

*На правах рукописи*



**Кононенко Дмитрий Викторович**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ РАДИАЦИОННОГО РИСКА ДЛЯ  
ЗДОРОВЬЯ НАСЕЛЕНИЯ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ РАДОНОМ И ЕГО  
КОРОТКОЖИВУЩИМИ ДОЧЕРНИМИ ПРОДУКТАМИ РАСПАДА**

3.2.1

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата биологических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в Федеральном бюджетном учреждении науки «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека.

**Научный руководитель:** **Кормановская Татьяна Анатольевна,**  
кандидат биологических наук,  
ведущий научный сотрудник лаборатории  
дозиметрии природных источников ФБУН НИИРГ  
им. П.В. Рамзаева

**Официальные оппоненты:** **Микляев Петр Сергеевич,**  
доктор геолого-минералогических наук,  
профессор РАН,  
заместитель директора по научной работе  
Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН

**Киселев Сергей Михайлович,**  
кандидат биологических наук,  
заведующий лабораторией регулирующего надзора  
за объектами ядерного наследия, ФГБУ ГНЦ  
ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России

**Ведущая организация:** Федеральное государственное унитарное  
предприятие Научно-технический центр  
радиационно-химической безопасности и гигиены  
Федерального медико-биологического агентства  
(ФГУП НТЦ РХБГ ФМБА России)

Защита диссертации состоится «23» декабря 2021 г. в 11:00 на заседании диссертационного совета Д 208.133.01, созданного на базе ФГБУ «ЦСП» ФМБА России, по адресу: 119121, Москва, ул. Погодинская, д. 10, строение 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУ «ЦСП» ФМБА России и на сайте <https://www.cspfmba.ru>

Автореферат разослан «22» октября 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета, д.б.н.



Ингель Фаина Исааковна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования**

Оценка и анализ риска – это эффективный современный инструмент поддержки принятия решений по защите населения и персонала от опасных факторов различной природы: ионизирующего излучения, вредных химических веществ, наноматериалов, микробов и вирусов, техногенных аварий и природных катаклизмов, факторов социальной природы и т.д. [Онищенко, 2014; Демин, 2009; Демин, 2012]. В настоящее время одной из актуальнейших задач, стоящих перед научными организациями Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Роспотребнадзора), является внедрение в практику санитарно-эпидемиологического надзора методологии оценки риска, а также гармонизация гигиенических нормативов с международными стандартами на основе этой методологии. Эта задача была поставлена руководством Роспотребнадзора еще в 1997 г., в дальнейшем не раз актуализировалась, а в 2015 г. начался постепенный переход территориальных органов Роспотребнадзора на новую концепцию риск-ориентированного надзора [Попова, 2015].

Уровень научно-методического обеспечения процедур оценки и анализа рисков от вредных для здоровья населения факторов окружающей среды заметно отличается для разных групп факторов. Так, подробное руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ было выпущено еще в 2004 г. [Р 2.1.10.1920-04], тогда как методические документы по оценке риска за счет лишь некоторых источников ионизирующего излучения появились гораздо позже [МУ 2.1.10.3014-12; МР 2.6.1.0098-15].

Вопросы разработки методики оценки риска для здоровья населения при облучении радоном и его короткоживущими дочерними продуктами распада (ДПР), унификации методических приемов, а также выбора наиболее подходящей для реализации в РФ модели оценки риска и ее адаптации для использования с российскими данными остаются актуальными уже более 20 лет. Положение «О порядке оценки риска загрязнения окружающей среды здоровью населения в Российской Федерации (оценка риска)», утвержденное постановлением Главного Государственного санитарного врача РФ в 1997 г., предусматривало возможность лишь временного использования американских методик: «Для адаптации методики оценки риска к российским условиям, накопления опыта работы и до разработки унифицированной методики допускается использование методологии оценки риска, разработанной Агентством по охране окружающей среды (США)...». Несмотря на то, что за прошедшие 20 лет появилось некоторое количество публикаций [Жуковский, 1997; Жуковский, 2001] о научно-исследовательских работах, в которых применялись методики, разработанные Агентством по охране окружающей среды [EPA, 2002; EPA, 2003] и Национальной академией наук США [National Research Council, 1988;

National Research Council, 1999], распространения они не получили и в практической деятельности Роспотребнадзора не использовались.

Разработка комплекса мер по снижению уровней облучения населения РФ, подвергающегося облучению за счет природных источников ионизирующего излучения (ПИИИ) в дозе более 5 мЗв/год, в том числе радоном и его ДПР, является одной из актуальных задач по усилению радиационной защиты населения, обозначенной в Основах государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года, утвержденных приказом Президента РФ 1 марта 2012 г. № Пр-539. В Указе Президента РФ от 13.10.2018 № 585 «Об утверждении Основ государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу» в качестве одного из основных направлений фигурирует «совершенствование государственного контроля (надзора) за воздействием на здоровье человека природных источников ионизирующего излучения, в том числе радона и продуктов его распада, в жилых домах, детских учреждениях, общественных и производственных зданиях». В Указах Президента РФ от 7 мая 2012 г. № 598 «О совершенствовании государственной политики в сфере здравоохранения» и от 7 мая 2018 г. № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» была поставлена задача повысить ожидаемую продолжительность жизни, в том числе за счет постепенного снижения показателей смертности населения от злокачественных новообразований (ЗНО). Меры по снижению уровней облучения населения России ПИИИ и, прежде всего, радоном и его ДПР, должны способствовать уменьшению количества случаев радон-индуцированного рака легкого. Рак трахеи, бронхов и легкого является одной из главных причин смертности от ЗНО в течение многих лет как для мужчин, так и для женщин [Петрова, 2015; МНИОИ им. П.А. Герцена, 2009–2018]. Отсутствие методического аппарата по оценке рисков в данном случае может приводить к ошибкам при определении целесообразности, приоритетности и оценке эффективности санитарно-гигиенических мероприятий, направленных на снижение неблагоприятного воздействия важнейшего ПИИИ на здоровье населения.

### **Степень разработанности темы исследования**

До начала данной работы утвержденная методика оценки риска для здоровья населения при облучении радоном и его ДПР в РФ отсутствовала. Таким образом, процедура разработки и оценки эффективности различных мероприятий, которые могут быть направлены на снижение облучения населения за счет радона и его ДПР, не была должным образом методически обеспечена. С учетом того, что облучение радоном и его ДПР формирует основную часть годовой дозы облучения населения РФ [Барковский, 2018], разработка соответствующей методики оценки риска являлась приоритетной задачей

научно-методического обеспечения деятельности Роспотребнадзора. Этот факт явился основанием для выполнения данного исследования.

**Целью исследования** является разработка методики оценки риска для здоровья населения РФ при облучении радоном и его ДПР.

#### **Задачи исследования**

1. Выбор модели расчета и показателей риска для здоровья населения при облучении радоном и его ДПР, анализ их применимости для использования с российскими данными.
2. Разработка методических документов, описывающих процедуру оценки риска для здоровья населения РФ при облучении радоном и его ДПР.
3. Подготовка и статистический анализ данных о содержании радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий во всех субъектах РФ, накопленных в Федеральном банке данных доз облучения населения Российской Федерации за счет природного и техногенно измененного радиационного фона (ФБДОПИ) с 2001 по 2017 гг.
4. Оценка риска для здоровья населения всех субъектов РФ при облучении радоном и его ДПР с использованием разработанной методики.

#### **Научная новизна работы**

1. Разработана методика оценки риска для здоровья населения РФ при облучении радоном и его ДПР, которая подходит для различных сценариев облучения и различных наборов исходных измерительных и статистических медико-демографических данных.
2. Для всех субъектов РФ на основе результатов измерений содержания радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий, проведенных с 2001 по 2017 гг. и накопленных в ФБДОПИ, получены параметры распределений значений объемной активности (ОА) радона с использованием предложенной схемы анализа.
3. Рассчитаны показатели риска для здоровья населения всех субъектов РФ при облучении радоном и его ДПР на основе полученных средних значений ОА радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий с использованием разработанной методики оценки риска. Проведено сравнение полученных результатов с показателями рисками за счет других ИИИ и с рисками смерти от других ЗНО.

**Практическая значимость работы.** В работе научно обоснована и предложена к внедрению в отечественную практику методика оценки риска для здоровья населения при облучении радоном и его ДПР, использование которой впервые дает возможность проводить сравнение рисков для здоровья человека не только при облучении различными источниками ионизирующего излучения (ИИИ), но и при воздействии вредных факторов окружающей среды абсолютно разной природы, что ранее было невозможно.

В результате выполнения исследования разработаны и утверждены на федеральном уровне два методических документа:

- Методические рекомендации МР 2.6.1.0145-19 «Расчет показателей радиационного риска по данным содержащимся в радиационно-гигиенических паспортах территорий для обеспечения комплексной сравнительной оценки состояния радиационной безопасности населения субъектов Российской Федерации» (утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 23.04.2019 г.);
- Методические рекомендации МР 2.6.1.0172-20 «Оценка радиационного риска для здоровья населения за счет внутреннего облучения радоном и его дочерними продуктами распада» (утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 10.04.2020 г.).

Положения, сформулированные в диссертационной работе, включены в цикл лекций «Ограничение облучения населения от природных источников ионизирующего излучения» в рамках программ повышения квалификации руководящих работников и специалистов по специальности «Радиационная гигиена и радиационная безопасность», проводимых на базе ФБУН «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева».

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Методика оценки риска для здоровья населения РФ при облучении радоном и его ДПР.
2. Параметры распределений значений ОА радона в субъектах РФ.

#### **Достоверность полученных результатов**

Результаты исследования основаны на массиве данных, собранных в рамках функционирования единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан (ЕСКИД) за 17 лет во всех субъектах РФ (около 800 тыс. результатов измерений), а также на массиве результатов измерений ОА радона в воздухе образовательных учреждений Санкт-Петербурга, полученном при непосредственном участии автора работы (более 1100 результатов). Достоверность результатов обеспечивается использованием поверенных средств измерений высокой точности, большим объемом массивов проанализированных данных и использованием современных методов математической статистики.

#### **Апробация результатов исследования**

Апробация диссертации проведена на заседании Ученого Совета ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева 28.07.2020 г. и на заседании апробационной комиссии ФГБУ «ЦСП» ФМБА России 12.10.2021 г.

Результаты исследования, а также основные положения работы, доложены и обсуждены на следующих конференциях и семинарах:

- Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы радиационной гигиены» (г. Санкт-Петербург, 01-03 октября 2012 г.);
- Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Актуальные проблемы безопасности и оценки риска здоровью населения при воздействии факторов среды обитания» (г. Пермь, 21-23 мая 2014 г.);
- Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы радиационной гигиены», посвященная 85-летию со дня рождения П.В. Рамзаева (г. Санкт-Петербург, 02-03 октября 2014 г.);
- Семинар МАГАТЭ «Опыт проведения корректирующих и превентивных радонозащитных мероприятий» в рамках проекта технического сотрудничества RER9136 «Снижение облучения населения радоном путем поддержки внедрения и дальнейшего развития национальной стратегии по радону» (г. Ереван, Армения, 22-28 октября 2017 г.);
- Семинар МАГАТЭ «Базы данных, статистический анализ, гармонизация протоколов и процедур измерения радона» по проекту технического сотрудничества RER9153 «Развитие региональных возможностей по контролю долгосрочных рисков для населения в связи с облучением радоном в жилых домах и на рабочих местах» (г. Сараево, Босния и Герцеговина, 11-15 июня 2018 г.);
- Семинар МАГАТЭ «Внедрение требований по безопасности МАГАТЭ, касающихся радона в жилых домах и на рабочих местах, и разработка плана действий по радону» по проекту технического сотрудничества RER9153 «Развитие региональных возможностей по контролю долгосрочных рисков для населения в связи с облучением радоном в жилых домах и на рабочих местах» (г. Душанбе, Таджикистан, 26-30 августа 2018 г.);
- Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы радиационной гигиены» (г. Санкт-Петербург, 23-24 октября 2018 г.).

**Личный вклад автора** в планирование исследования, постановку задач, определение цели, выбор объектов и методов исследования, обобщение и интерпретацию результатов составляет около 95%. Анализ фактического материала, статистическая обработка данных, формулирование выводов и основных положений, выносимых на защиту, полностью проведены автором. Автор как сотрудник лаборатории дозиметрии природных источников ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева принимал непосредственное участие в получении исходных данных о содержании радона в воздухе помещений, аккумулярованных в ФБДОПИ, в целом ряде регионов России.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 22 научные работы, в том числе 9 статей в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных журналов ВАК при Минобрнауки России (из которых 8 статей в изданиях, индексируемых в международной библиографической и реферативной базе данных «Scopus»), включая 5 статей в

моноавторстве и 3 статьи в качестве первого автора, 1 статья в зарубежном рецензируемом журнале, 2 методических рекомендаций, 1 отчет о НИР, 1 монография.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка сокращений, списка литературы из 379 источников (из них 151 отечественный и 228 зарубежных). Работа изложена на 218 страницах (основной текст на 144 страницах, список литературы на 33 страницах, приложения на 41 странице), содержит 33 таблицы и проиллюстрирована 16 рисунками; в двух приложениях приведены разработанные и утвержденные на федеральном уровне методические документы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, поставлена цель и определены задачи работы, представлены научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы основные защищаемые положения.

В **первой главе** представлен обзор литературных данных о влиянии внутреннего облучения радоном и его ДПР на здоровье человека. Радон, торон и их ДПР были признаны доказанными канцерогенными факторами окружающей среды для легких человека еще в конце 1980-х гг. [WHO, 1986; IARC, 1988], и далее этот факт был неоднократно подтвержден [IARC, 2001; IARC, 2009]. Международная комиссия по радиологической защите (МКРЗ) подтверждает, что доказательства повышенного риска для населения, облучающегося при эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) радона даже менее  $100 \text{ Бк/м}^3$ , являются убедительными и неоспоримыми [ICRP, 2010]. При этом имеющиеся на данный момент результаты многочисленных эпидемиологических исследований показывают отсутствие убедительных доказательств наличия связи между облучением радоном и его ДПР с онкологическими заболеваниями других локализаций кроме легкого [ICRP, 2010]. Вывод о том, что радон в воздухе помещений является второй по значимости причиной возникновения рака легкого (РЛ) после табакокурения был сделан еще в 1999 г. [National Research Council, 1999], а в 2009 г. данный факт был подтвержден ВОЗ [WHO, 2009].

Далее в главе представлены литературные данные о синергическом взаимодействии факторов облучения радоном и табакокурения, приведены математические выражения этой зависимости. Подробно освещена история разработки математических моделей риска для здоровья человека при облучении радоном и его ДПР, представлена их классификация по типу эпидемиологических исследований, в рамках которых они были разработаны, приведена хронология развития многофакторных моделей риска. Отдельное внимание уделено вопросам изучения связи облучения радоном в детском и подростковом возрасте с различными онкологическими заболеваниями и учета возраста при оценке рисков, поскольку по 10% видам раковых заболеваний (и, в частности, в случае РЛ) дети менее



чувствительны к воздействию радиации, чем взрослые, или, как минимум, имеют примерно одинаковую чувствительность [UNSCEAR, 2014].

В конце главы представлен обзор результатов опубликованных работ по оценке рисков в различных странах. Анализ литературных данных показывает, что до настоящего времени ни одна из проведенных оценок рисков для здоровья населения РФ при облучении радоном и его ДПР не базировалась одновременно на наиболее современных моделях риска и прямых измерительных данных, полученных непосредственно в каждом из субъектов РФ. Кроме того, использованные показатели риска позволяют проводить лишь сравнение между разными странами, но не дают возможности сравнить риски смерти от различных ЗНО, риски при облучении различными ИИИ или риски возникновения РЛ при воздействии на организм вредных факторов окружающей среды разной природы (например, ионизирующего излучения и химических веществ). Все эти факты подтверждают актуальность выбранной темы и значимость данного исследования.

Во **второй главе** изложены методологические аспекты работы, описаны современные методы измерения содержания радона в воздухе помещений и обработки результатов радоновых обследований.

Для решения первых двух задач исследования необходимо было провести апробацию (тестирование) нескольких современных моделей риска. Для этого было использовано два массива результатов измерений содержания радона в воздухе помещений. Первый массив объемом более 1000 значений был получен с 2003 по 2012 гг. в период до и после осуществления радонозащитных мероприятий в здании Государственного бюджетного общеобразовательного учреждения школа-интернат №289 Красносельского района Санкт-Петербурга в пос. Можайский специалистами лаборатории дозиметрии природных источников ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, в том числе автором данной работы. Второй массив объемом более 100 значений был получен с 2008 по 2012 гг. в здании Государственного бюджетного дошкольного образовательного учреждения детский сад №52 Красносельского района Санкт-Петербурга в пос. Можайский, расположенном рядом со школой-интернатом №289. Для расчета экспозиции ДПР радона, т.е. временно́го интеграла ОА ДПР во вдыхаемом воздухе, было разработано три детальных варианта сценария облучения: до и после проведения радонозащитных мероприятий в здании школы, а также в ситуации равномерного пожизненного облучения.

В работе были протестированы следующие модели расчета риска: однофакторная «Darby-2005» [Darby, 2005; Darby, 2006] (формула 1), многофакторные «EPA-2003» [EPA, 2003] и «Wismut-2006» [Grosche, 2006] (формула 2), «FCZ» (формула 3) [Tirmarche, 2003], «Tomasek-2014» [Tomasek, 2014] (формула 4):

$$ERR = 0,0016 \cdot A_{Rn}, \quad (1)$$

где  $ERR$ , отн. ед. – избыточный относительный риск (ИОР);

$A_{Rn}$ , Бк/м<sup>3</sup> – ОА радона в воздухе помещений;

$$ERR(t) = \beta \cdot (\theta_{5-14} \cdot \omega_{5-14} + \theta_{15-24} \cdot \omega_{15-24} + \theta_{25+} \cdot \omega_{25+}) \cdot \phi_{age} \cdot \gamma_z, \quad (2)$$

где  $t$ , лет – возраст на момент оценки риска;

$ERR(t)$ , отн. ед. – ИОР в возрасте  $t$ ;

$\beta$ ,  $WLM^{-1}$  – основной параметр зависимости «экспозиция – ответ»;

$\omega_{5-14}$ ,  $\omega_{15-24}$ ,  $\omega_{25+}$ ,  $WLM$  – кумулятивная экспозиция ДПР радона, полученная в интервалах времени от 5 до 14 лет, от 15 до 24 лет и от 25 лет и более до возраста  $t$ , для которого производится оценка риска;

$\theta_{5-14}$ ,  $\theta_{15-24}$ ,  $\theta_{25+}$ ,  $\phi_{age}$ ,  $\gamma_z$ , отн. ед. – коэффициенты модели;

$$ERR(t) = \beta \cdot W \cdot \exp[\alpha \cdot (AE(t) - 30) + \theta \cdot (TE(t) - 20)], \quad (3)$$

где  $W$ ,  $WLM$  – кумулятивная экспозиция ДПР радона, накопленная до возраста  $t-5$  лет;

$AE(t)$ , лет – возраст на момент медианной экспозиции;

$TE(t)$ , лет – время, прошедшее с возраста на момент медианной экспозиции;

$\alpha$ ,  $\theta$ , отн. ед. – коэффициенты модели;

$$ERR(t) = \left( \sum \beta_C \cdot W_C \right) \cdot \exp[c_A \cdot (AE(t) - 30) + c_T \cdot (TE(t) - 20)] \quad , \quad (4)$$

где  $\beta_C$ ,  $WLM^{-1}$  – основной параметр зависимости «экспозиция – ответ», соответствующий ОА ДПР радона категории  $C$  (менее 4 WL, 4–8 WL, более 8 WL);

$W_C$ ,  $WLM$  – кумулятивная экспозиция ДПР радона, накопленная при ОА ДПР радона категории  $C$  до возраста  $t$ ;

$c_A$ ,  $c_T$ , отн. ед. – коэффициенты модели.

В ходе апробации моделей рассчитывались такие показатели риска как пожизненный атрибутивный риск, пожизненный кумулятивный риск, число смертельных случаев радон-индуцированного РЛ и их доля от общего числа смертельных случаев РЛ, вызванного всеми причинами. Помимо данных о содержании радона в воздухе помещений образовательных учреждений для апробации моделей были использованы среднее (медианное) значение ЭРОА радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий, расположенных на территории Санкт-Петербурга; половозрастное распределение общей численности населения Санкт-Петербурга; половозрастное распределение грубых показателей смертности от РЛ, вызванного всеми причинами, в Санкт-Петербурге; половозрастное распределение вероятностей дожития до определенного возраста; распространенность табакокурения среди населения.

Для решения четвертой задачи исследования необходимо было предварительно получить параметры распределений значений ОА радона в воздухе помещений во всех субъектах РФ. Массив этих параметров являлся итогом решения третьей задачи, заключавшейся в подготовке и статистическом анализе данных о содержании радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий во всех субъектах РФ. С 2001 г. в рамках функционирования ЕСКИД в стране была введена форма государственного (федерального) статистического наблюдения № 4-ДОЗ, с помощью которой была начата работа по сбору

информации об уровнях и дозах природного облучения населения, которая продолжается до настоящего времени. Результаты измерений, проводимых аккредитованными лабораториями радиационного контроля (ЛРК) в субъектах РФ, заносятся ими в лабораторные банки данных, сведения из которых ежегодно передаются в Региональные банки данных доз облучения граждан Российской Федерации за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона (РБДОПИ), операторами которых выступают Центры гигиены и эпидемиологии в субъектах РФ, а далее аккумулируются в ФБДОПИ, который установлен во ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева. Структурная схема системы сбора данных представлена на рис. 1.

За 2001–2017 г. в ФБДОПИ было накоплено 811194 результатов измерений содержания радона в воздухе помещений. На первых двух этапах обработки данных была проведена фильтрация результатов измерений методами верификации и валидации.

Верификация данных заключалась в том, что были отфильтрованы как нерелевантные результаты измерений, проведенные в нежилых технических помещениях. После этапа верификации общее количество результатов в обрабатываемом массиве данных составило 801929, т.е. было отфильтровано 1,14% результатов, признанных нерелевантными.

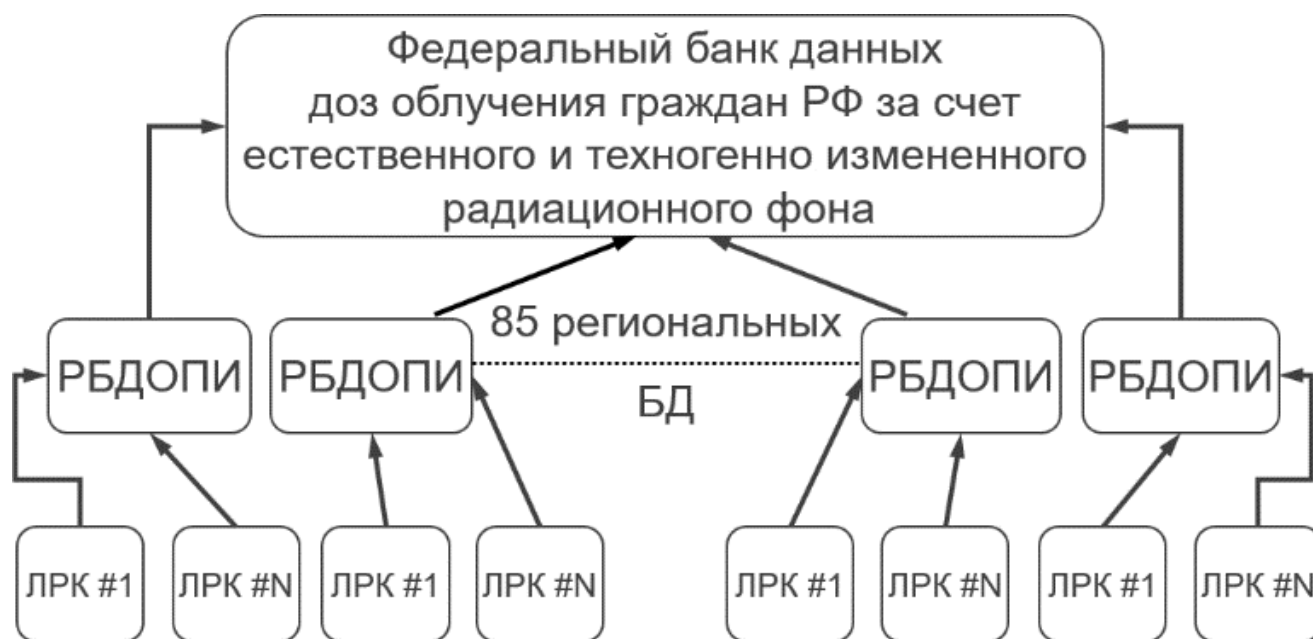


Рисунок 1 – Структурная схема системы сбора данных об уровнях и дозах природного облучения населения

Валидация данных проводилась отдельно по методам измерений (экспрессные, квазиинтегральные, интегральные) и заключалась в том, что были отфильтрованы как недействительные результаты измерений, значения которых находились ниже наименьшего значения минимально измеряемой ОА радона в воздухе с помощью средств измерений соответствующего типа, которые могли применяться в период 2001–2017 гг. для измерений содержания радона в воздухе помещений в субъектах РФ. После этапа валидации общее количество результатов в обрабатываемом массиве данных составило 797363, т.е. было

отфильтровано 0,57% результатов, признанных недействительными. В целом после процедур верификации и валидации было отфильтровано 1,71% от первоначального количества результатов.

Для анализа описанного массива данных был предложен алгоритм, включавший следующие методы статистической обработки данных: 1) построение и визуальный анализ гистограмм частотного распределения (ГЧР) результатов измерений; 2) проверка гипотезы о нормальном характере распределения значений с помощью различных критериев ( $\chi^2$ , W-критерия Шапиро-Уилка, критерия Колмогорова-Смирнова, оценок коэффициентов асимметрии и эксцесса); 3) построение и визуальный анализ Q-Q диаграмм; 4) в ряде случаев – восстановление формы распределения с использованием кумулятивной функции распределения. Для реализации первых двух методов была использована статистическая программа Statgraphics Centurion XVI.И, а Q-Q диаграммы строились «вручную» в табличном процессоре Microsoft Excel. Метод построения и анализа Q-Q диаграмм (диаграмм квантиль-квантиль или нормальных вероятностных графиков) является довольно распространенным в зарубежных научных работах инструментом анализа характера распределения значений ОА радона в воздухе [Daraktchieva, 2014; Gunby, 1993] и рекомендуется к применению МАГАТЭ [IAEA/AQ/33], но в отечественных публикациях ранее не встречался.

В **третьей главе** представлены результаты анализа применимости моделей и показателей риска для конкретных целей оценки риска с использованием российских медико-демографических данных (МДД). На рис. 2–4 представлены результаты расчета ИОР в трех вариантах сценариях облучения: до проведения радонозащитных мероприятий в школе; после проведения радонозащитных мероприятий в школе; в ситуации равномерного пожизненного облучения. Результаты расчета пожизненного атрибутивного риска (ПАР) приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты расчета ПАР по четырем моделям в трех вариантах сценария облучения

Когорта населения	ПАР, %			
	ЕРА-2003	Wismut-2006	FCZ	Tomasek-2014
<i>До проведения радонозащитных мероприятий (вариант №1)</i>				
Все население	8,5	4,7	18,0	4,9
Мужчины	11,6	6,1	22,9	6,2
Женщины	3,9	2,3	9,3	2,6
<i>После проведения радонозащитных мероприятий (вариант №2)</i>				
Все население	8,5	4,7	15,6	4,2
Мужчины	11,6	6,1	19,9	5,4
Женщины	3,9	2,3	8,0	2,2

Когорта населения	ПАР, %			
	EPA-2003	Wismut-2006	FCZ	Tomasek-2014
<i>Ситуация равномерного пожизненного облучения (вариант №3)</i>				
Все население	8,5	4,7	13,9	3,7
Мужчины	11,6	6,1	17,7	4,8
Женщины	3,9	2,3	7,1	1,9

Из графиков на рис. 2 и 3 видно, что при расчетах с использованием моделей «EPA-2003» и «Wismut-2006» разница в экспозиции ДПР радона, получаемой за 17 лет обучения в детских образовательных учреждениях, фактически, не оказывает никакого влияния на величину ИОР. Дополнительно были рассмотрены варианты сценария облучения, в которых ЭРОА радона до проведения радонозащитных мероприятий составляла гипотетические 1000 и 2000 Бк/м<sup>3</sup>, превышающие установленный гигиенический норматив в 5 и 10 раз соответственно. При этом ПАР для всего населения, рассчитанный по модели «EPA-2003», увеличился всего лишь на 0,1 и 0,2% соответственно (при этом ПАР, рассчитанный по модели «Tomasek-2014», увеличился в данном случае на 4,1 и 9,6% соответственно). Причина такого поведения моделей «EPA-2003» и «Wismut-2006», имеющих идентичную математическую структуру и различающихся только значениями коэффициентов, кроется в следующем: больший вес имеют экспозиции, полученные в менее отдаленные от возраста на момент оценки риска сроки. В дальнейшем при расчете ПАР низкие значения общей смертности от РЛ и высокие вероятности дожития на ранних возрастах еще более снижают вклад экспозиций, полученных в молодости, в пожизненную оценку риска.

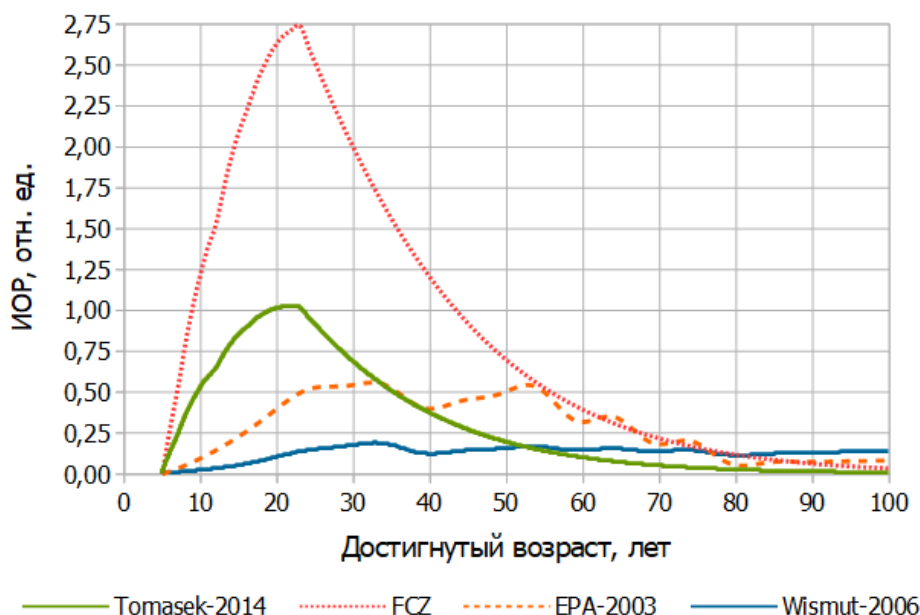


Рисунок 2 – График зависимости ИОР от достигнутого возраста: ситуация до проведения радонозащитных мероприятий (вариант №1 сценария облучения)

По всей видимости, обе эти модели, являющиеся производными от модели «BEIR VI» и разработанные на основе результатов эпидемиологических исследований взрослых шахтеров, работавших продолжительное время при относительно высоких уровнях ЭРОА радона, не подходят для сложных сценариев облучения с относительно низкими уровнями экспозиции ДПР радона, полученными в отдаленный период времени и на ранних этапах жизни. В пользу этого говорит также тот факт, что при расчетах модели использовались только с одним значением коэффициента  $\gamma_z$ , соответствующим минимальному уровню ЭРОА радона (диапазон до 0,5 WL). Все это также касается моделей серии «Радон», которые в данной работе напрямую не тестировались, но математически построены на базе модели «Wismut-2006» [Демин, 2011].

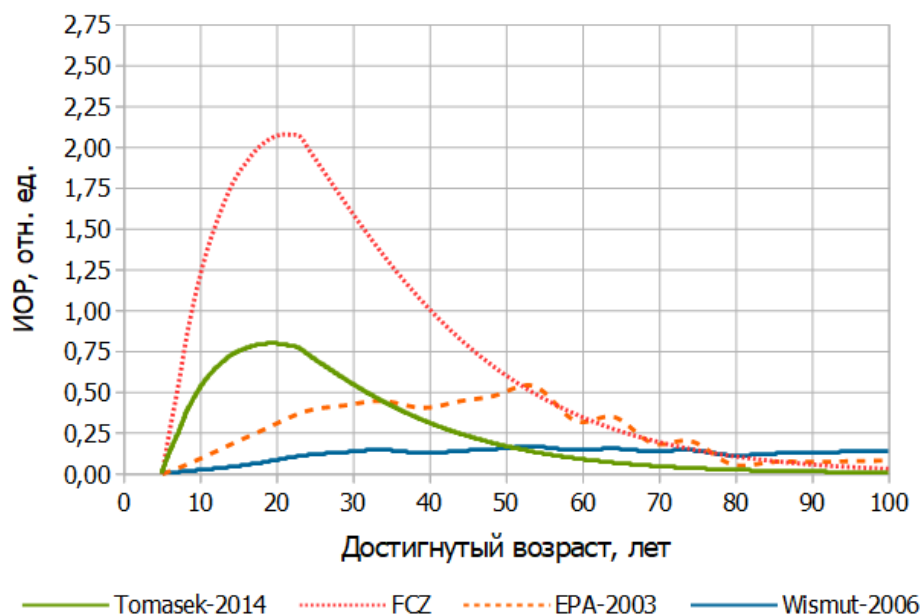


Рисунок 3 – График зависимости ИОР от достигнутого возраста: ситуация после проведения радонозащитных мероприятий (вариант №2 сценария облучения)

Модель «FCZ», также разработанная на основе результатов эпидемиологических исследований шахтеров, но работавших при невысоких уровнях ЭРОА радона, и имеющая кардинально иную математическую структуру и характер зависимости от возраста на момент экспозиции и времени, прошедшего с момента экспозиции, оказалась гораздо более чувствительной к изменению в пределах одного порядка значения ЭРОА радона, при котором формировалась экспозиция в отдаленный период времени. Однако расчеты с использованием этой модели дают самое высокое значение ИОР и ПАР, что, впрочем, согласуется с результатами, полученными другими авторами [Catelinois, 2006].

Модель «Tomasek-2014» обладает чувствительностью к изменению экспозиции радоном и его ДПР в отдаленные периоды времени, приходящиеся на первые два десятка лет жизни человека, характерной для модели «FCZ», но при этом дает не столь консервативный результат. Значение ПАР близко к результату, полученному по модели «Wismut-2006», модифицированные варианты которой предлагалось рядом авторов

[Киселев, 2016; Демин, 2015; Zhukovsky, 2014] использовать в отечественной практике. Фактически, модель «Tomasek-2014» сочетает в себе значения коэффициентов, полученные по наиболее признанному в мире массиву эпидемиологических данных с акцентом на изучение самой младшей возрастной группы – до 15 лет, что отсутствует в других моделях, с преимуществами математической структуры, обеспечивающей более точный учет модифицирующих факторов. По этой причине для задач, где требуется оценить влияние снижения дозовой нагрузки за счет облучения радоном и его ДПР в детском и подростковом возрасте на пожизненный риск смерти от РЛ – а это, например, прогнозирование и оценка результатов радонозащитных мероприятий в детских образовательных учреждениях различного профиля, которые осуществляются в настоящее время преимущественно за счет бюджетных средств, – модель «Tomasek-2014» из всех протестированных современных моделей подходит наиболее оптимально. Данный факт представляется весьма важным аргументом в пользу выбора этой модели, которая может быть использована в методике оценки риска для любой ситуации неравномерного пожизненного облучения радоном и его ДПР.

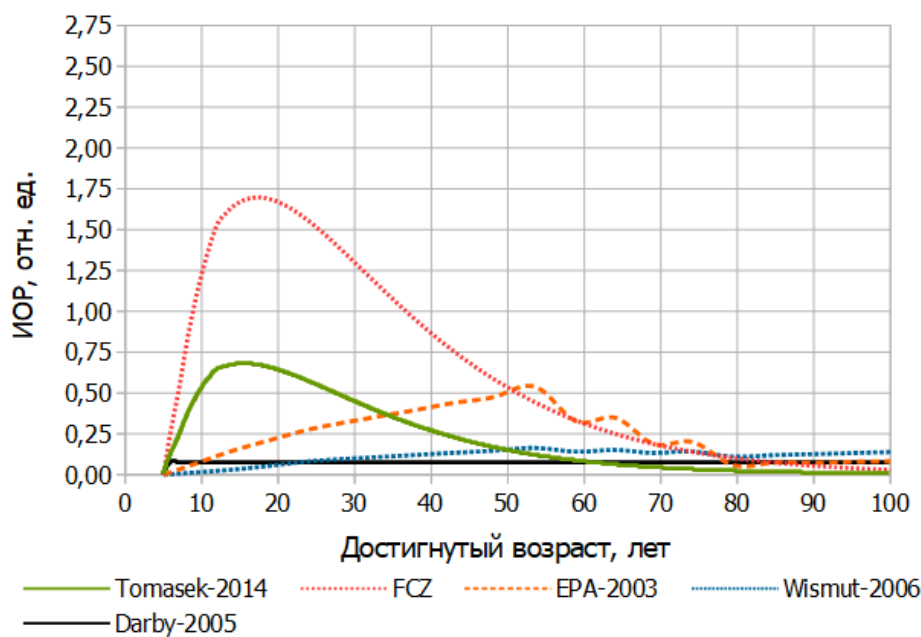


Рисунок 4 – График зависимости ИОР от достигнутого возраста: ситуация равномерного пожизненного облучения (вариант №3 сценария облучения)

В случае рассмотрения ситуации равномерного пожизненного облучения (т.е. при постоянном уровне содержания радона в воздухе помещений на протяжении всей жизни) возможно использование как многофакторной, так и однофакторной моделей. Для проверки сходимости результатов, полученных по моделям обоих типов, был проведен расчет ПАР с использованием однофакторной модели «Darby-2005», которая в настоящее время является, по сути, вершиной эволюции моделей данного типа и построена на результатах всех ключевых европейских эпидемиологических исследований связи облучения людей радоном в жилищах с РЛ методом «случай-контроль», чем и объясняется ее выбор в качестве

рекомендуемой в Публикации 115 МКРЗ [ICRP, 2010]. Результаты расчета ПАР по варианту №3 сценария облучения составили 2,8% для всего населения, 3,4% для мужчин и 1,4% для женщин, т.е. разница с результатами, полученными с использованием модели «Tomasek-2014», составляет менее 30%. Принимая во внимание гораздо более простую процедуру расчета ИОР по однофакторной модели, для задач, в которых данные о содержании радона в воздухе помещений представлены единичным значением среднегодовой ЭРОА радона или значением среднегодовой эффективной дозы облучения за счет изотопов радона, именно однофакторная модель представляется более предпочтительной для использования на практике.

По итогам проведенного тестирования был сделан вывод о том, что имеется ряд обстоятельств, препятствующих использованию ПАР в качестве индивидуального показателя риска в процедуре оценки риска для здоровья населения при облучении радоном и его ДПР. Исходно данный показатель использовался для оценки риска за счет однократного (острого или кратковременного) облучения. Адаптация процедуры расчета данного показателя к ситуации пролонгированного облучения (а в случае облучения населения радоном и его ДПР – пожизненного облучения) приводит к значительным вычислительным трудностям. В частности, требуется использовать половозрастное распределение вероятностей дожития до определенного возраста, которое отсутствует в отечественных МДД и получение которого требует отдельных вычислений на основе других статистических показателей. Принимая во внимание, что целью данного исследования является разработка методики оценки риска для здоровья населения РФ при облучении радоном и его ДПР, которая могла бы широко войти в практику использования органами и организациями Роспотребнадзора и любыми иными заинтересованными организациями и лицами, излишняя сложность процедуры расценивается как однозначно отрицательный фактор. Кроме того, одним из требований к разрабатываемой методике являлось обеспечение возможности сравнения риска смерти от радон-индуцированного РЛ с рисками смерти от других ЗНО. В итоге по совокупности причин было принято решение отказаться от ПАР и перейти к другому показателю – пожизненному кумулятивному риску (ПКР), являющемуся стандартным количественным показателем риска в онкологии [МР МНИОИ им. П.А. Герцена, 2014; Darby, 2006].

В качестве популяционного показателя риска при апробации моделей было использовано число смертельных случаев радон-индуцированного РЛ. Данный показатель является одним из наиболее интуитивно-понятных (данном фактом нельзя пренебрегать, поскольку адресатами результатов оценки риска являются, как правило, не специалисты по радиационной безопасности или гигиене, а органы исполнительной власти различных уровней, принимающие решения о выделении средств на те или иные радонозащитные мероприятия) и применяется как в онкологии [Петрова, 2015], так и при оценке рисков за счет облучения радоном и его ДПР в разных странах [EPA, 2003; Catelinois, 2006; Ajrouche,



2018] в течение как минимум последних 10–20 лет. Абсолютное значение показателя удобно для использования при характеристике ситуации на конкретном уровне административно-территориального деления, а относительное (в виде доли смертельных случаев радон-индуцированного РЛ от общего числа смертельных случаев РЛ, вызванного всеми причинами) – для использования при сравнительном анализе ситуации в нескольких административно-территориальных единицах или при межстрановом сравнении.

В **четвертой главе** представлены результаты разработки методики оценки риска для здоровья населения при облучении радоном. При разработке процедур оценки риска требовалось учесть ряд обстоятельств:

- 1) существовала специальная задача комплексной сравнительной оценки воздействия радиационных факторов на население РФ, осуществляемой при анализе основных показателей радиационной безопасности, содержащихся в радиационно-гигиенических паспортах территорий (РГПТ), в рамках которой необходимо сравнивать между собой средние индивидуальные пожизненные риски от различных ИИИ в течение одного календарного года. Рассмотренные в главе 3 модели (как однофакторные, так и многофакторные) для решения этой задачи не подходят;
- 2) избыточная сложность методики могла препятствовать ее широкому внедрению в практику использования органами и организациями Роспотребнадзора или, как минимум, затруднить этот процесс.

Исходя из первого обстоятельства, был предложен упрощенный подход, основанный на расчете индивидуального пожизненного риска смерти (ПРС) от радон-индуцированного РЛ с использованием номинального коэффициента риска, рекомендованного в Публикации 126 МКРЗ [ICRP, 2014]. Предложенный метод расчета вошел в методические рекомендации «Расчет показателей радиационного риска по данным, содержащимся в радиационно-гигиенических паспортах территорий для обеспечения комплексной сравнительной оценки состояния радиационной безопасности населения субъектов Российской Федерации», которые были утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 23.04.2019 г. (МР 2.6.1.0145-19).

Для учета второго обстоятельства, т.е. для того, чтобы дополнительно не усложнять процедуру расчета количественных показателей риска, было предложено реализовать в методике дифференцированный подход к оценке риска. Суть дифференцированного подхода состоит в том, что для разных ситуаций облучения и разных наборов данных о содержании радона в воздухе помещений используются две разные модели для расчета ИОР. В случае, когда данные представлены единичным значением среднегодовой ЭРОА радона в воздухе помещений или даже значением среднегодовой эффективной дозы облучения за счет изотопов радона, рассматривается ситуация равномерного пожизненного облучения (т.е. постоянство уровня содержания радона в воздухе помещений на протяжении всей жизни, продолжительность которой принимается равной ожидаемой

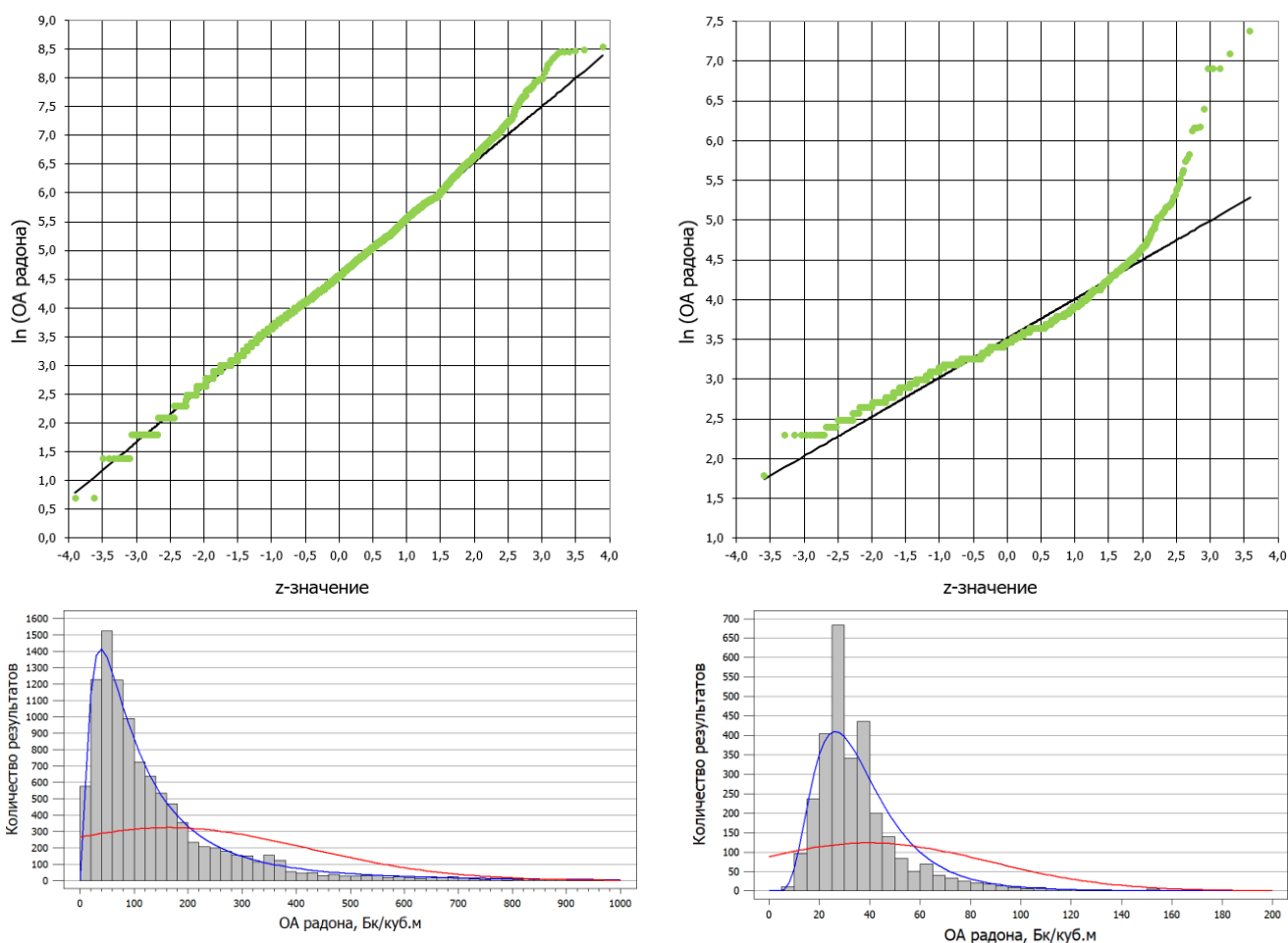
продолжительности жизни на момент оценки риска). В этом случае используется однофакторная модель, в которой ИОР зависит только от уровня ЭРОА радона и не зависит от каких бы то ни было временных параметров. В случае, когда в наличии имеются массивы результатов измерений ЭРОА или ОА радона и есть возможность разработать сценарий облучения, рассматривается ситуация неравномерного пожизненного облучения. В этом случае используется многофакторная модель, в которой ИОР зависит не только от накопленных в разных возрастах экспозиций ДПР радона, но и целого ряда временных параметров (достигнутого возраста, возраста на момент облучения, времени, прошедшего с момента облучения). Предложенная методика расчета была реализована в виде методических рекомендаций «Оценка радиационного риска для здоровья населения за счет внутреннего облучения радоном и его дочерними продуктами распада», которые были утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 10.04.2020 г. (МР 2.6.1.0172-20).

Методика позволяет рассчитать ПКР в качестве индивидуального показателя риска и абсолютное число смертельных случаев радон-индуцированного РЛ в качестве популяционного показателя риска. Кроме того, в схему расчета популяционного показателя добавлена возможность учета распределения населения между категориями курильщиков и некурящих, что является крайне важным по причине синергического взаимодействия факторов облучения радоном и табакокурения. В процедуре оценки риска, в зависимости от рассчитываемого количественного показателя, используются следующие измерительные и медико-демографические данные: ЭРОА или ОА радона в воздухе помещений; численность населения; ожидаемая продолжительность жизни; абсолютное число смертельных случаев РЛ, вызванного всеми причинами; распространенность табакокурения среди населения.

**Пятая глава** посвящена анализу распределений значений ОА радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий в субъектах РФ. После первичной фильтрации с помощью процедур верификации и валидации всего массива результатов измерений содержания радона в воздухе помещений, накопленного в ФБДОПИ с 2001 по 2017 гг., был проведен комплексный статистический анализ массива данных с применением предложенного алгоритма.

Визуальный анализ Q-Q диаграмм [Cinelli, 2015] позволил условно разделить субъекты РФ на четыре группы: с практически идеальным совпадением распределения значений ОА радона с логнормальным (19 субъектов РФ); с хорошим совпадением распределения с логнормальным (15 субъектов РФ); с визуально недостаточным совпадением распределения с логнормальным (4 субъекта РФ); с присутствующим на Q-Q диаграмме одним или двумя плато, искажающими логнормальное распределение (40 субъектов РФ). На рис. 5 представлены примеры Q-Q диаграмм и ГЧР, характерных для субъектов РФ из первой (рис. 5, а) и второй групп (рис. 5, б). В четырех субъектах РФ из третьей группы (Кабардино-Балкарская Республика, Республика Марий Эл, Архангельская и Магаданская области),

несмотря на визуально недостаточное совпадение с логнормальным, распределения значений ОА радона не являлись нормальными с вероятностью 95% и наиболее вероятно являлись логнормальными, поэтому для них были рассчитаны те же самые характеристики, что и для остальных субъектов РФ.



а) Республика Алтай

б) Нижегородская область

Рисунок 5 – Примеры Q-Q диаграмм (сверху) и ГЧР (снизу) результатов измерений ОА радона в субъектах РФ, отнесенных к а) первой и б) второй группам

Одно или два промежуточных плато, которые присутствовали на Q-Q диаграммах в 40 субъектах РФ, представляли собой значительное количество идентичных результатов измерений, причины появления которых детально проанализированы в работе. Поскольку одной из подзадач работы являлась проверка соответствия распределений значений ОА радона логнормальному закону, а «ошибочные» плато значительно искажали Q-Q диаграмму, возникла необходимость устранить плато, не затрагивая при этом остальные результаты, и восстановить таким образом форму распределений. Для этого был предложен и применен следующий метод: количество значений, которое ожидается в конкретной выборке на уровнях устраняемых плато, рассчитывается с использованием кумулятивной функции распределения с параметрами, полученными по исходному массиву данных. После применения данного метода к массивам данных во всех 40 субъектах РФ из четвертой

группы на Q-Q диаграммах отмечено хорошее или практически идеальное совпадение распределения значений ОА радона с логнормальным, что показано на рис. 6.

Для всех 78 проанализированных субъектов РФ гипотеза о нормальном характере распределения значений ОА радона не подтверждалась с вероятностью 95% результатами расчетов критерия  $\chi^2$ , W-критерия Шапиро-Уилка, оценки коэффициентов асимметрии и эксцесса (во всех случаях  $p < 0,05$ ). Анализ Q-Q диаграмм также позволил графически оценить уровень, до которого ОА радона точно следует логнормальному закону, а выше которого начинают наблюдаться отклонения. Медианное значение этого уровня составило 148 Бк/м<sup>3</sup> при диапазоне 55–4915 Бк/м<sup>3</sup>, а максимальное значение порогового уровня в 4915 Бк/м<sup>3</sup> получено в Забайкальском крае.

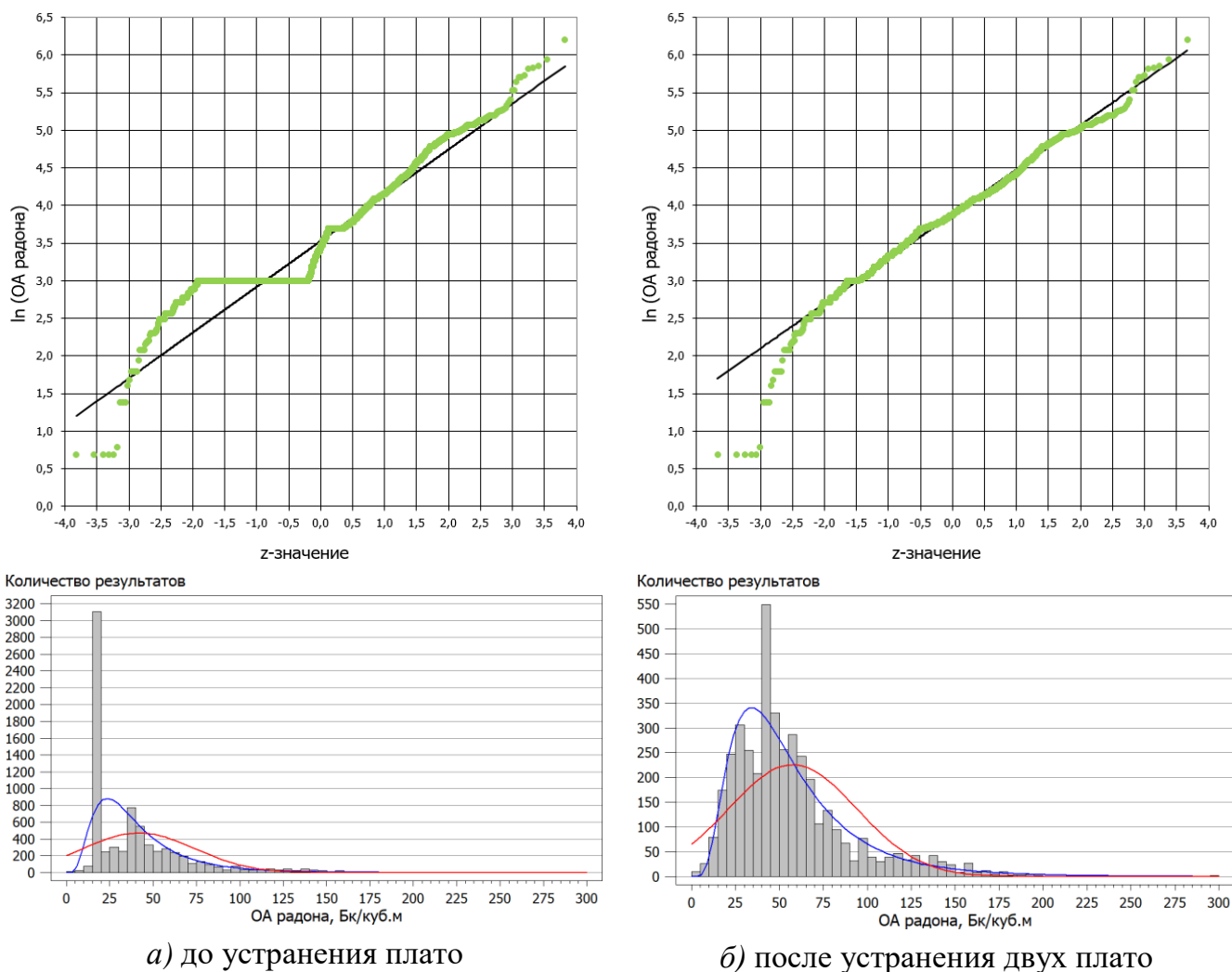


Рисунок 6 – Q-Q диаграммы (сверху) и ГЧР (снизу) результатов измерений ОА радона в Пермском крае до и после устранения двух плато

Для 78 субъектов РФ были получены характеристики логнормального распределения в соответствии с рекомендациями Международной комиссии по радиологическим единицам и измерениям (МКРЕ): медиана с 95% доверительным интервалом, геометрическое стандартное отклонение и, для сравнения, среднее арифметическое. За период 2001–2017 гг. ни разу не представили в ФБДОПИ базы данных с результатами измерений только 5

субъектов РФ: Республика Ингушетия, Чеченская Республика, Ульяновская область, Республика Крым и Севастополь. Однако, за исключением Республики Ингушетия, из остальных 4 субъектов РФ периодически поступали печатные формы № 4-ДОЗ. Ввиду отсутствия каких-либо прямых измерительных данных, в дальнейшем расчете показателей риска для Республики Ингушетия использовалось среднее значение между ОА радона в воздухе жилых и общественных зданий в соседних субъектах РФ (Республике Северная Осетия – Алания и Чеченской Республике). Для двух субъектов РФ (Астраханская область и Ненецкий АО) статистический анализ данных провести было невозможно ввиду того, что результаты всех измерений ОА радона (2473 в Астраханской области и 13 в Ненецком АО) были абсолютно идентичны и равны 20 Бк/м<sup>3</sup>. Для Астраханской области сведения, переданные через базу данных и печатную форму № 4-ДОЗ, отличались между собой. По этой причине при расчете показателей риска для этого региона использовались оба средних значения. Средневзвешенное по численности населения субъектов РФ значение медианы ОА радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий в РФ в целом составило 41,4 Бк/м<sup>3</sup>, значение среднего арифметического – 53,2 Бк/м<sup>3</sup>.

В **шестой главе** продемонстрировано использование на практике разработанной методики, и проведен расчет показателей риска для здоровья населения всех субъектов РФ при облучении радоном на основе полученных в пятой главе результатов анализа данных о содержании радона в воздухе помещений. Расчетное значение абсолютного числа смертельных случаев радон-индуцированного РЛ среди всего населения РФ сопоставимо с реальными значениями данного показателя для рака двух локализаций и превышает их для рака шести локализаций [МНИОИ им. П.А. Герцена, 2018], перечисленных в табл. 2.

Таблица 2 – Сравнение абсолютного числа смертельных случаев радон-индуцированного РЛ и ЗНО других локализаций среди всего населения (2017 г.)

Локализация ЗНО	Код МКБ-10	Абсолютное число смертельных случаев
<b>Радон-индуцированный РЛ (расчетное значение)</b>	—	<b>2692–3066</b>
Мезотелиальные и мягкие ткани	C45-49	3254
Множественные миеломные и плазмоклеточные новообразования	C90	2587
Другие органы дыхания и грудной клетки	C30, 31, 37-39	1680
Кожа кроме меланомы	C44	1545
Щитовидная железа	C73	1139
Кости и суставные хрящи	C40, 41	1026
Болезнь Ходжкина	C81	807
Другие мочевые органы	C65, 66, 68	588

Что касается ПКР смерти от радон-индуцированного РЛ, то полученные для когорты курильщиков из всего населения РФ расчетные значения сопоставимы с ПКР смерти от такого ЗНО как рак губы, полости рта, глотки и превышают ПКР смерти от рака пяти других локализаций [МНИОИ им. П.А. Герцена, 2018], перечисленных в табл. 3.

Для иллюстрации возможности сравнения показателей риска, рассчитываемых по методике, с показателями риска при облучении другими ИИИ был проведен расчет среднего индивидуального ПРС за счет облучения во время медицинских процедур [МР 2.6.1.0145-19] и среднего индивидуального ПРС от РЛ, вызванного облучением радоном и его ДПР, в течение одного календарного года. В качестве исходных данных для расчета были использованы средние годовые дозы медицинского облучения населения субъектов РФ в расчете на одного жителя в 2017 г. [Барковский, 2018]. Результаты расчета представлены в табл. 4.

Таблица 3 – Сравнение ПКР смерти от радон-индуцированного РЛ и ЗНО других локализаций среди всего населения (2017 г.)

Локализация ЗНО	Код МКБ-10	ПКР смерти, %
<b>Радон-индуцированный РЛ, курильщики</b> (расчетное значение)	—	<b>0,44–0,45</b>
Губа, полость рта, глотка	C00-14	0,49
Пищевод	C15	0,34
Тонкий кишечник	C17	0,05
Гортань	C32	0,22
Кости и суставные хрящи	C40, 41	0,05
Кожа	C43, 44	0,21

Таблица 4 – Сравнение средних индивидуальных ПРС при воздействии различных ИИИ на население РФ (2017 г.)

Источник риска для здоровья населения	Средний индивидуальный ПРС
Облучение за счет медицинских процедур	$2,38 \cdot 10^{-5}$
Облучение радоном и его ДПР	$2,47 \cdot 10^{-4}$

Как видно из табл. 4, годовой риск для населения РФ при облучении радоном и его ДПР на порядок превышает таковой при облучении во время медицинских процедур. В соответствии с международной шкалой риска, данный уровень считается приемлемым для персонала, но неприемлемым для населения в целом. Этот результат подтверждает важность задачи снижения уровня облучения населения субъектов РФ радоном и обоснованность ее включения в Основы государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации.

## ВЫВОДЫ

1. Разработанная методика позволяет провести расчет показателей риска для здоровья населения при облучении радоном и его ДПР вне зависимости от формы представления входных данных о содержании радона в воздухе помещений и сценария облучения. Это дает возможность использовать методику для широкого спектра задач оценки риска, от характеристики ситуации со смертностью от радон-индуцированного РЛ на различных уровнях административно-территориального деления до прогноза и оценки результатов осуществления радонозащитных мероприятий в отдельных зданиях.

2. Две модели расчета риска (однофакторная «Darby-2005» и многофакторная «Tomasek-2014»), на которых основана разработанная методика, показывают хорошую сходимость результатов в сценарии равномерного пожизненного облучения (расхождение составляет менее 30%), а модель «Tomasek-2014» обладает лучшей среди четырех протестированных современных многофакторных моделей чувствительностью к изменению экспозиции радоном и его ДПР в отдаленные периоды времени, в т.ч. в ранние годы жизни человека.

3. Показатели риска, которые рассчитываются с использованием разработанной методики, обеспечивают возможность сопоставления полученных результатов с результатами оценки риска от других ИИИ и факторов неионизирующей природы, а также с рисками смерти от других ЗНО. При этом расчет показателей риска по однофакторной модели дает в целом более высокий результат по сравнению с расчетом по многофакторной модели, и этот результат может считаться консервативной оценкой показателей риска.

4. В результате комплексного статистического анализа данных установлено, что в 74 из рассмотренных 78 субъектов РФ распределения значений ОА радона, в целом, следуют логнормальному закону. Еще в 4 субъектах РФ эти распределения с вероятностью 95% не являются нормальными. Для всех 78 проанализированных субъектов РФ рассчитаны параметры и характеристики распределений (медиана с 95% доверительным интервалом, геометрическое стандартное отклонение и среднее арифметическое). Для оставшихся 7 субъектов РФ, не представлявших в указанный период исходные измерительные данные, получены средние арифметические значения ОА радона на основе среднегодовых значений, представленных в печатных формах № 4-ДОЗ. Результаты анализа подтверждают, что использование для расчета доз внутреннего облучения населения радоном и его ДПР средних арифметических значений вместо медиан является некорректным и приводит к завышению доз в среднем в 1,3 раза, а в ряде случаев – в 2,1 раза.

5. Расчеты по разработанной методике с использованием результатов проведенного анализа данных показывают, что в 2017 г. в Российской Федерации 2696–3066 смертельных случаев РЛ среди всего населения (в т.ч. 2240–2499 случаев среди мужчин и 456–567 случаев среди женщин) могли являться смертельными случаями радон-индуцированного РЛ, что составляет 5,4–6,1% смертельных случаев РЛ среди всего населения, 5,5–6,2% среди

мужчин и 4,8–5,9% среди женщин. При этом максимальные значения данного показателя риска в отдельных субъектах РФ могли достигать 12,6–14,9% среди всего населения, 13,1–15,2% среди мужчин и 12,5–14,0% среди женщин. Полученные расчетные значения сопоставимы или превышают реальные значения данного показателя для рака восьми других локализаций.

б. Расчеты показывают, что в 2017 г. в Российской Федерации среди всего населения средний ПКР смерти от радон-индуцированного РЛ для курильщиков составлял 0,44–0,45%, среди мужчин – 0,38–0,43%, среди женщин – 0,27–0,31%. При этом максимальные значения данного показателя риска в отдельных субъектах РФ достигали 1,20–1,22% среди всего населения, 1,00–1,08% среди мужчин и 0,95–1,08% среди женщин. Полученные расчетные значения сопоставимы или превышают реальные значения ПКР смерти от рака шести других локализаций.

До начала выполнения данного исследования радон и его ДПР оставался единственным значительным дозообразующим источником облучения населения, для которого отсутствовала утвержденная на федеральном уровне методика оценки риска для здоровья населения РФ. В результате выполнения работы была научно обоснована и предложена к внедрению в отечественную практику методика оценки риска для здоровья населения при облучении радоном и его ДПР. Практическим итогом выполнения данного исследования стало дополнение системы государственного санитарно-эпидемиологического нормирования необходимыми методическими рекомендациями.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Статьи в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК**

1. Кононенко, Д.В. Проблема оценки радиационных рисков населения Российской Федерации при облучении радоном / Д.В. Кононенко, Т.А. Кормановская // Радиационная гигиена. – 2012. – Т. 5, № 1. – С. 60–62.
2. Кононенко, Д.В. Оценка радиационного риска для населения Санкт-Петербурга при облучении радоном / Д.В. Кононенко // Радиационная гигиена. – 2013. – Т. 6, № 1. – С. 31–37.
3. Кононенко, Д.В. Влияние радонозащитных мероприятий в детских образовательных учреждениях на радиационный риск при облучении радоном (на примере одной из школ Санкт-Петербурга) / Д.В. Кононенко, Т.А. Кормановская // Анализ риска здоровью. – 2014. – № 2. – С. 90–96.
4. Кононенко, Д.В. Анализ применимости существующих моделей расчета риска при облучении радоном для оценки эффективности радонозащитных мероприятий в детских образовательных учреждениях / Д.В. Кононенко // Радиационная гигиена. – 2014. – Т. 7, № 4. – С. 92–98.



5. Kononenko D.V. Analysis of the applicability of some risk assessment models associated with exposure to radon for evaluation of effectiveness of radon mitigation actions in schools // Радиационная гигиена. – 2014. – Т. 7, № 4. – С. 98–103.
6. Кононенко, Д.В. Оценка риска при облучении радоном для населения субъектов Российской Федерации на основе данных радиационно-гигиенического паспорта территории / Д.В. Кононенко, Т.А. Кормановская // Радиационная гигиена. – 2015. – Т. 8, № 4. – С. 15–22.
7. Кононенко, Д.В. Дифференцированный подход к оценке риска для здоровья населения при облучении радоном / Д.В. Кононенко // Радиационная гигиена. – 2017. – Т. 10, № 1. – С. 76–83.
8. Кононенко, Д.В. Анализ распределений значений объемной активности радона в воздухе помещений в субъектах Российской Федерации / Д.В. Кононенко // Радиационная гигиена. – 2019. – Т. 12, № 1. – С. 85–103.
9. Романович, И.К. К обоснованию изменений в нормировании содержания радона в воздухе помещений / И.К. Романович, Т.А. Кормановская, Д.В. Кононенко // Здоровье населения и среда обитания. – 2019. – № 6 (315). – С. 42–48.

#### **Статьи в других научных журналах, тезисы докладов, информационные сборники**

1. Кормановская, Т.А. Учет фактора курения в моделях оценки радиационных рисков населения при облучении радоном / Т.А. Кормановская, Д.В. Кононенко // Материалы XI всероссийского съезда гигиенистов и санитарных врачей. Том II. – М., 2012. – С. 473–476.
2. Стамат, И.П. Дальнейшее совершенствование подсистемы ЕСКИД на базе отчетной формы № 4-ДОЗ / И.П. Стамат, Т.А. Кормановская, А.В. Световидов, Д.В. Кононенко // Сб. тезисов международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы радиационной гигиены», Санкт-Петербург, 1-3 октября 2012 г. – СПб., 2012. – С. 135–138.
3. Кононенко, Д.В. Особенности оценки радиационного риска при облучении радоном в детском и подростковом возрасте / Д.В. Кононенко, Т.А. Кормановская // Сб. тезисов международной научно-практической конференции, посвященной 85-летию со дня рождения П.В. Рамзаева «Актуальные вопросы радиационной гигиены», Санкт-Петербург, 1-3 октября 2014 г. – СПб., 2014. – С. 122–125.
4. Репин, В.С. Дозы облучения населения Российской Федерации по итогам функционирования ЕСКИД в 2002–2015 гг.: информационный сборник / В.С. Репин, Н.К. Барышков, А.А. Братилова, К.В. Варфоломеева, Ю.Н. Гончарова, Д.В. Кононенко, Т.А. Кормановская, Л.В. Репин, И.К. Романович, А.В. Световидов, И.П. Стамат, С.И. Кувшинников, О.Е. Тутельян, В.С. Степанов, С.В. Матюхин. – СПб.: НИИРГ, 2015. – 40 с. – 350 экз.

5. Кононенко, Д.В. О внедрении методики оценки риска здоровью населения при облучении радоном / Д.В. Кононенко // Материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и специалистов Роспотребнадзора «Современные проблемы эпидемиологии и гигиены», Москва, 1-3 ноября 2016 г. / под ред. д-ра мед. наук, проф. А.Ю. Поповой. – М.: Грифон, 2016. – С. 108–109. – ISBN 978-5-98862-314-4.
6. Кононенко, Д.В. Модель оценки радиационного риска при облучении радоном «Tomasek-2014»: первый опыт использования / Д.В. Кононенко, Т.А. Кормановская // Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Профилактическая медицина – 2016», Санкт-Петербург, 15-16 ноября 2016 г. – СПб.: Изд-во СЗГМУ им. И.И. Мечникова, 2016. – Ч. 1. – С. 285–288.
7. Кононенко, Д.В. Краткий обзор процедуры и результатов анализа распределений значений объемной активности радона в воздухе помещений в субъектах Российской Федерации / Д.В. Кононенко // Материалы X Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и специалистов Роспотребнадзора «Современные проблемы эпидемиологии, микробиологии и гигиены», Москва, 24-26 октября 2018 г. / под ред. д-ра мед. наук, проф. А.Ю. Поповой и акад. РАН В.Н. Ракитского. – М.: Русский Печатный Двор, 2018. – С. 374–378. – ISBN 978-5-6040817-5-4.
8. Кононенко, Д.В. Типичные ошибки операторов при внесении результатов измерений содержания радона в воздухе помещений в банк данных лабораторий радиационного контроля «ФФ-4» / Д.В. Кононенко, Т.А. Кормановская // Материалы международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы радиационной гигиены», Санкт-Петербург, 23-24 октября 2018 г. – СПб., 2018. – С. 176–178.
9. Кононенко, Д.В. Оценка риска для здоровья населения субъектов Российской Федерации при равномерном пожизненном облучении радоном / Д.В. Кононенко, Т.А. Кормановская // Медико-биологические проблемы жизнедеятельности. – 2019. – № 1(21). – С. 56–61.

### **Монографии**

1. Романович, И.К. Природные источники ионизирующего излучения: дозы облучения, радиационные риски, профилактические мероприятия / ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева ; Романович И.К., Стамат И.П., Кормановская Т.А., Кононенко Д.В. [и др.] ; под ред. акад. РАН Г.Г. Онищенко и проф. А.Ю. Поповой. – СПб.: ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, 2018. – 432 с. – 500 экз. – ISBN 978-5-9906975-7-7.

### **Отчеты о НИР**

1. Обоснование дифференцированного подхода к оценке риска для здоровья населения при облучении радоном : отчет о НИР / ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева ; науч. рук. Д.В. Кононенко ; исполн. К.А. Сапрыкин [и др.]. – СПб., 2018. – 44 с. – Рег. № АААА-Б19-219031590128-9.

### **Нормативно-методические документы**

1. Расчет показателей радиационного риска по данным, содержащимся в радиационно-гигиенических паспортах территорий для обеспечения комплексной сравнительной оценки состояния радиационной безопасности населения субъектов Российской Федерации: Методические рекомендации МР 2.6.1.0145-19. Утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 23.04.2019 г. / Л.В. Репин, Р.Р. Ахматдинов, А.М. Библин, В.Ю. Голиков, Д.В. Кононенко, Т.А. Кормановская, В.С. Репин. – М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2019. – 14 с.
2. Оценка радиационного риска для здоровья населения за счет внутреннего облучения радоном и его дочерними продуктами распада: Методические рекомендации МР 2.6.1.0172-20. Утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 10.04.2020 г. / Д.В. Кононенко, Т.А. Кормановская, К.А. Сапрыкин, Т.А. Балабина, Е.С. Кокоулина, Н.А. Королева, И.Г. Матвеева, Г.А. Горский. – М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2020.