения [109] 2) уровень эффективных доз облучения от природных источников воздействия характеризуют степень радиационной безопасности населения [58] 3) уровни облучения населения изотопами радона определяют радиационную обстановку в жилых, общественных и других зданиях [58], в которых люди проводят большую часть времени [60] 4) вариабельность ОА радона определяет высокую степень неоднородности распределения уровней облучения [110] 5) главная дозиметрическая величина, эффективная доза, устанавливает дозу для референтного человека с параметрами, усредненными по полу и возрасту, при облучении от радона рассматривается как мера, пропорциональная радиационному риску / ущербу [109].

7. 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 [60, 109]. Полученная кривая в среде Mathcad удовлетворительно аппроксимируется функцией с показателем степени равным 2,412.

8. Для экспонируемой популяции, то есть работающих и проживающих на первых подвальных и полуподвальных этажах зданий, путем интегрирования полученной функции плотности распределения вероятности в соответствующих диапазонах эффективных доз оценены вероятности регистрации средних и высоких – 6,1 %, низких – 74,9 %, а также вероятности регистрации фоновых уровней радонового облучения – 18,9 %.

9. Окончательное уточнение пути прохождения вещества, от его возникновения до попадания в организм проводится на этапе оценки экспозиции. Выбирается сценарий и проводится анализ найденных 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 [119, 115, 112, 116]. Причина этого состоит в наличии конкурирующих факторов, действие которых имеет тенденцию взаимно компенсироваться.

10. Альфа-излучение, испускаемое смесью короткоживущих дочерних продуктов радона 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 [109] 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 информация о количестве курящих среди различных половозрастных групп населения на регулярной основе в России не собираются [33].

11. Принято считать, что влияние радона относится к ситуации существующего природного облучения, поскольку его источником являются радионуклиды в земной коре [108, 109]. Человек своей деятельностью может создавать или изменять пути поступления радона, повышая его концентрацию внутри помещений по сравнению с уровнем на открытой местности. Поэтому принципы регулирования радонового облучения основаны на установлении референтных уровней и применении принципа оптимизации при принятии и реализации мер защиты [108, 110]. 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.

12. Транспорт радона от мест эманирования реализуется с потоком воздуха через поры почвы (грунта), а накопление может наблюдаться в воздухе помещений на первых этажах зданий. Население подвергается влиянию радона в различных помещениях. Радон, являясь инертным газом, почти весь после вдыхания в дальнейшем выдыхается, но большая часть его ДПР после вдыхания отлагается в дыхательных путях легких.

13. 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  $6,5 \text{ Бк/м}^3$  [124]. Вариабельность ОА радона определяет высокую степень неоднородности распределения экспозиций и уровней облучения, что делает оправданным в нашем исследовании выделение в сценарии

экспозиции условий высокого, среднего, низкого и фоновой уровней радонового облучения.

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

15. Ингаляция – основной путь поступления радона, при этом его ДПР могут вызвать рак 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 ДПР [109]. Таким образом, оценке подлежат *экспозиция и риск* радиационно-индуцированного рака легкого как результат *изолированного воздействия* радонового облучения.

16. Рассчитывались как среднегодовая, так и накопленная к возрасту 70 лет (средней продолжительности жизни населения в г. Владимир) экспозиция. При этом в расчетах было сделано два допущения: 1) об отсутствии миграции населения в течение жизни; 2) о постоянстве уровня ЭРОА радона в течение всей жизни. Вынужденность принятия данных допущений в том, что полную и корректную реконструкцию условий облучения на протяжении столь долгого срока практически невозможно провести даже в условиях строгого эпидемиологического исследования [31].

17. В частоте воздействия учитывался тот факт, что помещениях люди проводят большую часть времени – около 80 % [124]. В Форме федерального

статистического наблюдения № 4-ДОЗ для населения РФ относительное время пребывания в помещениях также принято равным 0,8 [83, 89].

18. 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 тысяч 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 фоновых уровней радонового облучения.

19. 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.

20. 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

### 4.1 Характеристика риска

Несмотря на множество методик оценки радиационного риска для здоровья людей при воздействии радоном, а также слабости проработки данного вопроса в России главным входным параметром для всех моделей оценки риска является содержание радона в воздухе помещений, которое может быть представлено в виде ЭРОА радона, ОА радона, они имеют близкое к логнормальному распределению и основным параметром этого распределения, который используется для расчета экспозиции радоном и его ДПР, является медиана [32]. Существующие преимущественно зарубежные модели направлены на оценку относительного риска с учетом влияния фактора табакокурения и для практического применения являются сложными и громоздкими [31].

На четвертом этапе «характеристика риска» реализована последовательность расчетов, включающая оценку: 1) дополнительного пожизненного абсолютного номинального риска радиационно-индуцированного рака легкого, скорректированного на ущерб; 2) дополнительного пожизненного абсолютного номинального риска радиационно-индуцированного смертельного рака легкого, взвешенного по летальности; 3) дополнительного пожизненного абсолютного номинального риска возникновения радиационно-индуцированного рака легкого; 4) ожидаемого дополнительного относительного риска возникновения радиационно-индуцированного рака легкого; 5) ожидаемого относительного риска радиационно-индуцированного рака легкого; 6) дополнительного популяционного среднегодового риска возникновения радиационно-индуцированного рака легкого.

Характеристика опасности среды помещений в зданиях города, региона от радонового облучения должна включать оценку ущерба (рисунок 4.1), так как:

1) рассматриваемая задача является логическим продолжением оценки риска, по своему содержанию смыкается с этапом сравнительной характеристики рисков и преследует цель нахождения причин по уменьшению, а также мониторингу экспозиций и рисков, оценке эффективности и поправки социально значимых мероприятий;

2) сравнивать риски можно, лишь используя критерии ущерба здоровью, поскольку сама по себе величина риска – это вероятность развития какого-либо негативного эффекта, в нем не рассматривается ни патогенез, ни уровень тяжести негативных эффектов, ни численность экспонируемой популяции (кроме популяционного риска);

3) цель регулирования радоновой проблемы должна заключаться не только в уменьшении индивидуальных рисков, касающихся радона, для наиболее облучаемых людей, но и в последовательном уменьшении общего коллективного риска (ущерба) для всего населения.

Статистическая значимость увеличения показателей риска и ущерба от заболевания радон-индуцированного рака легкого подтверждается:

1) оценками относительного риска возникновения радон-индуцированного рака легкого;

2) оценками границ 95 % ДИ оцениваемых показателей;

3) оценками минимально необходимого для обследования количества зданий, отобранных методом простого случайного отбора.

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 экономический 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.

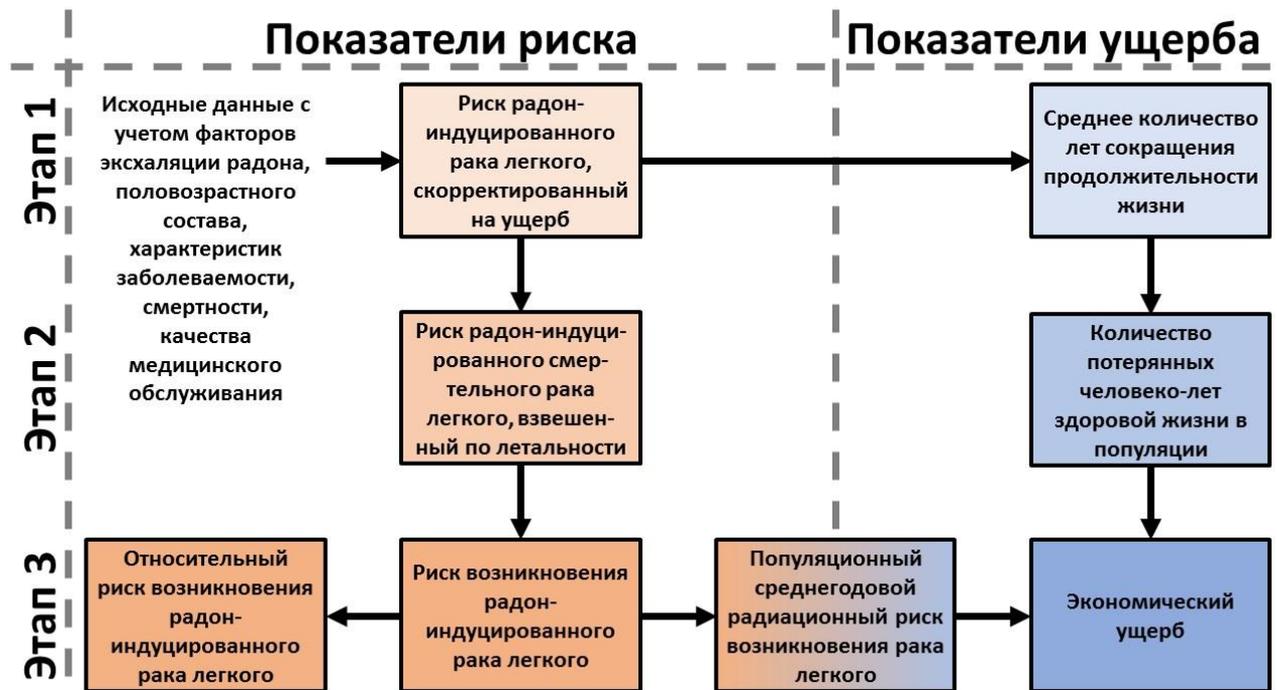


Рисунок 4.1. Схема оценки радиационного риска и ущерба

После коррекции на случайные погрешности уровней ОА радона европейское объединенное исследование случай-контроль в жилищах дало значение дополнительного относительного риска, равное 16% (ДИ 95%: 5% – 32%) на  $100 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$  [97, 109, 130]. Такое значение рассматривалось в качестве обоснованной оценки для управления риском при довольно низких значениях долгого воздействия радоном в домах, учитывая, что этот риск связан с периодом облучения, равным, по меньшей мере, 25 годам.

В работе [109] говорится, что показатели абсолютного риска рака легкого к 75 годам, найденное для населения, никогда не употреблявших сигареты, будет 0,4%, 0,5% и 0,7% при ОА радона 0, 100 и  $400 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$  соответственно. Для всегда употреблявших сигареты базовый риск возникновения рака легкого примерно в 25 раз выше, чем для никогда не куривших. Риск заболеть раком легкого к 75 годам для употреблявших

сигареты в течении всей жизни при тех же уровнях объемной активности радона составляет около 10%, 12% и 16% соответственно. Для курящих наблюдается мультипликативный эффект от сочетанного действия курения и радона.

Избыточный риск смерти от вызванного радоном рака легких в течение жизни (к возрасту 75 лет) составляет для лиц, никогда не куривших,  $0,6 \cdot 10^{-5}$  на каждый Бк/м<sup>3</sup>, для курильщиков (15–24 сигареты в день) –  $15 \cdot 10^{-5}$  на каждый Бк/м<sup>3</sup>, для лиц, куривших в прошлом, значения риска промежуточные, в зависимости от срока с момента отказа от курения [9].

Относительное повышение заболеваемости раком легкого для курильщиков и некурящих было похожем (~16% на 100 Бк·м<sup>-3</sup>), а абсолютный риск для них различен более чем на порядок из-за различной частоты спонтанной заболеваемости [109, 130].

Радон имеет намного выше шанс вызвать рак легкого у курящих или у тех, кто курил раньше, чем у никогда не куривших, существующие сведения указывают на то, что он является главной причиной рака легкого у людей, которые никогда не курили, несмотря на это в докладе WHO 2009 года Комиссия рекомендует не делать различия между этими категориями населения при проведении радонозащитных мероприятий [110, 127, 114, 121].

Доля смертельных случаев радон-индуцированного рака легких для некурящих (30,84% среди всего населения Санкт-Петербурга, 30,43% среди мужчин, 52,17% среди женщин) почти в два раза, а среди женщин почти в четыре раза выше, чем в когорте курящих (16,43% среди всего населения, 17,2% среди мужчин, 13,52% среди женщин) [33]. Эта информация хорошо согласуется с данными во Франции, где среди курящих доля смертельных случаев радон-индуцированного рака легких составляет от 8 до 11%, среди некурящих – от 36 до 50% [93].

За время изучения радона, имеющиеся эпидемиологические данные показывают отсутствие убедительных доказательств наличия связи между

его объемной активностью и онкологическими заболеваниями других локализаций кроме легкого [109, 34].

Риск и его характеристики выражаются через ущерб, который определяется в три этапа. На первом этапе оценивается риск взвешенный по ущербу ( $R_3$ ). На втором этапе риск взвешивается по летальности ( $R_2$ ). На третьем этапе по возникновению заболеваемости ( $R_1$ ).

Оценка численности субпопуляции с уровнем дополнительного пожизненного номинального абсолютного риска радиационно-индуцированного рака легкого скорректированный на ущерб.

$$R_3 = k' \cdot P_1 \cdot \Delta t \quad (4.1.1)$$

$k'$ -номинальный коэффициент равный 0,14 ( $\text{Дж}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{м}^3$ )

$P_1$  – годовая экспозиция по скрытой энергии  $\alpha$  излучения. ( $\text{Дж} \cdot \text{ч} \cdot \text{м}^{-3} / \text{год}$ )

$\Delta t$  - Продолжительность жизни при расчете дополнительного пожизненного абсолютного риска для населения г. Владимира равная 70 годам.

A2 – Среднегодовой уровень ЭРОА (Бк/м.куб.) при средней и высокой дозовой нагрузке (до 5 мЗв/ год).

Дополнительный пожизненный абсолютный номинальный риск радиационно-индуцированного рака легкого, скорректированный на ущерб.

Для субпопуляции со средним и высоким уровнем облучения:

Для нижней границы:

$$\Delta ICRU2_{min} = k' \cdot P(A01) \cdot t_{жс} \quad (4.1.2)$$

$$\Delta ICRU2_{min} = 0,14 \cdot (2,9 \cdot 10^{-3}) \cdot 70 \quad (4.1.3)$$

$$\Delta ICRU2_{min} = 2,9 \cdot 10^{-2}$$

Для центральной тенденции:

$$\Delta ICRU2 = k' \cdot P2 \cdot t_{жс} \quad (4.1.4)$$

$$\Delta ICRU2 = 0,14 \cdot (4 \cdot 10^{-3}) \cdot 70 \quad (4.1.5)$$

$$\Delta ICRU2 = 3,7 \cdot 10^{-2}$$

Для верхней оценки:

$$\Delta ICRU2_{max} = k' \cdot P(e^{(ac+ka \cdot \sigma a)}) \cdot t_{жс} \quad (4.1.6)$$

$$\Delta ICRU2_{max} = 0,14 \cdot (4,3 \cdot 10^{-3}) \cdot 70 \quad (4.1.7)$$

$$\Delta ICRU2_{max} = 4,2 \cdot 10^{-2}$$

где  $\Delta$  – дополнительный риск

I - индивидуальный риск

C – канцерогенный риск

R – риск возникновения

U2 – Риск по ущербу

$k'$ -номинальный коэффициент равный 0,14 (Дж<sup>-1</sup>·ч<sup>-1</sup>·м<sup>3</sup>)

Для субпопуляции с низким уровнем облучения

Для нижней границы:

$$\Delta ICRU1_{min} = k' \cdot P(6,5) \cdot t_{жс} \quad (4.1.8)$$

$$\Delta ICRU1_{min} = 0,14 \cdot (3,2 \cdot 10^{-4}) \cdot 70 \quad (4.1.9)$$

$$\Delta ICRU1_{min} = 3,1 \cdot 10^{-3}$$

Для центральной тенденции:

$$\Delta ICRU1 = k' \cdot P1 \cdot t_{жс} \quad (4.1.10)$$

$$\Delta ICRU1 = 0,14 \cdot (8,7 \cdot 10^{-4}) \cdot 70 \quad (4.1.11)$$

$$\Delta ICRU1 = 8 \cdot 10^{-3}$$

Для верхней оценки:

$$\Delta ICRU1_{max} = k' \cdot P(A01) \cdot t_{жс} \quad (4.1.12)$$

$$\Delta ICRU1_{max} = 0,14 \cdot (2,9 \cdot 10^{-3}) \cdot 70 \quad (4.1.13)$$

$$\Delta ICRU1_{max} = 2,9 \cdot 10^{-2}$$

Для субпопуляции с минимальным (фоновым) уровнем радонового облучения.

$$\Delta ICRU0 = k' \cdot P0 \cdot t_{жс} \quad (4.1.14)$$

$$\Delta ICRU0 = 0,14 \cdot (3,18 \cdot 10^{-3}) \cdot 70 \quad (4.1.15)$$

$$\Delta ICRU0 = 3,1 \cdot 10^{-3}$$

Дополнительный пожизненный абсолютный номинальный риск

радиационно-индуцированного смертельного рака легкого, взвешенный по летальности.

Коэффициент относительной потери времени жизни без рака ( $k_u$ ) равное 0,8.

Для субпопуляции со средним и высоким уровнем облучения.

Для нижней границы:

$$\Delta ICRL2_{min} = \frac{\Delta ICRU2_{min}}{k_u} \quad (4.1.16)$$

где L – риск взвешенный по летальности.

$$\Delta ICRL2_{min} = \frac{2,9 \cdot 10^{-2}}{0,8} \quad (4.1.17)$$

$$\Delta ICRL2_{min} = 3,6 \cdot 10^{-2}$$

Для центральной тенденции:

$$\Delta ICRL2 = \frac{\Delta ICRU2}{k_u} \quad (4.1.18)$$

$$\Delta ICRL2 = \frac{3,7 \cdot 10^{-2}}{0,8} \quad (4.1.19)$$

$$\Delta ICRL2 = 4,6 \cdot 10^{-2}$$

Для верхней оценки:

$$\Delta ICRL2_{max} = \frac{\Delta ICRU2_{max}}{k_u} \quad (4.1.20)$$

$$\Delta ICRL2_{max} = \frac{4,2 \cdot 10^{-2}}{0,8} \quad (4.1.21)$$

$$\Delta ICRL2_{max} = 5,3 \cdot 10^{-2}$$

Для субпопуляции с низким уровнем облучения.

Для нижней границы:

$$\Delta ICRL1_{min} = \frac{\Delta ICRU1_{min}}{k_u} \quad (4.1.22)$$

$$\Delta ICRL1_{min} = \frac{3,1 \cdot 10^{-3}}{0,8} \quad (4.1.23)$$

$$\Delta ICRL1_{min} = 3,9 \cdot 10^{-3}$$

Для центральной тенденции:

$$\Delta ICRL1 = \frac{\Delta ICRU1}{k_u} \quad (4.1.24)$$

$$\Delta ICRL1 = \frac{8 \cdot 10^{-3}}{0,8} \quad (4.1.25)$$

$$\Delta ICRL1 = 1 \cdot 10^{-2}$$

Для верхней оценки:

$$\Delta ICRL1_{\max} = \frac{\Delta ICRU1_{\max}}{k_u} \quad (4.1.26)$$

$$\Delta ICRL1_{\max} = \frac{2,9 \cdot 10^{-2}}{0,8} \quad (4.1.27)$$

$$\Delta ICRL1_{\max} = 3,6 \cdot 10^{-2}$$

Для субпопуляции с минимальным (фоновым) уровнем радонового облучения:

$$\Delta ICRL0 = \frac{\Delta ICRU0}{k_u} \quad (4.1.28)$$

$$\Delta ICRL0 = \frac{3,1 \cdot 10^{-3}}{0,8} \quad (4.1.29)$$

$$\Delta ICRL0 = 3,9 \cdot 10^{-3}$$

Оценка численности субпопуляции с уровнем дополнительного пожизненного номинального абсолютного риска радиационно-индуцированного смертельного рака легкого, взвешенный по летальности [75]:

$$\Delta ICR = \frac{\Delta ICRL}{q + (1 - q) \cdot ((1 - qm) \cdot q + qm)} \quad (4.1.30)$$

Риск возникновения злокачественных новообразований, индуцированных воздействием ионизирующих излучений ( $\Delta ICR$ ) – это оценка риска, выстраиваемая с использованием математических моделей, основанных на данных эпидемиологических исследований, в т.ч. и для риска возникновения радиационно-индуцированного рака легкого. Так как риск, взвешенный по летальности ( $\Delta ICRL$ ), рассматривается как сумма вероятности возникновения радиационно-индуцированного смертельного рака данной нозологии и вероятности с учетом вреда от несмертельных

раков, зависящей от летальности данной нозологической формы, то обратный расчет риска возникновения радиационно-индуцированного рака легкого проводится по формуле:

$$R_2 = f(RL) \cdot q + f(RL) \cdot (1 - q) \cdot ((1 - qm) \cdot q + qm) \quad (4.1.31)$$

произведение вероятности ( $R_1$ ) возникновения данной нозологической формы онкологического заболевания на его летальность  $q$ .

Где  $(1 - qm) \cdot q + qm$  – вес, присваиваемый не смертельным ракам, при этом  $qm$  – минимальный вес, который может быть присвоен не смертельному раку, – принят равным 0,1.

$q$ - доля летальности рака легкого 0,89

Дополнительный пожизненный абсолютный радиационный риск возникновения рака легкого.

Функция пересчета для риска возникновения рака легкого:

$$f(RL) = \frac{RL}{q + (1 - q) \cdot ((1 - qm) \cdot q + qm)} \quad (4.1.32)$$

$RL$ - риск взвешенный по летальности.

$$f(RL) = \frac{RL}{0,89 + (1 - 0,89) \cdot ((1 - 0,1) \cdot 0,89 + 0,1)} \quad (4.1.33)$$

Форма характеристики риска может быть разной от описательной до полуколичественной и даже количественной, но чаще всего используется комбинация этих подходов. Характеристика риска является связующим звеном между оценкой риска для здоровья и управлением риском. На данном этапе характеристика риска описана количественной формой.

Для субпопуляции со средним и высоким уровнем облучения.

Для нижней границы:

$$\Delta ICR2_{min} = f(\Delta ICRL2_{min}) \quad (4.1.34)$$

$$\Delta ICR2_{min} = f(3,6 \cdot 10^{-2}) \quad (4.1.35)$$

$$\Delta ICR2_{min} = 3,6 \cdot 10^{-2}$$

Для центральной тенденции:

$$\Delta ICR2 = f(\Delta ICRL2) \quad (4.1.36)$$

$$\Delta ICR2 = f(4,6 \cdot 10^{-2}) \quad (4.1.37)$$

$$\Delta ICR2 = 4,7 \cdot 10^{-2}$$

Для верхней оценки:

$$\Delta ICR2_{\max} = f(\Delta ICRL2_{\max}) \quad (4.1.38)$$

$$\Delta ICR2_{\max} = f(5,3 \cdot 10^{-2}) \quad (4.1.39)$$

$$\Delta ICR2_{\max} = 5,4 \cdot 10^{-2}$$

Для субпопуляции с низким уровнем облучения.

Для нижней границы:

$$\Delta ICR1_{\min} = f(\Delta ICRL1_{\min}) \quad (4.1.40)$$

$$\Delta ICR1_{\min} = f(3,9 \cdot 10^{-3}) \quad (4.1.41)$$

$$\Delta ICR1_{\min} = 3,9 \cdot 10^{-3}$$

Для центральной тенденции:

$$\Delta ICR1 = f(\Delta ICRL1) \quad (4.1.42)$$

$$\Delta ICR1 = f(1 \cdot 10^{-2}) \quad (4.1.43)$$

$$\Delta ICR1 = 1 \cdot 10^{-2}$$

Для верхней оценки:

$$\Delta ICR1_{\max} = f(\Delta ICRL1_{\max}) \quad (4.1.44)$$

$$\Delta ICR1_{\max} = f(3,6 \cdot 10^{-2}) \quad (4.1.45)$$

$$\Delta ICR1_{\max} = 3,6 \cdot 10^{-2}$$

Для субпопуляции с минимальным (фоновым) уровнем радонового облучения.

$$\Delta ICR0 = f(\Delta ICRL0) \quad (4.1.46)$$

$$\Delta ICR0 = f(3,9 \cdot 10^{-3}) \quad (4.1.47)$$

$$\Delta ICR0 = 3,9 \cdot 10^{-3}$$

Функция вычисления относительного риска при уровне статической значимости 0,05 методом анализа четырехпольных таблиц сопряженности.

$$RR_{95}(a, b, c, d) = \left\| \begin{array}{l} RR_0 \leftarrow \frac{a \cdot (c + d)}{c \cdot (a + b)} \\ \sigma \leftarrow \sqrt{\frac{b}{a \cdot (a + b)} + \frac{d}{c \cdot (c + d)}} \\ RR_1 \leftarrow e^{\ln(RR_0) - 1,96 \cdot \sigma} \\ RR_2 \leftarrow e^{\ln(RR_0) + 1,96 \cdot \sigma} \\ RR \end{array} \right\| \quad (4.1.48)$$

Построение четырехпольной таблицы сопряженности и оценка относительного риска для субпопуляции со средним и высоким уровнем облучения.

$$a_2 = \text{round}(man2 \cdot \Delta ICR2) = 212 \quad (4.1.49)$$

$$b_2 = \text{round}(man2 \cdot (1 - \Delta ICR2)) = 4333 \quad (4.1.50)$$

$$c_0 = \text{round}(man0 \cdot \Delta ICR0) = 1086 \quad (4.1.51)$$

$$d_0 = \text{round}(man0 \cdot (1 - \Delta ICR0)) = 274716 \quad (4.1.52)$$

Вычисление RR.

$$RR2 = RR_{95}(a_2, b_2, c_0, d_0) \quad (4.1.53)$$

Относительный риск

$$RR2_0 = 11,846$$

Нижняя граница ДИ 95%

$$RR2_1 = 10,255$$

Верхняя граница ДИ 95%

$$RR2_2 = 13,684$$

Построение четырехпольной таблицы сопряженности и оценка относительного риска для субпопуляции с низким уровнем облучения.

$$a_1 = \text{round}(man1 \cdot \Delta ICR2) = 597 \quad (4.1.54)$$

$$b_1 = \text{round}(man1 \cdot (1 - \Delta ICR1)) = 55056 \quad (4.1.55)$$

$$c_0 = \text{round}(man0 \cdot \Delta ICR0) = 1086 \quad (4.1.56)$$

$$d_0 = \text{round}(man0 \cdot (1 - \Delta ICR0)) = 274716 \quad (4.1.57)$$

Вычисление RR.

$$RR1 = RR_{95}(a_1, b_1, c_0, d_0) \quad (4.1.58)$$

Относительный риск

$$RR1_0 = 2,724$$

Нижняя граница ДИ 95%

$$RR1_1 = 2,466$$

Верхняя граница ДИ 95%

$$RR1_2 = 3,009$$

Дополнительный популяционный среднегодовой радиационный риск стохастических эффектов, 1/год.

Для субпопуляции со средним и высоким уровнем облучения

Для нижней границы:

$$\Delta PCR2_{\min} = \Delta ICR2_{\min} \cdot \frac{(\text{man}2 - \Delta 2_{0,95})}{t_{\text{ж}}} \quad (4.1.59)$$

$$\Delta PCR2_{\min} = 3,6 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{4545 - 388}{70} \quad (4.1.60)$$

$$\Delta PCR2_{\min} = 2,2$$

Для центральной тенденции:

$$\Delta PCR2 = \Delta ICR2 \cdot \frac{\text{man}2}{t_{\text{ж}}} \quad (4.1.61)$$

$$\Delta PCR2 = 4,7 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{4545}{70} \quad (4.1.62)$$

$$\Delta PCR2 = 3$$

Для верхней оценки:

$$\Delta PCR2_{\max} = \Delta ICR2_{\max} \cdot \frac{(\text{man}2 + \Delta 2_{0,95})}{t_{\text{ж}}} \quad (4.1.63)$$

$$\Delta PCR2_{\max} = 5,4 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{4545 + 388}{70} \quad (4.1.64)$$

$$\Delta PCR2_{\max} = 3,8$$

$PCR$  – популяционный канцерогенный риск.

Для субпопуляции с низким уровнем облучения.

Для нижней границы:

$$\Delta PCR1_{\min} = \Delta ICR1_{\min} \cdot \frac{(man1 - \Delta I_{0,95})}{t_{\text{жс}}} \quad (4.1.65)$$

$$\Delta PCR1_{\min} = 3,9 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{55653 - 3911}{70} \quad (4.1.66)$$

$$\Delta PCR1_{\min} = 2,9$$

Для центральной тенденции:

$$\Delta PCR1 = \Delta ICR1 \cdot \frac{man1}{t_{\text{жс}}} \quad (4.1.67)$$

$$\Delta PCR1 = 1 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{55653}{70} \quad (4.1.68)$$

$$\Delta PCR1 = 8,5$$

Для верхней оценки:

$$\Delta PCR1_{\max} = \Delta ICR1_{\max} \cdot \frac{(man1 + \Delta I_{0,95})}{t_{\text{жс}}} \quad (4.1.69)$$

$$\Delta PCR1_{\max} = 3,6 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{55653 + 3911}{70} \quad (4.1.70)$$

$$\Delta PCR1_{\max} = 31$$

Для субпопуляции с минимальным (фоновым) уровнем радонового облучения.

Для центральной тенденции:

$$\Delta PCR0 = \Delta ICR0 \cdot \frac{man0}{t_{\text{жс}}} \quad (4.1.71)$$

$$\Delta PCR0 = 3,9 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{336000}{70} \quad (4.1.72)$$

$$\Delta PCR0 = 15,5$$

Для верхней оценки:

$$\Delta PCR0_{\max} = \Delta ICR0_{\phi} \cdot \frac{(man0 + \Delta I_{0,95})}{t_{\text{жс}}} \quad (4.1.73)$$

$$\Delta PCR0_{\max} = 3,9 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{336000 + 16597}{70} \quad (4.1.74)$$

$$\Delta PCR0_{\max} = 16,5$$

Распределение дополнительного популяционного среднегодового радиационного риска стохастических эффектов.

Суммарный популяционный риск (центральная тенденция):

$$\Delta PCR2 + \Delta PCR1 + \Delta PCR0 \quad (4.1.75)$$

$$3 + 8,5 + 15,5 = 27,1 \quad (4.1.76)$$

Нормализованный показатель заболеваемости (центральная тенденция), на 100000 чел:

$$inc_c = \frac{\Delta PCR2 + \Delta PCR1 + \Delta PCR0}{man_0} \cdot 100000 \quad (4.1.77)$$

$$inc_c = \frac{3 + 8,5 + 15,5}{336000} \cdot 100000 \quad (4.1.78)$$

$$inc_c = 8,1$$

Суммарный популяционный риск (верхняя оценка):

$$\Delta PCR2_{max} + \Delta PCR1_{max} + \Delta PCR0 \quad (4.1.79)$$

$$3,8 + 31 + 15,5 = 50,3 \quad (4.1.80)$$

Нормализованный показатель заболеваемости (верхняя оценка), на 100000 чел:

$$inc_{max} = \frac{\Delta PCR2_{max} + \Delta PCR1_{max} + \Delta PCR0}{man_0 - 1,96 \cdot man_1} \cdot 100000 \quad (4.1.81)$$

$man_1$  – стандартное отклонение.

$$inc_{max} = \frac{3,8 + 31 + 15,5}{336000 - 1,96 \cdot man_1} \cdot 100000 \quad (4.1.82)$$

$$inc_{max} = 16$$

Вклад субпопуляции со средним и высоким уровнем облучения, %.

$$\frac{\Delta PCR2}{\Delta PCR2 + \Delta PCR1 + \Delta PCR0} \cdot 100 \quad (4.1.83)$$

$$\frac{3}{3 + 8,5 + 15,5} \cdot 100 = 11,2 \quad (4.1.84)$$

Вклад субпопуляции с низким уровнем облучения, %.

$$\frac{\Delta PCR1}{\Delta PCR2 + \Delta PCR1 + \Delta PCR0} \cdot 100 \quad (4.1.85)$$

$$\frac{8,5}{3 + 8,5 + 15,5} \cdot 100 = 31,5 \quad (4.1.86)$$

Вклад субпопуляции с минимальным (фоновым) уровнем радонового облучения, %.

$$\frac{\Delta PCR0}{\Delta PCR2 + \Delta PCR1 + \Delta PCR0} \cdot 100 \quad (4.1.87)$$

$$\frac{15,5}{3 + 8,5 + 15,5} \cdot 100 = 57,3 \quad (4.1.88)$$

Оценка вклада радонового облучения в заболеваемость раком легкого.

Где *incidence* – показатели заболеваемости (таблица 4.1).

*inc0* медиана годовых показателей заболеваемости.

*inc* медиана годовых показателей заболеваемости.

Оценка вклада радонового облучения в заболеваемость раком легкого.

Расчет данных производился в среде Mathcad.

Таблица 4.1

<i>incidence0</i>	<i>incidence</i>
39,8	20,94
33,3	18,55
34,58	18,88
40,58	23,03
38,25	21,61
40,42	23,39
35,1	20,35

*Incidence0* – массив с данными о грубых показателях заболеваемости 2008 по 2014 г.

*incidence* - массив с данными о стандартизованных по возрасту (нормальных) показателях заболеваемости с 2008 по 2014 г.

Среднегодовой "грубый" показатель заболеваемости и ДИ 95 % злокачественными новообразованиями трахеи, бронхов, легкого (С33, С34):

$$\Delta inc_{0,95} = 1,96 \cdot inc_0 \quad (4.1.89)$$

$$inc_0 = 38,3$$

$$\Delta inc_{0,95} = 1,96 \cdot inc_0 \quad (4.1.90)$$

$$\Delta inc_{0,95} = 6,4$$

$inc_0$  медиана годовых показателей заболеваемости.

Среднегодовое число и ДИ 95% регистрируемых случаев злокачественными новообразованиями трахеи, бронхов, легкого (С33, С34) на территории г. Владимир:

$$inc_0 \cdot \frac{man_0}{100000} \quad (4.1.91)$$

$$38,3 \cdot \frac{336000}{100000} = 129 \quad (4.1.92)$$

$$\Delta inc_{0,95} \cdot \frac{man_0}{100000} \quad (4.1.93)$$

$$6,4 \cdot \frac{336000}{100000} = 21 \quad (4.1.94)$$

Медианное значение и ДИ 95 % стандартизованной заболеваемости, на 100000 чел:

$$\Delta inc_{0,95} = 1,96 \cdot inc_1 \quad (4.1.95)$$

$$\Delta inc_{0,95} = 3,7$$

$$inc_0 = 20,9$$

Вклад радонового облучения в заболеваемость злокачественными новообразованиями трахеи, бронхов, легкого (С33, С34), %.

$$\frac{inc_c}{inc_0} \cdot 100 \quad (4.1.96)$$

$$\frac{8,1}{20,9} \cdot 100 = 38,5 \quad (4.1.97)$$

Обоснование размера выборки Критерий Стьюдента, соответствующий уровню надежности 95 % обозначается как  $ta$ .

$$ta = 1,96$$

Доля зданий со средним и высоким уровнями облучения:

$$wp = w2 \quad (4.1.98)$$

Доля зданий со средним и высоким уровнями облучения.

$$wp = w2 \quad (4.1.99)$$

$$w_2 = 0,061$$

Размер генеральной совокупности  $N_p$

$$N_p = 2800$$

Предельная ошибка выборки  $\Delta p$

$$\Delta p = 0,05$$

Минимально необходимое для обследования количество зданий:

$$np = \frac{ta^2 \cdot wp \cdot (1 - wp) \cdot N_p}{\Delta p^2 \cdot N_p + ta^2 \cdot wp \cdot (1 - wp)} \quad (4.1.100)$$

$$np = \frac{1,96^2 \cdot 0,061 \cdot (1 - 0,061) \cdot 2800}{0,05^2 \cdot 2800 + 1,96^2 \cdot 0,061 \cdot (1 - 0,061)} \quad (4.1.101)$$

$$np = 86$$

Минимально необходимая доля зданий для обследования:

$$\frac{np}{N_p} \cdot 100 \quad (4.1.102)$$

$$\frac{86}{2800} \cdot 100 = 3,1 \quad (4.1.103)$$

Основные полученные данные для наглядности сведены в таблицу (таблица 4.2).

Таблица 4.2

#### 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

№	Параметр	Субпопуляция		
		Со средним и высоким уровнем облучения	С низким уровнем облучения	С минимальным (фоновым) уровнем облучения
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	$4,0 \cdot 10^{-3}$ ДИ 95%: $2,9 \cdot 10^{-3} - 4,3 \cdot 10^{-3}$	$8,7 \cdot 10^{-4}$ ДИ 95%: $3,2 \cdot 10^{-4} - 2,9 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$
5	Оценка пожизненной экспозиции по скрытой энергии $\alpha$ -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	$3,7 \cdot 10^{-2}$ ДИ 95%: $2,9 \cdot 10^{-2} - 4,2 \cdot 10^{-2}$	$8,0 \cdot 10^{-3}$ ДИ 95%: $3,1 \cdot 10^{-3} - 2,9 \cdot 10^{-2}$	$3,1 \cdot 10^{-3}$
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	–

№	Параметр	Субпопуляция		
		Со средним и высоким уровнем облучения	С низким уровнем облучения	С минимальным (фоновым) уровнем облучения
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

Оценки атрибутивного риска для подгруппы населения со средним и высоким уровнем облучения дают значения (14,1 %), превышающие 5 %, т.е. являются существенными и статистически значимыми. Величина 5 % – есть допустимая статистическая ошибка, которая определяется при оценке достоверности различий в уровне заболеваемости по территориям наблюдения.

Суммарный популяционный среднегодовой риск для г. Владимир: центральная тенденция – 27,1 случая рака легкого в год; верхняя оценка – 50,3 случая рака легкого в год.

Вклад в заболеваемость раком легкого: а) субпопуляция со средним и высоким уровнем облучения – 11,2 %; б) субпопуляция с низким уровнем облучения – 31,5 %; в) субпопуляция с минимальным (фоновым) уровнем радонового облучения – 57,3 %.

Нормализованный показатель заболеваемости, на 100000 чел: центральная тенденция – 8,1; верхняя оценка – 16,0.

В 2014 году в структуре онкологической заболеваемости населения второе место занимают злокачественные новообразования трахеи, бронхов и легкого, а среди мужчин занимают первое место (19%).

Среднегодовое число и ДИ 95 % регистрируемых случаев злокачественными новообразованиями трахеи, бронхов, легкого (С33, С34) на территории г. Владимир составляет  $129 \pm 21$ .

Расчеты показывают, что вклад радонового облучения в заболеваемость злокачественными новообразованиями трахеи, бронхов и легкого (С33, С34) составляет 38 %.

Обоснование размера выборки. При планировании выборочного наблюдения с заранее заданным значением допустимой ошибки выборки необходимо правильно оценить требуемый объем выборки. Этот объем может быть 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 %, общим количеством зданий на территории г. Владимир 2,8 тыс. 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. Общий объем выборки составляет около 180 обследованных зданий.



Рисунок 4.2. Строящееся здание во Владимире

#### **4.2 Сравнительный анализ риска.**

Среднее число потерянных лет жизни, характерное для всех

онкологических заболеваний в целом обозначим  $U$ .

$$U=15$$

Для субпопуляции со средним и высоким уровнем облучения, лет.

Для нижней границы:

$$\Delta ICD2_{\min} = \Delta ICRU2_{\min} \cdot U \quad (4.2.1)$$

$$\Delta ICD2_{\min} = 2,9 \cdot 10^{-2} \cdot 15 \quad (4.2.2)$$

$$\Delta ICD2_{\min} = 0,43$$

Для центральной тенденции:

$$\Delta ICD2 = \Delta ICRU2 \cdot U \quad (4.2.3)$$

$$\Delta ICD2 = 3,7 \cdot 10^{-2} \cdot 15 \quad (4.2.4)$$

$$\Delta ICD2 = 0,55$$

Для верхней оценки:

$$\Delta ICD2_{\max} = \Delta ICRU2_{\max} \cdot U \quad (4.2.5)$$

$$\Delta ICD2_{\max} = 4,2 \cdot 10^{-2} \cdot 15 \quad (4.2.6)$$

$$\Delta ICD2_{\max} = 0,64$$

где  $D$  – обозначение ущерба.

Для субпопуляции с низким уровнем облучения, лет.

Для нижней границы:

$$\Delta ICD1_{\min} = \Delta ICRU1_{\min} \cdot U \quad (4.2.7)$$

$$\Delta ICD1_{\min} = 3,1 \cdot 10^{-3} \cdot 15 \quad (4.2.8)$$

$$\Delta ICD1_{\min} = 0,05$$

Для центральной тенденции:

$$\Delta ICD1 = \Delta ICRU1 \cdot U \quad (4.2.9)$$

$$\Delta ICD1 = 8 \cdot 10^{-3} \cdot 15 \quad (4.2.10)$$

$$\Delta ICD1 = 0,13$$

Для верхней оценки:

$$\Delta ICD1_{\max} = \Delta ICRU1_{\max} \cdot U \quad (4.2.11)$$

$$\Delta ICD1_{\max} = 2,9 \cdot 10^{-2} \cdot 15 \quad (4.2.12)$$

$$\Delta ICD1_{\max} = 0,43$$

Для субпопуляции с минимальным (фоновым) уровнем радонового облучения, лет.

$$\Delta ICD0 = \Delta ICRU0 \cdot U \quad (4.2.13)$$

$$\Delta ICD0 = 3,1 \cdot 10^{-3} \cdot 15 \quad (4.2.14)$$

$$\Delta ICD0 = 0,05$$

Для субпопуляции со средним и высоким уровнем облучения, чел-лет/год.

Для нижней границы:

$$\Delta PCD2_{\min} = \Delta ICD2_{\min} \cdot \frac{(\max 2 - \Delta 2_{0,95})}{t_{\text{ж}}} \quad (4.2.15)$$

$$\Delta PCD2_{\min} = 0,43 \cdot \frac{4545 - 388}{70} \quad (4.2.16)$$

$$\Delta PCD2_{\min} = 26$$

Для центральной тенденции:

$$\Delta PCD2 = \Delta ICD2 \cdot \frac{\max 2}{t_{\text{ж}}} \quad (4.2.17)$$

$$\Delta PCD2 = 0,55 \cdot \frac{4545}{70} \quad (4.2.18)$$

$$\Delta PCD2 = 36$$

Для верхней оценки:

$$\Delta PCD2_{\max} = \Delta ICD2_{\max} \cdot \frac{(\max 2 + \Delta 2_{0,95})}{t_{\text{ж}}} \quad (4.2.19)$$

$$\Delta PCD2_{\max} = 0,64 \cdot \frac{4545 + 388}{70} \quad (4.2.20)$$

$$\Delta PCD2_{\max} = 45$$

Для субпопуляции с низким уровнем облучения, чел-лет/ год.

Для нижней границы:

$$\Delta PCD1_{\min} = \Delta ICD1_{\min} \cdot \frac{(\max 1 - \Delta 1_{0,95})}{t_{\text{ж}}} \quad (4.2.21)$$

$$\Delta PCD1_{\min} = 0,05 \cdot \frac{55653 - 3911}{70} \quad (4.2.22)$$

$$\Delta PC D1_{\min} = 35$$

Для центральной тенденции:

$$\Delta PC D1 = \Delta ICD1 \cdot \frac{man1}{t_{эс}} \quad (4.2.23)$$

$$\Delta PC D1 = 0,13 \cdot \frac{55653 - 3911}{70} \quad (4.2.24)$$

$$\Delta PC D1 = 101$$

Для верхней оценки:

$$\Delta PC D1_{\max} = \Delta ICD1_{\max} \cdot \frac{(man1 + \Delta I_{9,95})}{t_{эс}} \quad (4.2.25)$$

$$\Delta PC D1_{\max} = 0,43 \cdot \frac{55653 + 3911}{70} \quad (4.2.26)$$

$$\Delta PC D1_{\max} = 368$$

Для субпопуляции с минимальным (фоновым) уровнем радонового облучения, чел-лет/год.

Для центральной тенденции:

$$\Delta PC D0 = \Delta ICD0 \cdot \frac{man0}{t_{эс}} \quad (4.2.27)$$

$$\Delta PC D0 = 0,05 \cdot \frac{275802}{70} \quad (4.2.28)$$

$$\Delta PC D0 = 184$$

Для верхней оценки:

$$\Delta PC D0_{\max} = \Delta ICD0 \cdot \frac{(man0 + \Delta I_{0,95})}{t_{эс}} \quad (4.2.29)$$

$$\Delta PC D0_{\max} = 0,05 \cdot \frac{275802 + 16597}{70} \quad (4.2.30)$$

$$\Delta PC D0_{\max} = 195$$

Потери жизненного потенциала для всего населения г. Владимир в результате радонового облучения, чел-лет/год.

Суммарный популяционный ущерб (центральная тенденция).

$$\Delta PC D2 + \Delta PC D1 + \Delta PC D0 \quad (4.2.31)$$

$$36 + 101 + 184 = 321,4 \quad (4.2.32)$$

Суммарный популяционный ущерб (верхняя оценка):

$$\Delta PC D2_{\max} + \Delta PC D1_{\max} + \Delta PC D0_{\max} \quad (4.2.33)$$

$$45 + 368 + 195 = 608 \quad (4.2.34)$$

Суммарные экономические потери от дополнительной смертности в результате индуцированного радоном рака легкого, рассчитанные через внутренний региональный продукт (ВРП).

ВРП на душу населения, тыс. руб.

2014 г. -232,6

2013 г. -216,9

2012 г. -200,5

2011 г. -181,8

2010 г. -155,5

Для перевода в млн. руб./год в сумму ВРП на душу населения, тыс. руб. делим еще на 1000.

Экономические потери (на 2014 г.), млн. руб./год Экономические потери (центральная тенденция):

$$(\Delta PC D2 + \Delta PC D1 + \Delta PC D0) \cdot ВРП \quad (4.2.35)$$

$$(36 + 101 + 184) \cdot \frac{232,6}{1000} = 74,8 \quad (4.2.36)$$

Экономические потери (верхняя оценка), млн. руб./год:

$$(\Delta PC D2_{\max} + \Delta PC D1_{\max} + \Delta PC D0_{\max}) \cdot ВРП \quad (4.2.37)$$

Экономические потери (верхняя оценка), млн. руб./год:

$$(45 + 368 + 195) \cdot \frac{232,6}{1000} = 141,4 \quad (4.2.38)$$

Основные полученные данные для наглядности сведены в таблицу (таблица 4.3)

Таблица 4.3

Характеристика потенциальной 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

Суммарный среднегодовой популяционный ущерб или потери жизненного потенциала для всего населения г. Владимир в результате радиационно-индуцированного рака легкого оцениваются величинами: центральная тенденция – 321,4 чел-лет/год; верхняя оценка – 608 чел-лет/год.

Суммарные экономические потери от дополнительной смертности в результате индуцированного радоном рака легкого, рассчитанные через внутренний региональный продукт, составляют (по ценам 2014 г.): центральная тенденция – 74,8 млн. руб.; верхняя оценка – 141,4 млн. руб.

Для отдельных субпопуляций оценки экономических потерь в млн. руб./год.

Для субпопуляции со средним и высоким уровнем радонового

облучения:

центральная тенденция

$$\Delta PC D 2 \cdot B P I \quad (4.2.39)$$

$$36 \cdot \frac{232,6}{1000} = 8,4 \quad (4.2.40)$$

верхняя оценка

$$\Delta PC D 2_{\max} \cdot B P I \quad (4.2.41)$$

$$45 \cdot \frac{232,6}{1000} = 10,4 \quad (4.2.42)$$

Для субпопуляции с низким уровнем радонового облучения:

центральная тенденция

$$\Delta PC D 1 \cdot B P I \quad (4.2.43)$$

$$101 \cdot \frac{232,6}{1000} = 23,5 \quad (4.2.44)$$

верхняя оценка

$$\Delta PC D 1_{\max} \cdot B P I \quad (4.2.45)$$

$$368 \cdot \frac{232,6}{1000} = 85,6 \quad (4.2.46)$$

Для субпопуляции с минимальным (фоновым) уровнем радонового облучения:

центральная тенденция

$$\Delta PC D 0_{\phi} \cdot B P I \quad (4.2.47)$$

$$184 \cdot \frac{232,6}{1000} = 42,8 \quad (4.2.48)$$

верхняя оценка

$$\Delta PC D 0_{\max} \cdot B P I \quad (4.2.49)$$

$$195 \cdot \frac{232,6}{1000} = 45,4 \quad (4.2.50)$$

Улучшение ситуации может быть достигнуто посредством разработки плана действий, в котором описывается риск, связанный с радоном, и меры, необходимые для снижения риска. [110, 46].

## Выводы к главе 4

1. 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 [32] т.к. существующие преимущественно зарубежные модели направлены на оценку относительного риска с учетом влияния фактора табакокурения и для практического применения являются сложными и громоздкими [31];

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> [109];

3) нет свидетельств наличия порога [109, 110];

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 достижения 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.

2. Применение многоуровневой оценки радиационного риска от радонового облучения в оценках радиационной опасности среды помещений обусловлено рядом факторов: 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.

3. 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. 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.

4. 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.

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

6. 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. 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 ( $\text{ЭРОА} < 74 \text{ Бк/м}^3$ ).

## 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 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  $19,1 \text{ Бк/м}^3$ , а верхняя оценка –  $109 \text{ Бк/м}^3$ . При этом на территории г. Владимир вероятность регистрации в воздухе помещений первых этажей зданий значений объемной активности, превышающих  $50 \text{ Бк/м}^3$  (или ЭРОА  $> 25 \text{ Бк/м}^3$ ), составляет 37,4 %.

3. Для экспонируемой популяции, т.е. популяции проживающих и работающих на первых, подвальных и полуподвальных этажах зданий, вероятность регистрации средних и высоких доз ( $\geq 5 \text{ мЗв/год}$ ) 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 литературы

1. Атомная энергия: Понять будущее/Бертран Баррэ, Пьер-Рене Боки [пер. с фра. М.Ю. Юдиной, Е.А. Чак]. – М.: АНО «Центр содействия социально-экологическим инициативам атомной отрасли», 2011.-204 с. ISBN 978-5-91706-024-8.
2. Афонин А.А., Котляров А.А. Методы и средства контроля объемной активности изотопов радона в различных средах на основе камер с электроосаждением. АНРИ №2 (53) 2008. с.82 – 85.
3. Афонин А.А., Котляров А.А. Принципы радонового контроля в помещениях зданий. АНРИ №3 (54) 2008. с.2 – 7.
4. Василенко О.И. Радиационная экология.-М.: Медицина, 2004. – 216 с.: ил. ISBN 5-225-04824-2
5. Васильев А.В. Характер и периодичность изменения объемной активности радона в помещении / А. В. Васильев, М. В. Жуковский // АНРИ. – 2015. – № 2 (81). – С. 42–47.
6. Вечканов Е.М., Внуков В. В. Основы радиационной биофизики. Учебное пособие. - Ростов-на-Дону, 2009. - 50 с.
7. Владимирская область. Статистический ежегодник. 2014. - Владимир: Владимирстат. 2015. – 548 с.
8. Водоватов А.В., Голиков В.Ю., Кальницкий С.А., Шацкий И.Г., Чипига Л.А. Анализ уровней облучения взрослых пациентов при проведении наиболее распространенных рентгенографических исследований в Российской Федерации в 2009–2014 гг. // Радиационная гигиена. – 2017. – Т. 10, № 3. – С. 66-75. DOI: 10.21514/1998-426X-2017-10-3-66-75
9. Всемирная организация здравоохранения. Руководство ВОЗ по качеству воздуха в помещениях: избранные загрязняющие вещества, 2011.
10. Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счёт природных источников ионизирующего излучения: Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2800—10.— М.: Федеральный центр гигиены и

эпидемиологии Роспотребнадзора» 2011.—40 с. ISBN 978— 5— 7508—0998—1

11. Государственный доклад Управления Роспотребнадзора по Владимирской обл. от 14.12.2010 "О санитарно-эпидемиологической обстановке во Владимирской области в 2009 году".

12. Губин А.Т. Обследование территорий, обслуживаемых ФМБА России, на содержание радона в помещениях / А.Т. Губин, А.М. Маренный, В.А. Сакович, В.И. Астафуров, Н.А. Нефедов, А.В. Пенезев // Медицина экстремальных ситуаций. – 2012. – № 4(42). – С. 77–88.

13. Гулабянц Л.А. Рекомендации по проектированию противорадоновой защиты жилых и общественных зданий / Л. А. Гулабянц // АНРИ. – 1996/97. – № 5(11). – С.58–67.

14. Демин В.Ф., Жуковский М.В., Иванов С.И. и др. Модифицированная модель оценки риска при ингаляционном поступлении радона // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2011. № 5. С.21 – 30.

15. Демин В.Ф., Жуковский М.В., Киселев С.М. Методика оценки риска от воздействия на здоровье человека радона и дочерних продуктов его распада. Гигиена и санитария. – 2014. – Т. 93, № 5. – С. 64–69.

16. Дмитриев В.И., Ощепкова Е.В., Хальфин Р.А., Какорина Е.П., Соломонов А.Д., Курьянов А.К., Балыгин М.М. "Методика расчета медико-социальной и экономической эффективности реализации программ, направленных на улучшение здоровья населения (на примере болезней системы кровообращения). Методические рекомендации" утв. Минздравсоцразвития РФ 14.03.2005.

17. Жуковский М.В. Радоновая безопасность зданий / М. В. Жуковский, А.В. Кружалов, В.Б. Гурвич и др. – Екатеринбург: УрО РАН, 2000. – 180 с.

18. Злокачественные новообразования в России в 2008 году (заболеваемость и смертность). Под ред. Чиссова В.И., Старинского В.В.,

Петровой Г.В. – М.: ФГУ «МНИОИ им. П.А. Герцена Росмедтехнологий», 2010.– 256 с.: ил. ISBN 5-85502-024-X

19. Злокачественные новообразования в России в 2009 году (заболеваемость и смертность). Под ред. Чиссова В.И., Старинского В.В., Петровой Г.В. - М.: ФГУ «МНИОИ им. П.А. Герцена Минздравсоцразвития России», 2011.- 260 с.: ил. ISBN 9785-85502-046-0

20. Злокачественные новообразования в России в 2010 году (заболеваемость и смертность). Под ред. Чиссова В.И., Старинского В.В., Петровой Г.В. - М.: ФГБУ «МНИОИ им. П.А. Герцена» Минздравсоцразвития России. - 2012.- ил. - 260 с. ISBN 978-5-85502-154-7

21. Злокачественные новообразования в России в 2011 году (заболеваемость и смертность). Под ред. Чиссова В.И., Старинского В.В., Петровой Г.В. - М.: ФГБУ «МНИОИ им. П.А. Герцена» Минздрава России. - 2013.- ил. - 289 с. ISBN 978-5-85502-179-0

22. Злокачественные новообразования в России в 2012 году (заболеваемость и смертность). Под ред. Каприна А.Д., Старинского В.В., Петровой Г.В. - М.: ФГБУ «МНИОИ им. П.А. Герцена» Минздрава России. - 2014. - илл. - 250 с. ISBN 978-5-85502-193-6

23. Злокачественные новообразования в России в 2013 году (заболеваемость и смертность). Под ред. Каприна А.Д., Старинского В.В., Петровой Г.В. - М.: МНИОИ им. П.А. Герцена - филиал ФГБУ «ФМИЦ им. П.А. Герцена» Минздрава России. - 2015. - илл. - 250 с. ISBN 978-5-85502-205-6

24. Злокачественные новообразования в России в 2014 году (заболеваемость и смертность). Под ред. Каприна А.Д., Старинского В.В., Петровой Г.В. - М.: МНИОИ им. П.А. Герцена - филиал ФГБУ «НМИРЦ» Минздрава России, - 2016. - илл. - 250 с. ISBN 978-5-85502-219-3

25. Иванов В.К., Чекин С.Ю., Меняйло А.Н., Кашеев В.В., Корело А.М., Максютков М.А. Оценка коэффициентов радиационных рисков заболеваемости солидными раками мужского персонала Госкорпорации

«Росатом» с учётом неопределённости доз профессионального облучения. Радиация и риск. 2014. Том 23. № 3. С. 5-13.

26. Источники, эффекты и опасность ионизирующей радиации. Доклад НКДАР ООН за 1988 г. М.: Мир, 1992. Т.1. Пер. с англ. —М.: Мир, 1992.— 552с. ISBN 5—03—002458—1

27. Калистратова В.С., Беляев И.К., Жорова Е.С., Парфенова И.М., Тищенко Г.С. «Радиобиология инкорпорированных радионуклидов». Под ред. В.С. Калистратовой. Изд. 2-е, переработанное. ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 2016 – 556 с.

28. 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.

29. Киселев С.М., Жуковский М.В. Современные подходы к обеспечению защиты населения от радона. Международный опыт регулирования ТОМ 7 № 4, 2014. С 48-52

30. Киселев С.М., Жуковский М.В., Стамат И.П. Яρμοшенко И.В. Радон: От фундаментальных исследований к практике регулирования./Москва: Изд-во «ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России», 2016.-432 с. ISBN 978-5-905926-11-2

31. Кононенко Д.В. Анализ применимости существующих моделей расчета риска при облучении радоном для оценки эффективности радонозащитных мероприятий в детских образовательных учреждениях // Радиационная гигиена. – 2014. – Т. 7, № 4. – С. 92–98.

32. Кононенко Д.В. Дифференцированный подход к оценке риска для здоровья населения при облучении радоном // Радиационная гигиена. – 2017. – Т. 10, № 1. – С. 76–83.

33. Кононенко Д.В. Оценка радиационного риска для населения Санкт-Петербурга при облучении радоном // Радиационная гигиена. – 2013. – Т. 6, № 1.– С. 31–37.

34. 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.
35. Котеров А.Н. Малые дозы радиации: факты и мифы. Книга первая. Основные понятия и нестабильность генома / А.Н. Котеров. – М.: Изд-во «ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России», 2010 – 283 с.
36. Крисюк Э.М. Организация и проведение выборочного обследования уровней облучения населения за счет радона в жилых домах / Э.М. Крисюк, И.П. Стамат // АНРИ. – 1996/97. – №3(9). – С.25–30.
37. Крисюк Э.М. Проблема радона – ведущая проблема обеспечения радиационной безопасности населения / Э.М. Крисюк // АНРИ. – 1996/97. – № 3(9). – С.13–16.
38. Крисюк Э.М. Радиационный фон помещений / Э.М. Крисюк. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
39. Кудряшов Ю.Б., Беренфельд Б.С. Основы радиационной биофизики: Учебник.-М.: Изд-во Моск. Ун-та,1982-304с., ил.
40. Кудряшов Ю.Б., Беренфельд Б.С. Основы радиационной биофизики: Учебник.-М.: Изд-во Моск. ун-та, 1982.- 304с., ил.
41. Кузнецов Ю.В. Измерения радона-222 и торона-220 в воздухе жилых и производственных помещений. АНРИ №4(19), 1999, с.52-53.
42. Курепин В.В., Баранов И.В. Обработка экспериментальных данных: Метод. указания к лабораторным работам для студентов 1, 2 и 3-го курсов всех спец./ Под ред. В.А. Самолетова. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2003. – 57 с.
43. Тихонов М.Н. К вопросу о влиянии малых доз ионизирующей радиации на здоровье человека. АНРИ №1(60) 2010, с.2-16.
44. Масюк С.В. Влияние неопределенностей в дозах на оценку радиационных рисков / С.В. Масюк, С.В. Шкляр, А.Г. Кукуш и др. // Радиация и риск. – 2008. – №3. – С. 64–75.

45. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ВЫБОРОЧНОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ НАСЕЛЕНИЯ МР 11-2/206-09. Настоящие Методические рекомендации по выборочному обследованию жилых зданий для оценки доз облучения населения разработаны авторским коллективом в составе: д.т.н., профессор Крисюк Э.М., к.т.н. Стамат И.П. и Барковский А.Н. (Федеральный радиологический центр Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены).

46. Методические рекомендации к экономической оценке и обоснованию решений в области управления риском для здоровья населения при воздействии факторов среды обитания: Методические рекомендации МР 5.1.0030-11 – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2011. – 40 с. ISBN 978—5—7508—1058—1

47. Методические рекомендации к экономической оценке рисков для здоровья населения при воздействии факторов среды обитания: Методические рекомендации МР 5.1.0029-11 – М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2011. – 24 с. ISBN 978—5—7508—1056—7

48. Методические указания: «Оценка потенциальной радоноопасности земельных участков под строительство жилых, общественных и производственных зданий» МУ 2.6.1.038 - 2016, 36 с.

49. Микляев П.С. Научные основы оценки потенциальной радоноопасности платформенных территорий. Диссертационная работа.- 2015-307 с.

50. Астахов Н.Е., Бартанова С.В., Тубанов Ц.А. Радоновые аномалии некоторых зон разломов Бурятии как фактор радиационного риска. Известия Самарского научного центра Российской академии наук, том 17, №5, 2015, с. 21-25.

51. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ленинград: Издательство Энергоатомиздат, 1991. – 304 с. – ISBN 5-283-04513-7.

52. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009) СанПиН 2.6.1.2523-09: Санитарноэпидемиологические правила и нормативы. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. – 100 с. ISBN 978-5-7508-0805-2.

53. Онищенко А.Д. Учет неопределенностей исходных данных при оценке зависимости доза-эффект на примере воздействия радона: дис. канд. био. наук: 03.00.01 . - Екатеринбург, 2017. - 132 с.

54. Онищенко А.Д., Вараксин А.Н., Жуковский М.В. Анализ подходов к формированию контрольной группы в радоновых эпидемиологических исследованиях по типу случай – контроль // Радиационная гигиена. – 2017. – Т. 10, № 3. – С. 76-89. DOI: 10.21514/1998-426X-2017-10-3-76-89.

55. Онищенко А.Д., Жуковский М.В. Роль искажающих факторов в радоновом эпидемиологическом исследовании // Радиационная гигиена. – 2017. – Т. 10, № 1. – С. 65–75. DOI: 10.21514/1998-426X-2017-10-1-65-75.

56. Онищенко А.Д., Жуковский М.В., Васильев А.В. Влияние временных вариаций уровней радона и погрешностей измерений на оценку средних сезонных значений объёмной активности радона в помещении. АНРИ №3 (74) 2013. С. 2 – 12. – ISSN 2075-1338

57. Онищенко Г.Г., Новиков С.М., Рахманин Ю.А., Авалиани С.Л., Буштуева К.А. Основы оценки риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду / Под ред. Ю.А. Рахманина, Г.Г. Онищенко. – М.: НИИ ЭЧ и ГОС, 2002. – 408 с.

58. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010): Санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612—10.— М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010.— 83 с. ISBN 978— 5— 7508— 0939— 4

59. Отчет МКРЗ по тканевым реакциям, ранним и отдаленным эффектам в нормальных тканях и органах – пороговые дозы для тканевых реакций в контексте радиационной защиты / [Ф. А. Стюарт и др.; ред.: А. В. Аклеев, М. Ф. Киселев; пер. с англ.: Е. М. Жидкова, Н. С. Котова]. Челябинск : Книга, 2012. – 384 с. – (Труды МКРЗ ; публикация 118) ISBN 978-5-7135-0686-5

60. Оценка индивидуальных эффективных доз облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения: Методические указания МУ 2.6.1.1088-02. – М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2002. – 22 с. – ISBN 5-7508-0392-9.

61. Оценка радиационного риска у пациентов при проведении рентгенорадиологических исследований. Методические рекомендации МР 2.6.1.0098-15. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2015.— 42 с. ISBN 978— 5— 7508— 1383— 4

62. Павлов И.В. Задачи и методы радиационного контроля при строительстве зданий / И. В. Павлов, Гулабянц Л. А., Иванов С. И. и др. // АНРИ. – № 3. – 2003. – С.2–12.

63. Панченко С.В., Линге И.И., Воробьева Л.М., Капырин И.В., Савкин М.Н., Уткин С.С., Аракелян А.А., Крышев И.И., Сазыкина Т.Г., Иванов В.К., Горский А.И., Гераськин С.А., Удалова А.А., Новиков С.М., Унгаряну Т.Н., Курындин А.В., Строганов А.А. Практические рекомендации по вопросам оценки радиационного воздействия на человека и биоту. - Под общей редакцией И.И. Линге и И.И. Крышева. - 2015 г. - 265 с

64. Популярная библиотека химических элементов // МОО «Наука и техника» URL: <http://n-t.ru/ri/ps/pb086.htm> (дата обращения: 28.05.2016).

65. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ N 25, Главного государственного инспектора РФ по охране природы N 03-19/24-3483 от 10.11.1997 "Об использовании методологии оценки риска для управления качеством окружающей среды и здоровья населения в Российской Федерации" из информационного банка "Медицина и

фармацевтика" // КонсультантПлюс URL: <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 11.04.2015).

66. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 20.08.2007 N 58 "О мерах по ограничению доз облучения населения и снижению риска от природных источников" (Зарегистрировано в Минюсте РФ 06.09.2007 N 10107) // КонсультантПлюс URL: <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 05.05.2015).

67. Приказ Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека от 18 февраля 2010 г. № 57 "О реализации решения коллегии Роспотребнадзора от 5 февраля 2010 года «О внедрении методологии по оценке риска». Текст приказа размещен на сайте Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека // Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека URL: <http://www.rospotrebnadzor.ru> (дата обращения: 12.07.2016).

68. Проведение комплексного экспедиционного радиационно-гигиенического обследования населенного пункта для оценки доз облучения населения. Методические рекомендации МР 2.6.1.0006—10. – М.: Федеральный Центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2011.— 40 с.

69. Промышленная экология: учебное пособие / под ред. В.В. Денисова. - Ростов н/Д. Издательский центр «МарТ», 2009. - 720 с. - (Феникс). ISBN 978-5-241-00781-0.

70. Радиационная безопасность. Рекомендации Международной комиссии по радиологической защите 1990 года. Публикации 60-й МКРЗ. Ч. 2.: пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 208 с.

71. Радиационная защита и безопасность источников излучения. Международные основные нормы безопасности МАГАТЭ. Промежуточное издание, 2011.

72. Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка жилых, общественных и производственных зданий и сооружений после

окончания их строительства, капитального ремонта, реконструкции по показателям радиационной безопасности. Методические указания МУ 2.6.1.2838-11. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2011. – 26 с.

73. Радиация. Дозы, эффекты, риск: Пер. с англ. - М.: Мир, 1990.-79 с, ил. ISBN 5-03-001172-2

74. Репин В.С. Развитие методологии оценки радиационного риска в системе социально-гигиенического мониторинга: научное издание // Радиозэкология XXI века. - Б.м., 2012. - С. 425-428 . - ISBN 978-5-7638-2568-8

75. Репин Л.В. Об использовании коэффициентов ущерба для количественной оценки последствий воздействия ионизирующего излучения // Радиационная гигиена-2011-Т.4, № 1 - С 35-37.

76. Репин Л.В., Библин А.М., Ковалев П.Г., Николаевич М.С., Репин В.С. Автоматизированная система контроля радиационного воздействия Роспотребнадзора: история создания, назначение и развитие. Радиационная гигиена Том 7 № 3, 2014. - С 44-53.

77. Репин Л.В., Николаевич М.С. Оценка приемлемости использования тканевых весовых коэффициентов МКРЗ при вычислении эффективной дозы для отдельных половозрастных групп населения Российской Федерации. Радиационная гигиена Том 6 № 1, 2013. – С. 38-44.

78. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. Руководство Р 2.1.10.1920—04— М: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004.— 143 с. ISBN 5— 7508— 0552— 2

79. Сахаров В.К. Радиозэкология: Учебное пособие.-СПб.: Издательство «Лань», 2006.-320 с: ил.- (Учебники для вузов. Специальная литература). ISBN 5-8114-0583-9

80. Трифонова Т.А., Ширкин Л.А. Оценка и сравнительный анализ рисков для здоровья населения (на примере г. Владимир). – Владимир: ВООО ВОИ ПУ «Рост», 2010. – 80 с. ISBN
81. Трифонова Т.А., Ширкин Л.А. Оценка радиационной опасности от радонового облучения в помещениях городских зданий // Безопасность жизнедеятельности, 2004, №5. С. 43 – 48.
82. Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. Управление Роспотребнадзора по Владимирской области. Материалы к Государственному докладу «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2014 году» по Владимирской области. Владимир 2015 г.
83. Форма федерального статистического наблюдения № 4-ДОЗ. Сведения о дозах облучения населения за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона: Методические рекомендации МР 2.6.1.0088-14.—М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2014.—38 с. ISBN 978— 5— 7508— 1346— 9
84. Цапалов А.А., Киселев С.М., Маренный А.М., Ковлер К.Л., Кувшинников С.И. Неопределенность результатов контроля радона в помещениях. Часть 1. Проблема оценки содержания радона и современный принцип контроля // Радиационная гигиена. – 2018. – Т. 11, № 1. – С. 53-63. DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-1-53-63.
85. Цапалов А.А., Киселев С.М., Маренный А.М., Ковлер К.Л., Кувшинников С.И., Янкин А.С. Неопределенность результатов контроля радона в помещениях. Часть 2. Экспериментальная оценка неопределенности временных вариаций радона // Радиационная гигиена. – 2018. – Т. 11, № 1. – С. 64-79. DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-1-64-79.
86. Цапалов А.А. Зависимость объемной активности радона в помещениях от разности внутренней и наружной температур воздуха / А.А. Цапалов, С.И. Кувшинников // АНРИ. – 2008. – № 2. – С. 37–43.

87. Цаплов А.А., Маренный А.М. Принципы радонового контроля в помещениях зданий. АНРИ №1 (76) 2014. С.6 – 14. – ISSN 2075-1338
88. Цапалов А.А. Результаты долговременных исследований закономерностей поведения ОА и ЭРОА радона в зданиях московского региона / А.А. Цапалов // АНРИ. – 2011. – № 3(66). – С. 52–64.
89. Ярмошенко И.В. Восстановление формы и параметров распределения объемной активности радона в жилищах России на основе данных 4-ДОЗ / И.В. Ярмошенко, Г.П. Малиновский, А. В. Васильев и др. // АНРИ. – 2015. – № 3. – С. 41–46.
90. Abdelzaher M, 2011. Seasonal variation of radon level and radon effective doses in the Catacomb of Kom EI-Shuqafa, Alexandria, Egypt. Vol. 77, No. 4, pp. 749–757. DOI: 10.1007/s12043-011-0150-z.
91. Baias P., Hofmann W., Winkler-Heil R. et al., 2010. Lung dosimetry for inhaled radon progeny in smokers. Radiat. Prot. Dosim. 138, 111 – 118 DOI: 10.2768/22829.
92. Bossew P. Radon: exploring the log-normal mystery / P. Bossew // J. Environ. Radioact. – 2010. – Vol. 101. – P. 826–834.
93. Catelinois O. Lung Cancer Attributable to Indoor Radon Exposure in France: Impact of the Risk Models and Uncertainty Analysis. / O. Catelinois [et al.] // Environmental Health Perspectives. – 2006 – V. 115, № 9. – P. 1361–1366.
94. Cinelli G. Log-normality of indoor radon data in the Walloon region of Belgium / G. Cinelli, F. Tondeur // J. Environ. Radioact. – 2015. – Vol. 143. – P. 100–109.
95. Cothorn C.R., Smith Jr. J.E. 1987. Environmental Radon. Plenum Press, New York, pp. 98–107
96. Daraktchieva Z. Radon, the lognormal distribution and deviation from it / Z. Daraktchieva, J. C. H. Miles, N. McColl // J. Radiol. Prot. – 2014. – Vol. 34. – P. 183–190.

97. Darby S., Hill D., Auvinen A. et al., 2005. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *Br. Med. J.* 330, 223–227.
98. Darby S., Hill D., Deo H. et al., 2006. Residential radon and lung cancer – detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7148 persons with lung cancer and 14 208 persons without lung cancer from 13 epidemiological studies in Europe. *Scand. J. Work Environ. Health* 32 (Suppl. 1), 1 – 84.
99. Grosche B., Kreuzer M., Kreisheimer M. A., 2006. Lung cancer risk among German male uranium miners: a cohort study, 1946–1998. *Br. J. Cancer* 95, 1280 – 1287.
100. Heid I.M. On the potential of measurement error to induce differential bias on odds ratio estimates: an example from radon epidemiology / I. M. Heid, H. Kuchenhoff, J. Wellmann et al. // *Statist. Med.* –2002. –Vol. 21. – P.3261–3278.
101. Hultqvist B. Studies on naturally occurring ionising radiations // K. Svenska Vetensk. Akad. Handl. 1956. № 6(3). Almqvist u. Wiksells Boktryckeri, Stockholm.
102. IAEA, 2003. Radiation Protection against Radon in Workplaces other than Mines. ISBN 92–0–113903–9.
103. IAEA, 2013. National and Regional Surveys of Radon Concentration in Dwellings. ISSN 2074–7659
104. IAEA, 2017. Status of radon related activities in member states participating in technical cooperation projects in Europe. International Atomic Energy Agency, Series: IAEATECDOC-1810, Vienna, 2017.
105. ICRP, 1987. Lung Cancer Risk from Exposures to Radon Daughters. ICRP Publication 50. *Ann. ICRP* 17 (1).
106. ICRP, 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. *Ann. ICRP* 21(1–3).
107. ICRP, 1993. Protection against radon-222 at home and at work. ICRP Publication 65. *Ann. ICRP* 23 (2).

108. ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37(2 – 4).
109. ICRP, 2010. Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon. ICRP Publication 115. Ann. ICRP 40 (1).
110. ICRP, 2014. Radiological protection against radon exposure. ICRP Publication 126. Ann. ICRP 43(3).
111. Ishimori Y., Lange K., Martin P., Mayya Y.S., Phaneuf M., 2013. Measurement and Calculation of Radon Releases from NORM Residues. ISBN 978-92-0-142610-9.
112. Kendall G.M., Smith T. J., 2005. Doses from radon and its decay products to children. J. Radiol. Prot. 25, 241 – 256.
113. Kozak K. [et al.]. 2011. Correction factors for determination of annual average radon concentration in dwellings of Poland resulting from seasonal variability of indoor radon. Applied Radiation and Isotopes 69 (10), 1459–1465.
114. Lubin J. H., Boice J.D., Jr., Edling C. et al., 1994. Radon and Lung Cancer Risk: A Joint Analysis of 11 Underground Miner Studies. Publication No. 94-3644. US National Institutes of Health, Bethesda, MD.
115. Marsh J.W., Birchall A., 2000. Sensitivity analysis of the weighted equivalent lung dose per unit exposure from radon progeny. Radiat. Prot. Dosim. 87, 167 – 178.
116. Marsh J.W., Birchall A., Davis K., 2005. Comparative dosimetry in homes and mines: estimation of K-factors. Natural Radiation Environment VII. Seventh International Symposium on the Natural Radiation Environment (NRE-VII), May 2002, Rhodes, Greece. Radioactivity in the Environment, Vol. 7. Elsevier Ltd, Amsterdam.
117. Murphy P. A comparative study of lognormal, gamma and beta modeling in radon mapping with recommendations regarding bias, sample size and treatment of outliers / P. Murphy, C. Organo // J. Radiol. Prot. – 2008. – Vol. 28. – P. 293– 302.

118. NAS (National Academy of Sciences). Health Effects of Exposure to Radon (BEIR VI). National Academy Press, Washington, D.C., 1999.
119. NRC, 1999. Health Effects of Exposure to Radon. BEIR VI Report. National Academy Press, Washington, DC.
120. Onishchenko A. Radon Measurements in Kindergartens in Ural Radon Prone Areas / A. Onishchenko, G. Malinovsky, A. Vasiliev // Proc. Third Intern. Conf. on Radiation and Applications in Various Fields of Research, June 8–12, 2015. – Budva, Montenegro. – P. 353–356.
121. Tirmarche M., Laurier D., Bergot D., et al., 2003. Quantification of Lung Cancer Risk After Low Radon Exposure and Low Exposure Rate: Synthesis from Epidemiological and Experimental Data. Final Scientific Report, February 2000–July 2003. Contract FIGH-CT1999-0013. European Commission DG XI, Brussels.
122. Tomasek L. Lung Cancer in French and Czech Uranium Miners: Radon-Associated Risk at Low Exposure Rates and Modifying Effects of Time since Exposure and Age at Exposure / L. Tomasek, A. Rogel, M. Tirmarche et al. // Radiation Research. –2008. –Vol. 169, № 2. – P.125–137.
123. U.S. Environmental Protection Agency. EPA assessment of risks from radon in homes. EPA 402-R-03-003. Washington, D.C., 2003.
124. UNSCEAR, 2000. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. United Nations, New York.
125. UNSCEAR, 2009. UNSCEAR, 2006 Report. Annex E. Sources-to-Effects Assessment for Radon in Homes and Workplaces. United Nations, New York.
126. Vaupotic J., Hunyadi I., Baradacs E., 2001. Thorough investigation of radon in a school with elevated levels. Radiation Measurements 34 (1-6), 477–482.
127. WHO, 2009. WHO handbook on indoor radon: a public health perspective. World Health Organization. 2009. ISBN: 9789241547673, pp: 108.

128. Winkler R., Ruckerbauer F., Bunzl K., 2001. Radon concentration in soil gas: a comparison of the variability resulting from different methods, spatial heterogeneity and seasonal fluctuations. *Sci. Total Environ.* 272, 273–282.

129. Yarmoshenko I. Variance of indoor radon concentration: Major influencing factors / I. Yarmoshenko, A. Vasilyev, G. Malinovsky et al. // *Science of the Total Environment.* – 2016. – Vol. 541, № 1. – P. 155–160.

130. Zhukovsky M. Radon Exposure and Dose Calculation: Problems of Choice / M. Zhukovsky, I. Yarmoshenko // *Proc. Third Intern. Conf. on Radiation and Applications in Various Fields of Research, June 8–12, 2015.* – Budva, Montenegro. – P. 343–348.

131. Zielinski J. M., Carr Z., Repacholi M. et al., 2006. World Health Organization's International Radon Project. *J. Toxicol. Environ. Health A* 69, 759 – 769.

## Приложение 1

Страница 1 из 20

### **Протокол расчета**

#### **1. Идентификация опасности**

##### 1.1. Параметры распределения значений логарифма ЭРОА:

$$\alpha_1 := 3.563 \quad ac := 2.873 \quad \sigma_a := 0.9$$

##### 1.2. Функция плотности распределения вероятности $\rho(\ln A)$

$$\lambda_a := \frac{\Gamma\left(\frac{1}{\alpha_1}\right)}{\Gamma\left(\frac{3}{\alpha_1}\right)} = 1.692 \quad \frac{\alpha_1}{2 \cdot \lambda_a \cdot \sigma_a \cdot \Gamma\left(\frac{1}{\alpha_1}\right)} = 0.364 \quad \lambda_a \cdot \sigma_a = 1.523$$

$$p_a(a) := \frac{\alpha_1}{2 \cdot \lambda_a \cdot \sigma_a \cdot \Gamma\left(\frac{1}{\alpha_1}\right)} \cdot e^{-\left(\frac{a-ac}{\lambda_a \cdot \sigma_a}\right)^{\alpha_1}}$$

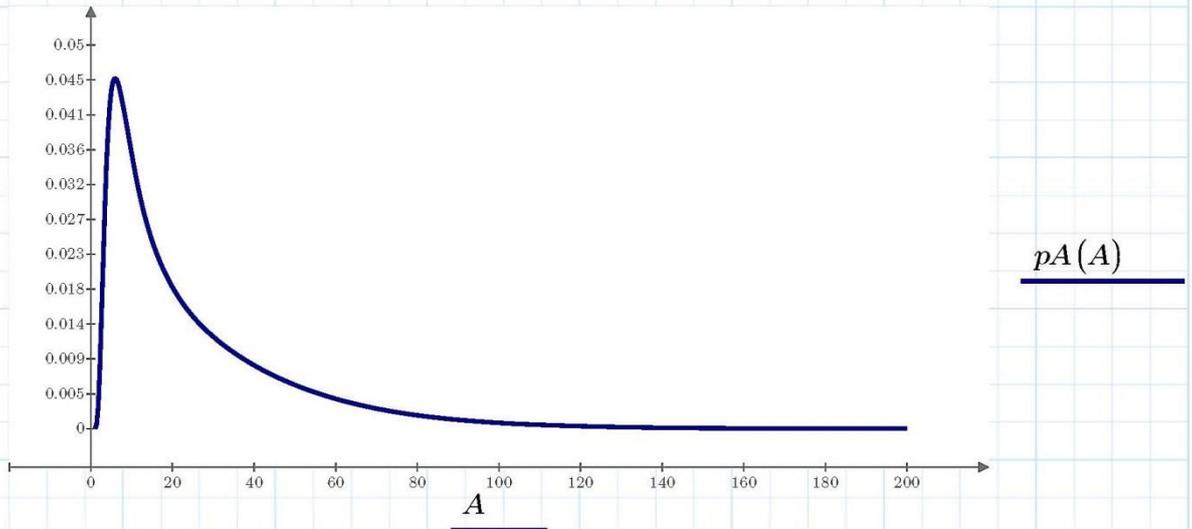
##### 1.3. Расчет центральной тенденции и верхней оценки для значений ЭРОА

$$\mu = 1 - \frac{1}{\alpha_1} \sqrt{\Gamma\left(\frac{1}{\alpha_1}\right)} \Gamma\left(1 - \frac{1}{\alpha_1}\right) = 0.918$$



1.5. График функции  $p_A(A)$ 

$$p_A(A) := \frac{\alpha 1}{2 \cdot \lambda a \cdot \sigma a \cdot \Gamma\left(\frac{1}{\alpha 1}\right) \cdot A} \cdot e^{\left(-\left|\frac{\ln(A) - ac}{\lambda a \cdot \sigma a}\right|^{\alpha 1}\right)}$$



Проверка условия нормирования:

$$\int_0^{\infty} p_A(A) dA = 1$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} p_a(a) da = 1$$

$$\int_{\ln(0.01)}^{\infty} \left( \frac{0.364}{A} \cdot e^{\left(-\left|\frac{\ln(A) - 2.873}{1.523}\right|^{3.653}\right)} \right) dA = 1$$

## 2. Оценка зависимости "доза - ответ"

### 2.1. Параметры распределения значений $\ln(E)$ :

$$\alpha_2 := 2.412 \quad e_c := -6.694 \quad \sigma_e := 0.904$$

### 2.2. Функция плотности распределения вероятности $p(\ln E)$

$$\lambda_e := \frac{\Gamma\left(\frac{1}{\alpha_2}\right)^{\frac{1}{2}}}{\Gamma\left(\frac{3}{\alpha_2}\right)} = 1.535 \quad \frac{\alpha_2}{2 \cdot \lambda_e \cdot \sigma_e \cdot \Gamma\left(\frac{1}{\alpha_2}\right)} = 0.406 \quad \lambda_e \cdot \sigma_e = 1.388$$

$$p_e(e) := \frac{\alpha_2}{2 \cdot \lambda_e \cdot \sigma_e \cdot \Gamma\left(\frac{1}{\alpha_2}\right)} \cdot e^{\left(-\frac{e - e_c}{\lambda_e \cdot \sigma_e}\right)^{\alpha_2}}$$

### 2.3. Функция зависимости эффективной дозы от уровня ЭРОА радона в воздухе помещения:

$$E_T(A) := 1.05 \cdot 9.0 \cdot 10^{-9} \cdot 8800 \cdot (0.2 \cdot 6.5 + 0.8 \cdot A)$$

#### 2.3.1. Уровень дозовой нагрузки при фоновом уровне облучения, Зв/год

$$A_0 := 6.5 \quad E_0 := E_T(A_0) = 5.4 \cdot 10^{-4} \quad E_{min} := E_0 = 5 \cdot 10^{-4}$$

#### 2.3.2. ЭРОА при дозовой нагрузке в 5 мЗв/год

$$A := 0 \quad A_{01} := \text{root}(E_T(A) - 0.005, A) \quad A_{01} = 73.5$$

#### 2.3.3. Среднегодовой уровень ЭРОА (Бк/м.куб.) и среднегодовая эффективная доза при низкой дозовой нагрузке $0,5 < E \leq 5$ мЗв/год

$$a_1 := \frac{\int_{\ln(6.5)}^{\ln(A_{01})} a \cdot p_a(a) da}{\int_{\ln(6.5)}^{\ln(A_{01})} p_a(a) da} \quad A_1 := e^{a_1} = 20.504 \quad E_1 := E_T(A_1) = 1.5 \cdot 10^{-3}$$

### 2.3.4. Уровень ЭРОА (Бк/м.куб.) при дозовой нагрузке в 10 мЗв/год

$$A := 0 \quad A02 := \text{root}(E_T(A) - 0.01, A) = 148.7$$

### 2.3.5. Среднегодовой уровень ЭРОА (Бк/м.куб.) и среднегодовая эффективная доза при средней и высокой дозовой нагрузке 5,0 < E мЗв/год

$$a2 := \frac{\int_{\ln(A01)}^{\infty} a \cdot pa(a) da}{\int_{\ln(A01)}^{\infty} pa(a) da} \quad A2 := e^{a2} = 94.6 \quad E2 := E_T(A2) = 6.4 \cdot 10^{-3}$$

## 2.4. Расчет центральной тенденции и верхней оценки для значений индивидуальной годовой эффективной дозы

$$ke := \frac{1}{\alpha^2} \cdot e^{\frac{1}{\alpha^2}} \cdot \sqrt{\frac{\Gamma\left(\frac{1}{\alpha^2}\right)}{\Gamma\left(\frac{3}{\alpha^2}\right)}} \cdot \Gamma\left(\frac{1}{\alpha^2}\right) = 2.06$$

### 2.4.1. Нижняя граница дозы, Зв/год

$$e^{(ec - ke \cdot \sigma_e)} = 1.9 \cdot 10^{-4}$$

### 2.4.2. Центральная тенденция, Зв/год

$$e^{(ec)} = 1.2 \cdot 10^{-3}$$

### 2.4.3. Верхняя оценка, Зв/год

$$e^{(ec + ke \cdot \sigma_e)} = 8 \cdot 10^{-3}$$

## 2.5. Расчет вероятности регистрации значений индивидуальной годовой эффективной дозы в экспонируемой популяции

### 2.5.1. Вероятность регистрации средних и высоких доз облучения

$$w_2 := \int_{\ln(0.005)}^{\infty} p_e(e) de = 0.061$$

### 2.5.2. Вероятность регистрации низких доз облучения

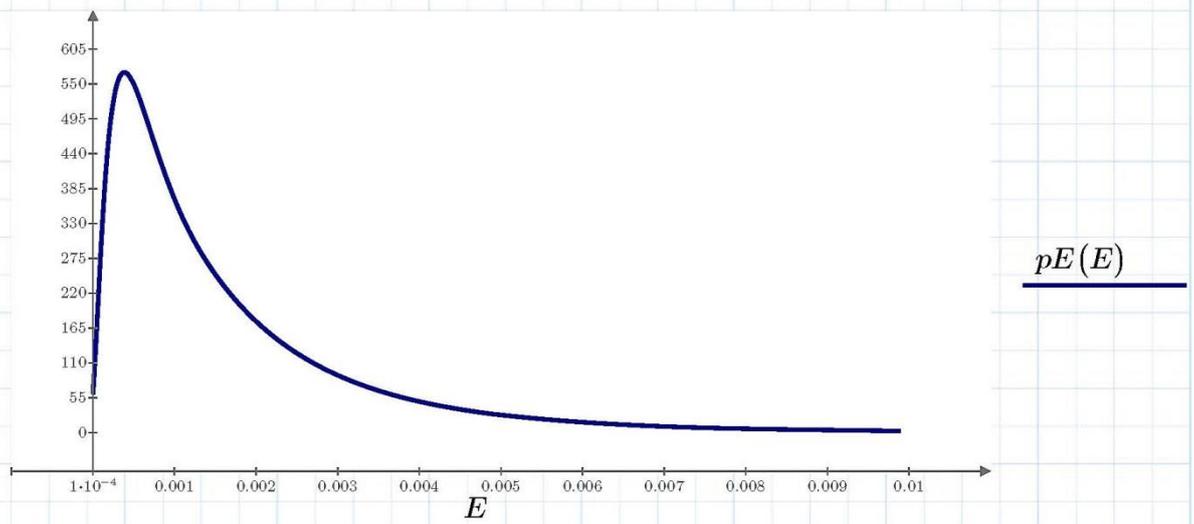
$$w_1 := \int_{\ln(E_{min})}^{\ln(0.005)} p_e(e) de = 0.749$$

### 2.5.3. Вероятность регистрации фоновых значений дозовой нагрузки

$$w_0 := \int_{-\infty}^{\ln(E_{min})} p_e(e) de = 0.189$$

## 2.6. График функции $p_E(E)$

$$p_E(E) := \frac{\alpha^2}{2 \cdot \lambda e \cdot \sigma e \cdot \Gamma\left(\frac{1}{\alpha^2}\right) \cdot E} \cdot e^{\left(-\left|\frac{\ln(E) - e c}{\lambda e \cdot \sigma e}\right|^{\alpha^2}\right)}$$



Проверка условия нормирования:

$$\int_0^{10} p_E(E) dE = 1$$

$$\int_{-10}^0 p_e(e) de = 1$$

### 3. Оценка экспозиции

3.1. Оценка годовой экспозиции по скрытой энергии ( $P$ , Дж·ч·м-З/год)

$$P(A) := 5.56 \cdot 10^{-9} \cdot 8800 \cdot (0.2 \cdot 6.5 + 0.8 \cdot A)$$

3.2. Оценка годовой экспозиции по скрытой энергии ( $P$ ) при средних и высоких уровнях облучения

3.2.1. Нижняя граница

За год, Дж·ч·м-З/год :  $P(A01) = 2.9 \cdot 10^{-3}$

Пожизненно, Дж·ч·м-З:  $P(A01) \cdot 70 = 2.1 \cdot 10^{-1}$

3.2.2. Центральная тенденция

За год, Дж·ч·м-З/год :  $P2 := P(A2) = 4 \cdot 10^{-3}$

Пожизненно, Дж·ч·м-З:  $P2 \cdot 70 = 0.264$

3.2.3. Верхняя оценка

За год, Дж·ч·м-З/год :  $P(e^{(ac + ka \cdot \sigma a)}) = 4.3 \cdot 10^{-3}$

Пожизненно, Дж·ч·м-З:  $P(e^{(ac + ka \cdot \sigma a)}) \cdot 70 = 3 \cdot 10^{-1}$

### 3.3. Оценка экспозиции по скрытой энергии ( $P$ ), при низких уровнях облучения

#### 3.3.1. Нижняя граница

$$\text{За год, Дж}\cdot\text{ч}\cdot\text{м}^{-3}/\text{год} : P(6.5) = 3.2 \cdot 10^{-4}$$

$$\text{Пожизненно, Дж}\cdot\text{ч}\cdot\text{м}^{-3}: P(6.5) \cdot 70 = 2.2 \cdot 10^{-2}$$

#### 3.3.2. Центральная тенденция

$$\text{За год, Дж}\cdot\text{ч}\cdot\text{м}^{-3}/\text{год} : P1 := P(A1) = 8.7 \cdot 10^{-4}$$

$$\text{Пожизненно, Дж}\cdot\text{ч}\cdot\text{м}^{-3}: P(A1) \cdot 70 = 6.1 \cdot 10^{-2}$$

#### 3.3.3. Верхняя оценка

$$\text{За год, Дж}\cdot\text{ч}\cdot\text{м}^{-3}/\text{год} : P(A01) = 2.9 \cdot 10^{-3}$$

$$\text{Пожизненно, Дж}\cdot\text{ч}\cdot\text{м}^{-3}: P(A01) \cdot 70 = 2.1 \cdot 10^{-1}$$

### 3.4. Оценка годовой экспозиции по скрытой энергии ( $P$ ), соответствующая фоновым уровням облучения:

$$\text{За год, Дж}\cdot\text{ч}\cdot\text{м}^{-3}/\text{год} : P0 := P(A0) = 3.18 \cdot 10^{-4}$$

$$\text{Пожизненно, Дж}\cdot\text{ч}\cdot\text{м}^{-3}: P0 \cdot 70 = 2.2 \cdot 10^{-2}$$

### 3.5. Оценка численности экспонируемой популяции

#### 3.5.1. Среднегодовая численность городской популяции

*year*      *data*

*data* - массив с данными о численности населения г. Владимир с 1989 по 2015 г.

1989      349702

1990      334000

1991      336000

1992      336000

1993      336000

1994      335000

1995      336000

1996      337000

1997      336000

1998      336000

1999      336000

2000      334000

2001      331700

2002      315954

2003      316000

2004      313000

2005      310500

2006      340700

2007      339900

2008      339500

2009      339779

2010      345373

2011      346177

2012      345907

2013      347930

2014      350087

2015      352681

Функция вычисления медианы и СКО:

$$\begin{aligned}
 \text{robust\_median}(data) := & \left\{ \begin{array}{l} s.n \leftarrow \text{length}(data) - 1 \\ s.x \leftarrow data \\ s.\beta 1 \leftarrow \text{median}(s.x) \\ s.\sigma 1 \leftarrow \sqrt{\frac{1}{s.n} \cdot \sum_{s.i=0}^{s.n} (s.x_{s.i} - s.\beta 1)^2} \\ \left[ \begin{array}{l} s.\beta 1 \\ s.\sigma 1 \end{array} \right] \end{array} \right.
 \end{aligned}$$

$$man := \text{robust\_median}(data)$$

Численность населения, чел:

$$man_0 = 336000$$

Погрешность оценки, чел:

$$\Delta_{0.95} := 1.96 \cdot man_1 = 21641$$

### 3.5.2. Численность экспонируемой популяции, т.е. популяции проживающих и работающих на первых этажах зданий:

$$we := 0.221 \quad mane := man_0 \cdot we = 74256$$

$$\Delta e_{0.95} := we \cdot \Delta_{0.95} + man_0 \cdot 0.001 = 5119$$

$$\frac{\Delta e_{0.95}}{mane} = 0.069$$

### 3.5.3. Оценка численности субпопуляции со средним и высоким уровнями облучения (более 5 мЗв/год)

$$man2 := w2 \cdot mane = 4545$$

$$\Delta 2_{0.95} := w2 \cdot \Delta e_{0.95} + mane \cdot 0.001 = 388$$

$$\frac{\Delta 2_{0.95}}{man2} = 0.085$$

### 3.5.4. Оценка численности субпопуляции с низкими уровнями облучения (от 0,5 до 5 мЗв/год)

$$man1 := w1 \cdot mane = 55653$$

$$\Delta 1_{0.95} := w1 \cdot \Delta e_{0.95} + mane \cdot 0.001 = 3911$$

$$\frac{\Delta 1_{0.95}}{man1} = 0.07$$

### 3.5.5. Оценка численности субпопуляции с фоновым уровнем облучения (до 0,5 мЗв/год)

$$man0 := w0 \cdot mane + (1 - we) \cdot man_0 = 275802$$

$$\Delta 0_{0.95} := mane \cdot 0.001 + (1 - we) \cdot \Delta_{0.95} - man_0 \cdot 0.001 = 16597$$

$$\frac{\Delta 0_{0.95}}{man0} = 0.06$$

### 3.5.6. Уточненная оценка численности экспонируемой популяции, чел.

$$mane1 := mane \cdot (1 - we) = 57845$$

$$\Delta e1_{0.95} := (1 - we) \cdot \Delta e_{0.95} - mane \cdot 0.001 = 3913$$

$$\frac{\Delta e1_{0.95}}{mane1} = 0.068$$

## 4. Характеристика риска

4.1. Дополнительный пожизненный абсолютный номинальный риск радиационно-индуцированного рака легкого, скорректированный на ущерб

4.1.1. Для субпопуляции со средним и высоким уровнем облучения

$$\text{min} \quad \Delta ICRU2_{min} := 0.14 \cdot P(A01) \cdot 70 = 2.9 \cdot 10^{-2}$$

$$\text{center} \quad \Delta ICRU2 := 0.14 \cdot P2 \cdot 70 = 3.7 \cdot 10^{-2}$$

$$\text{max} \quad \Delta ICRU2_{max} := 0.14 \cdot P(e^{(ac + ka \cdot \sigma a)}) \cdot 70 = 4.2 \cdot 10^{-2}$$

4.1.2. Для субпопуляции с низким уровнем облучения

$$\text{min} \quad \Delta ICRU1_{min} := 0.14 \cdot P(6.5) \cdot 70 = 3.1 \cdot 10^{-3}$$

$$\text{center} \quad \Delta ICRU1 := 0.14 \cdot P1 \cdot 70 = 8 \cdot 10^{-3}$$

$$\text{max} \quad \Delta ICRU1_{max} := 0.14 \cdot P(A01) \cdot 70 = 2.9 \cdot 10^{-2}$$

4.1.3. Для субпопуляции с минимальным (фоновым) уровнем радонового облучения

$$\Delta ICRU0 := 0.14 \cdot P0 \cdot 70 = 3.1 \cdot 10^{-3}$$

#### 4.2. Дополнительный пожизненный абсолютный номинальный риск радиационно-индуцированного смертельного рака легкого, взвешенный по летальности

Коэффициент относительной потери времени жизни без рака:

$$k_u := 0.8$$

##### 4.2.1. Для субпопуляции со средним и высоким уровнем облучения

$$\text{min} \quad \Delta ICRL2_{min} := \frac{\Delta ICRU2_{min}}{k_u} = 3.6 \cdot 10^{-2}$$

$$\text{center} \quad \Delta ICRL2 := \frac{\Delta ICRU2}{k_u} = 4.6 \cdot 10^{-2}$$

$$\text{max} \quad \Delta ICRL2_{max} := \frac{\Delta ICRU2_{max}}{k_u} = 5.3 \cdot 10^{-2}$$

##### 4.2.2. Для субпопуляции с низким уровнем облучения

$$\text{min} \quad \Delta ICRL1_{min} := \frac{\Delta ICRU1_{min}}{k_u} = 3.9 \cdot 10^{-3}$$

$$\text{center} \quad \Delta ICRL1 := \frac{\Delta ICRU1}{k_u} = 1 \cdot 10^{-2}$$

$$\text{max} \quad \Delta ICRL1_{max} := \frac{\Delta ICRU1_{max}}{k_u} = 3.6 \cdot 10^{-2}$$

##### 4.2.3. Для субпопуляции с минимальным (фоновым) уровнем радонового облучения

$$\Delta ICRL0 := \frac{\Delta ICRU0}{k_u} = 3.9 \cdot 10^{-3}$$

#### 4.3. Дополнительный пожизненный абсолютный номинальный риск возникновения радиационно-индуцированного рака легкого

Доля летальности рака легкого:  $q := 0.89$

Минимальный вес для несмертельных раков:  $qm := 0.1$

Функция пересчета для риска возникновения рака легкого: 
$$f(RL) := \frac{RL}{q + (1 - q) \cdot ((1 - qm) \cdot q + qm)}$$

##### 4.3.1. Для субпопуляции со средним и высоким уровнем облучения

min  $\Delta ICR_{2min} := f(\Delta ICR_{L2min}) = 3.6 \cdot 10^{-2}$

center  $\Delta ICR_2 := f(\Delta ICR_{L2}) = 4.7 \cdot 10^{-2}$

max  $\Delta ICR_{2max} := f(\Delta ICR_{L2max}) = 5.4 \cdot 10^{-2}$

##### 4.3.2. Для субпопуляции с низким уровнем облучения

min  $\Delta ICR_{1min} := f(\Delta ICR_{L1min}) = 3.9 \cdot 10^{-3}$

center  $\Delta ICR_1 := f(\Delta ICR_{L1}) = 1 \cdot 10^{-2}$

max  $\Delta ICR_{1max} := f(\Delta ICR_{L1max}) = 3.6 \cdot 10^{-2}$

##### 4.3.3. Для субпопуляции с минимальным (фоновым) уровнем радонового облучения

$\Delta ICR_0 := f(\Delta ICR_{L0}) = 3.9 \cdot 10^{-3}$

#### 4.4. Относительный риск возникновения радиационно-индуцированного рака легкого (в %)

Функция вычисления относительного риска при уровне статистической значимости 0,05 методом анализа четырехпольных таблиц сопряженности:

$$RR_{95}(a, b, c, d) := \left\{ \begin{array}{l} RR_0 \leftarrow \frac{a \cdot (c + d)}{c \cdot (a + b)} \\ \sigma \leftarrow \sqrt{\frac{b}{a \cdot (a + b)} + \frac{d}{c \cdot (c + d)}} \\ RR_1 \leftarrow e^{\ln(RR_0) - 1.96 \cdot \sigma} \\ RR_2 \leftarrow e^{\ln(RR_0) + 1.96 \cdot \sigma} \\ RR \end{array} \right.$$

##### 4.4.1. Построение четырехпольной таблицы сопряженности и оценка относительного риска для субпопуляции со средним и высоким уровнем облучения

$$a_2 := \text{round}(man2 \cdot \Delta ICR2) = 212 \quad b_2 := \text{round}(man2 \cdot (1 - \Delta ICR2)) = 4333$$

$$c_0 := \text{round}(man0 \cdot \Delta ICR0) = 1086 \quad d_0 := \text{round}(man0 \cdot (1 - \Delta ICR0)) = 274716$$

$$\text{Вычисление RR:} \quad RR2 := RR_{95}(a_2, b_2, c_0, d_0)$$

$$\text{Относительный риск:} \quad RR2_0 = 11.846$$

$$\text{Нижняя граница ДИ 95 \%:} \quad RR2_1 = 10.255$$

$$\text{Верхняя граница ДИ 95 \%:} \quad RR2_2 = 13.684$$

##### 4.4.2. Построение четырехпольной таблицы сопряженности и оценка относительного риска для субпопуляции с низким уровнем облучения

$$a_1 := \text{round}(man1 \cdot \Delta ICR1) = 597 \quad b_1 := \text{round}(man1 \cdot (1 - \Delta ICR1)) = 55056$$

$$c_0 := \text{round}(man0 \cdot \Delta ICR0) = 1086 \quad d_0 := \text{round}(man0 \cdot (1 - \Delta ICR0)) = 274716$$

$$\text{Вычисление RR:} \quad RR1 := RR_{95}(a_1, b_1, c_0, d_0)$$

$$\text{Относительный риск:} \quad RR1_0 = 2.724$$

$$\text{Нижняя граница ДИ 95 \%:} \quad RR1_1 = 2.466$$

$$\text{Верхняя граница ДИ 95 \%:} \quad RR1_2 = 3.009$$

#### 4.5. Дополнительный популяционный среднегодовой риск радиационно-индуцированного рака легкого, 1/год

4.5.1. Для субпопуляции со средним и высоким уровнем облучения

$$\text{min} \quad \Delta PCR2_{min} := \Delta ICR2_{min} \cdot \frac{(man2 - \Delta 2_{0.95})}{70} = 2.2$$

$$\text{center} \quad \Delta PCR2 := \Delta ICR2 \cdot \frac{man2}{70} = 3$$

$$\text{max} \quad \Delta PCR2_{max} := \Delta ICR2_{max} \cdot \frac{(man2 + \Delta 2_{0.95})}{70} = 3.8$$

4.5.2. Для субпопуляции с низким уровнем облучения

$$\text{min} \quad \Delta PCR1_{min} := \Delta ICR1_{min} \cdot \frac{(man1 - \Delta 1_{0.95})}{70} = 2.9$$

$$\text{center} \quad \Delta PCR1 := \Delta ICR1 \cdot \frac{man1}{70} = 8.5$$

$$\text{max} \quad \Delta PCR1_{max} := \Delta ICR1_{max} \cdot \frac{(man1 + \Delta 1_{0.95})}{70} = 31$$

4.5.3. Для субпопуляции с минимальным (фоновым) уровнем радонового облучения

$$\text{center} \quad \Delta PCR0 := \Delta ICR0 \cdot \frac{man0}{70} = 15.5$$

$$\text{max} \quad \Delta PCR0_{max} := \Delta ICR0 \cdot \frac{(man0 + \Delta 0_{0.95})}{70} = 16.5$$

#### 4.5.4. Распределение дополнительного популяционного среднегодового радиационного риска стохастических эффектов

Суммарный популяционный риск (центральная тенденция):

$$\Delta PCR2 + \Delta PCR1 + \Delta PCR0 = 27.1$$

Нормализованный показатель заболеваемости (центральная тенденция), на 100000 чел:

$$inc_c := \frac{\Delta PCR2 + \Delta PCR1 + \Delta PCR0}{man_0} \cdot 100000 = 8.1$$

Суммарный популяционный риск (верхняя оценка):

$$\Delta PCR2_{max} + \Delta PCR1_{max} + \Delta PCR0 = 50.3$$

Нормализованный показатель заболеваемости (верхняя оценка), на 100000 чел:

$$inc_{max} := \frac{\Delta PCR2_{max} + \Delta PCR1_{max} + \Delta PCR0}{man_0 - 1.96 \cdot man_1} \cdot 100000 = 16$$

Вклад субпопуляции со средним и высоким уровнем облучения, %

$$\frac{\Delta PCR2}{\Delta PCR2 + \Delta PCR1 + \Delta PCR0} \cdot 100 = 11.2$$

Вклад субпопуляции с низким уровнем облучения, %

$$\frac{\Delta PCR1}{\Delta PCR2 + \Delta PCR1 + \Delta PCR0} \cdot 100 = 31.5$$

Вклад субпопуляции с минимальным (фоновым) уровнем радонового облучения, %

$$\frac{\Delta PCR0}{\Delta PCR2 + \Delta PCR1 + \Delta PCR0} \cdot 100 = 57.3$$

#### 4.5.5. Оценка вклада радонового облучения в заболеваемость радиационно-индуцированного рака легкого

<i>incidence0</i>	<i>incidence</i>	<i>incidence0</i> - массив с данными о "грубых" показателях заболеваемости с 2008 по 2014 г.;
39.8	20.94	<i>incidence</i> - массив с данными о стандартизованных по возрасту (нормальных) показателях заболеваемости с 2008 по 2014 г.
33.3	18.55	
34.13	18.88	
40.58	23.03	
38.25	21.61	$inc0 := robust\_median(incidence0)$
40.42	23.39	
35.1	20.35	$inc := robust\_median(incidence)$

Среднегодовой "грубый" показатель заболеваемости и ДИ 95 % злокачественными новообразованиями трахеи, бронхов, легкого (С33, С34):

$$inc0_0 = 38.3 \quad \Delta inc_{0.95} := 1.96 \cdot inc0_1 = 6.4$$

Среднегодовое число и ДИ 95 % регистрируемых случаев злокачественными новообразованиями трахеи, бронхов, легкого (С33, С34) на территории г. Владимир:

$$inc0_0 \cdot \frac{man_0}{100000} = 129 \quad \Delta inc_{0.95} \cdot \frac{man_0}{100000} = 21$$

Медианное значение и ДИ 95 % стандартизованной заболеваемости, на 100000 чел:

$$inc_0 = 20.9 \quad \Delta inc_{0.95} := 1.96 \cdot inc_1 = 3.7$$

Вклад радонового облучения в заболеваемость злокачественными новообразованиями трахеи, бронхов, легкого (С33, С34), %:

$$\frac{inc_c}{inc_0} \cdot 100 = 38.5$$

#### 4.6. Обоснование размера выборки

Критерий Стьюдента, соответствующий уровню надежности 95 %:

$$t_{\alpha} := 1.96$$

Доля зданий со средним и высоким уровнями облучения:

$$w_p := w_2 = 0.061$$

Размер генеральной совокупности:

$$N_p := 2800$$

Предельная ошибка выборки:

$$\Delta p := 0.05$$

Минимально необходимое для обследования количество зданий:

$$n_p := \frac{t_{\alpha}^2 \cdot w_p \cdot (1 - w_p) \cdot N_p}{\Delta p^2 \cdot N_p + t_{\alpha}^2 \cdot w_p \cdot (1 - w_p)} = 86$$

Минимально необходимая доля зданий для обследования:

$$\frac{n_p}{N_p} \cdot 100 = 3.1$$

## 5. Характеристика опасности радонового облучения (сравнительная характеристика риска)

5.1. Среднее число лет сокращения продолжительности жизни из-за преждевременной смерти или болезни

Среднее число потерянных лет жизни, характерное для всех онкологических заболеваний в целом:  $U := 15$

5.1.1. Для субпопуляции со средним и высоким уровнем облучения, лет

$$\text{min} \quad \Delta ICD2_{min} := \Delta ICRU2_{min} \cdot U = 0.43$$

$$\text{center} \quad \Delta ICD2 := \Delta ICRU2 \cdot U = 0.55$$

$$\text{max} \quad \Delta ICD2_{max} := \Delta ICRU2_{max} \cdot U = 0.64$$

5.1.2. Для субпопуляции с низким уровнем облучения, лет

$$\text{min} \quad \Delta ICD1_{min} := \Delta ICRU1_{min} \cdot U = 0.05$$

$$\text{center} \quad \Delta ICD1 := \Delta ICRU1 \cdot U = 0.13$$

$$\text{max} \quad \Delta ICD1_{max} := \Delta ICRU1_{max} \cdot U = 0.43$$

5.1.3. Для субпопуляции с минимальным (фоновым) уровнем радонового облучения, лет

$$\text{center} \quad \Delta ICD0 := \Delta ICRU0 \cdot U = 0.05$$

## 5.2. Ожидаемое количество потерянных чел-лет/год жизни без рака легкого

### 5.2.1. Для субпопуляции со средним и высоким уровнем облучения, чел-лет/год

$$\text{min} \quad \Delta PCD2_{\text{min}} := \Delta ICD2_{\text{min}} \cdot \frac{(man2 - \Delta 2_{0.95})}{70} = 26$$

$$\text{center} \quad \Delta PCD2 := \Delta ICD2 \cdot \frac{man2}{70} = 36$$

$$\text{max} \quad \Delta PCD2_{\text{max}} := \Delta ICD2_{\text{max}} \cdot \frac{(man2 + \Delta 2_{0.95})}{70} = 45$$

### 5.2.2. Для субпопуляции с низким уровнем облучения, чел-лет/год

$$\text{min} \quad \Delta PCD1_{\text{min}} := \Delta ICD1_{\text{min}} \cdot \frac{(man1 - \Delta 1_{0.95})}{70} = 35$$

$$\text{center} \quad \Delta PCD1 := \Delta ICD1 \cdot \frac{man1}{70} = 101$$

$$\text{max} \quad \Delta PCD1_{\text{max}} := \Delta ICD1_{\text{max}} \cdot \frac{(man1 + \Delta 1_{0.95})}{70} = 368$$

### 5.2.3. Для субпопуляции с минимальным (фоновым) уровнем радонового облучения, чел-лет/год

$$\text{center} \quad \Delta PCD0 := \Delta ICD0 \cdot \frac{man0}{70} = 184$$

$$\text{max} \quad \Delta PCD0_{\text{max}} := \Delta ICD0 \cdot \frac{(man0 + \Delta 0_{0.95})}{70} = 195$$

### 5.2.4. Потери жизненного потенциала для всего населения г. Владимир в результате радонового облучения, чел-лет/год

Суммарный популяционный ущерб (центральная тенденция):

$$\Delta PCD2 + \Delta PCD1 + \Delta PCD0 = 321.4$$

Суммарный популяционный ущерб (верхняя оценка):

$$\Delta PCD2_{\text{max}} + \Delta PCD1_{\text{max}} + \Delta PCD0_{\text{max}} = 608$$

5.3. Суммарные экономические потери от дополнительной смертности в результате индуцированного радоном рака легкого, рассчитанные через внутренний региональный продукт (ВРП)

5.3.1. ВРП на душу населения, тыс. руб./год

2014 г. - 232,6

2013 г. - 216,9

2012 г. - 200,5

2011 г. - 181,8

2010 г. - 155,5

5.3.2. Экономические потери (на 2014 г.), млн. руб./год

Экономические потери (центральная тенденция):

$$(\Delta PCD2 + \Delta PCD1 + \Delta PCD0) \cdot \frac{232.6}{1000} = 74.8$$

Экономические потери (верхняя оценка), млн. руб./год:

$$(\Delta PCD2_{max} + \Delta PCD1_{max} + \Delta PCD0_{max}) \cdot \frac{232.6}{1000} = 141.4$$

$$(\Delta PCD2) \cdot \frac{232.6}{1000} = 8.4$$

$$(\Delta PCD2_{max}) \cdot \frac{232.6}{1000} = 10.4$$

$$(\Delta PCD1) \cdot \frac{232.6}{1000} = 23.5$$

$$(\Delta PCD1_{max}) \cdot \frac{232.6}{1000} = 85.6$$

$$(\Delta PCD0) \cdot \frac{232.6}{1000} = 42.8$$

$$(\Delta PCD0_{max}) \cdot \frac{232.6}{1000} = 45.4$$