

Анализ распределений значений объемной активности радона в воздухе помещений в субъектах Российской Федерации

Д.В. Кононенко

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

За 2001–2017 гг. в Федеральном банке данных доз облучения граждан Российской Федерации за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона был накоплен массив результатов измерений содержания радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий в 78 субъектах Российской Федерации объемом более 800 тыс. записей. В статье описана процедура и приведены результаты впервые проведенного комплексного анализа этих данных, целью которого была проверка соответствия распределений объемной активности радона логнормальному закону и расчет параметров этих распределений. Был применен целый ряд методов анализа данных, таких как верификация и валидация, построение гистограмм частотного распределения и Q-Q диаграмм, а также некоторые методы восстановления формы распределения. В 74 из 78 субъектов Российской Федерации распределения значений объемной активности радона следуют логнормальному закону до уровней от 55 до 4915 Бк/м³. Для всех 78 субъектов Российской Федерации были рассчитаны среднее геометрическое с 95% доверительным интервалом, геометрическое стандартное отклонение и среднее арифметическое. Результаты исследования показывают, что использование при расчете доз внутреннего облучения населения радоном средних арифметических значений является некорректным и приводит к завышению доз в среднем в 1,3 раза, а в ряде случаев – в 2,1 раза. Полученные медианные значения могут быть использованы для расчета различных показателей риска для здоровья населения субъектов Российской Федерации при облучении радоном.

Ключевые слова: радон, объемная активность, верификация, валидация, анализ данных, логнормальное распределение, параметры распределения, Q-Q диаграмма, восстановление формы распределения, федеральный банк данных.

Введение

В 2001 г. в рамках становления и развития единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан (ЕСКИД) в стране была введена форма государственного (федерального) статистическо-

го наблюдения № 4-ДОЗ, с помощью которой была начата работа по сбору информации об уровнях и дозах природного облучения населения, которая продолжается до настоящего времени^{1,2,3}. Результаты измерений, проводимых аккредитованными лабораториями в субъектах РФ,

¹ Форма государственного статистического наблюдения № 4-ДОЗ: Методические рекомендации (Инструкция по заполнению формы № 4-ДОЗ). М.: Минздрав России, 2002. 15 с.

[State statistical form No 4-DOZ: Guidelines (Instructions for completing the form No 4-DOZ). Moscow, Ministry of Health of Russia; 2002. 15 p. (In Russian)]

² Форма федерального государственного статистического наблюдения № 4-ДОЗ. Сведения о дозах облучения населения за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона: Методические рекомендации. Утверждены 19.04.2007 г.

№ 0100/4027-07-34. 30 с.

[Federal state statistical form No 4-DOZ. Data on doses of public exposure to natural and technologically enhanced radiation background: Guidelines (approved 19.04.2007, No 0100/4027-07-34). 30 p. (In Russian)]

³ 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.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2014. 39 с.

[Federal statistical form No 4-DOZ. Data on doses of public exposure to natural and technologically enhanced radiation background: Guidelines MR 2.6.1.0088-14. Moscow, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being; 2014. 39 p. (In Russian)]

Кононенко Дмитрий Викторович

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева.

Адрес для переписки: 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: d.kononenko@niirg.ru

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 Федеральном банке данных доз облучения граждан Российской Федерации за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона (ФБДОПИ), который установлен во ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева.

В обобщенном виде результаты, содержащиеся в ФБДОПИ, используются при подготовке ежегодного информационного сборника «Дозы облучения населения Российской Федерации» (например, [1]). В качестве оценок средних значений параметров радиационной обстановки, в частности содержания радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий (далее по тексту – содержание радона в воздухе), используются средние арифметические значения, полученные по всему накопленному массиву данных. Какие-либо процедуры верификации или валидации данных при этом не предусмотрены. Все это может приводить к искажению оценок средних значений параметров радиационной обстановки.

В настоящее время одной из актуальнейших задач 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.⁴ и в дальнейшем не раз актуализировалась^{5,6,7}. Принимая во внимание тот факт, что облучение человека радоном является пожизненным, становится очевидно, что при расчете показателей риска для здоровья населения при облучении радоном нельзя опираться на искаженные оценки средних значений содержания радона в воздухе в субъектах РФ, т.к. это может приводить к ошибкам в оценке таких чувствительных в социально-экономическом плане показателей, как количество случаев смерти от радон-индуцированного рака легкого [2] или количество по-

терянных лет жизни вследствие преждевременной смерти от радон-индуцированного рака легкого.

Цель исследования – проанализировать характер и получить параметры распределений значений ОА радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий в субъектах РФ на основе данных, содержащихся в ФБДОПИ.

Задачи исследования включали фильтрацию всего массива результатов измерений содержания радона в воздухе, накопленного в ФБДОПИ с 2001 по 2017 г., с помощью процедур верификации и валидации, а также дальнейшую статистическую обработку данных с применением различных методов.

Под *валидацией* в дальнейшем понимается процедура фильтрации результатов измерений содержания радона в воздухе помещений путем сопоставления с метрологическими характеристиками средств измерений (СИ), а под *верификацией* – процедура фильтрации результатов путем оценки релевантности дополнительных характеристик результатов измерений (в нашем случае – места проведения измерения) задаче получения наиболее корректного среднего значения ОА радона в воздухе помещений, при пребывании в которых происходит внутреннее облучение населения за счет ингаляционного поступления радона и дочерних продуктов его распада (ДПР).

Материалы и методы

Материалы

В таблицах баз данных (БД) РБДОПИ и ФБДОПИ, хранящих результаты измерений в помещениях, есть 6 столбцов с информацией о содержании изотопов радона в воздухе помещений: мгновенные измерения ОА радона; мгновенные измерения эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) радона; мгновенные измерения ЭРОА торона; квазиинтегральные измерения ОА радона; интегральные измерения ОА радона; среднегодовое значение ЭРОА изотопов радона (расчетное нормируемое

⁴ Постановление Главного Государственного санитарного врача РФ от 10 ноября 1997 г. № 25 и Главного Государственного инспектора по охране природы от 10 ноября 1997 г. № 03-19/24-3483 «Об использовании методологии оценки риска для управления качеством окружающей среды и здоровья населения в Российской Федерации». [Resolution of the Chief State Sanitary Inspector of the Russian Federation No. 25 of November 10, 1997 and the Chief State Inspector of Nature Protection No. 03-19/24-3483 of November 10, 1997 “On the use of risk assessment methodology for environmental quality management and public health management in the Russian Federation”. (In Russian)]

⁵ Решение 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». [Decision of the Board of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being of February 5, 2010 “On the implementation of a methodology for assessing the risk to public health and the task to improve it”. (In Russian)]

⁶ 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 оценки риска для здоровья населения и задачи по ее совершенствованию». [Order of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being No. 57 of February 18, 2010 “On the implementation of the decision of the Board of Rosпотребнадзор of February 5, 2010 “On the implementation of a methodology for assessing the risk to public health and the task to improve it”. (In Russian)]

⁷ Приказ Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека от 10 марта 2010 г. № 86 «О создании межведомственной рабочей группы по гармонизации гигиенических нормативов». [Order of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being No. 86 of March 10, 2010 “On the creation of an interdepartmental working group on the harmonization of hygienic standards”. (In Russian)]

значение ЭРОА_{Рн} + 4,6·ЭРОА_{Тп}). На этапе импорта данных были удалены столбцы с результатами мгновенных измерений ЭРОА торона (пренебрежимо малое влияние торона при расчете рисков не учитывается) и среднегодовыми значениями ЭРОА изотопов радона (являются расчетными значениями). Исходя из того, что 3 из 4 оставшихся столбцов несут информацию об ОА радона, результаты мгновенных измерений ЭРОА радона были пересчитаны в ОА с использованием коэффициента радиоактивного равновесия F между радоном и его ДПР, равным 0,5⁸. Таким образом, после импорта данных первоначальное количество записей в обрабатываемом массиве данных составило 811 194.

Верификация данных заключалась в том, что были отфильтрованы как нерелевантные результаты измерений, проведенные в нежилых технических помещениях, содержание радона в которых не может оказывать влияния на дозу внутреннего облучения населения (либо это влияние пренебрежимо мало) и показатели риска для здоровья. Занесение результатов измерений в таких помещениях в БД, равно как и дальнейшее включение этих результатов в расчет, представляется в корне неверным. В эту группу были включены следующие помещения: электрощитовые и распределительные устройства, чердаки, технические этажи в многоквартирных зданиях, лифтовые, лестничные

пролеты, подвалы, подполы, погреба, убежища, насосные, индивидуальные тепловые пункты, вентиляционные камеры, водомерные узлы, бойлерные, паркинги. После этапа верификации общее количество записей в обрабатываемом массиве данных составило 801 929, т.е. было отфильтровано 1,14% записей, признанных нерелевантными. Распределение количества записей по годам до и после процедуры верификации представлено в таблице 1.

Валидация данных проводилась отдельно по методам измерений (мгновенные, 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 СИ соответствующего типа. Для определения этих наименьших значений была составлена таблица, в которую были включены основные метрологические характеристики всех типов СИ, предназначенных для соответствующих измерений, имеющих на данный момент, по данным Государственного реестра средств измерений [3] (или имевших в период 2001–2017 гг.), действующее свидетельство об утверждении типа СИ.

Таким образом, нижние границы значений результатов измерений для валидации были определены следующим образом:

Таблица 1

Распределение количества записей до и после верификации

[Table 1

Distribution of the number of records in the database before and after verification]

Год [Year]	Импортировано [Imported]	Релевантные [Relevant]	Нерелевантные [Irrelevant]
2001	3357	3238	3,54%
2002	11 750	11 593	1,34%
2003	23 975	23 620	1,48%
2004	25 112	25 013	0,39%
2005	35 736	35 020	2,00%
2006	27 344	27 297	0,17%
2007	40 636	40 376	0,64%
2008	59 945	59 332	1,02%
2009	51 770	51 227	1,05%
2010	61 543	60 756	1,28%
2011	69 203	67 928	1,84%
2012	65 059	63 787	1,96%
2013	65 895	64 687	1,83%
2014	72 775	71 400	1,89%
2015	70 574	70 339	0,33%
2016	61 340	61 213	0,21%
2017	65 180	65 103	0,12%
Всего [Total]	811 194	801 929	1,14%

⁸ 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. [Radiation control and sanitary-epidemiological evaluation of residential, public and industrial buildings and facilities after end of their construction, capital repair, reconstruction: Methodical instructions MU 2.6.1.2838-11. Moscow, Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rosпотребнадzor; 2011. 26 p. (In Russian)]

- ЭРОА_{min} = 1 Бк/м³ для мгновенных измерений;
- ОА_{min} = 1 Бк/м³ для мгновенных измерений;
- ОА_{min} = 15 Бк/м³ для квазиинтегральных измерений;
- ОА_{min} = 2 Бк/м³ для интегральных измерений (с учетом мониторов радона).

В идеальном случае для валидации следовало бы использовать индивидуальные для каждого субъекта РФ нижние границы, в зависимости от реально используемых типов СИ. Однако это невозможно ввиду того, что сведения об используемых типах СИ предоставляются не всеми субъектами РФ и нерегулярно (это предусмотрено лишь в печатном варианте формы № 4-ДОЗ).

После этапа валидации общее количество записей в обрабатываемом массиве данных составило 797 363, т.е. было отфильтровано 0,57% записей, признанных недействительными. Распределение количества записей по годам до и после процедуры валидации представлено в таблице 2.

Таблица 2

Распределение количества записей до и после валидации
[Table 2]

Distribution of the number of records in the database before and after validation]			
Год [Year]	Релевантные [Relevant]	Действительные [Valid]	Недействительные [Invalid]
2001	3238	3234	0,12%
2002	11 593	11 461	1,14%
2003	23 620	23 426	0,82%
2004	25 013	24 898	0,46%
2005	35 020	34 865	0,44%
2006	27 297	27 139	0,58%
2007	40 376	40 068	0,76%
2008	59 332	59 141	0,32%
2009	51 227	50 918	0,60%
2010	60 756	60 377	0,62%
2011	67 928	67 820	0,16%
2012	63 787	63 474	0,49%
2013	64 687	64 337	0,54%
2014	71 400	70 743	0,92%
2015	70 339	69 910	0,61%
2016	61 213	60 878	0,55%
2017	65 103	64 674	0,66%
Всего [Total]	801 929	797 363	0,57%

В целом, после процедур верификации и валидации было отфильтровано 1,71% от первоначально импортированного количества записей. В дальнейшем при анализе результатов измерений была выявлена довольно характерная ошибка операторов, осуществляющих ввод данных в БД на лабораторном уровне [4]: дублирование одного и того же результата мгновенного измерения путем ввода в столбцы ОА и ЭРОА с переходом от одной величины к другой с помощью коэффициента F=0,5. Такие результаты в дальнейшем были отфильтрованы (количество записей, соответственно, не изменилось).

Отдельно стоит отметить ряд субъектов РФ, в которых доля недействительных записей превышает ус-

ловный уровень в 2%: Хабаровский край (20,16%), Костромская область (10,01%), Республика Марий Эл (9,28%), Камчатский край (6,43%), Кировская область (4,96%), Курганская область (2,76%), Саратовская область (2,59%), Владимирская область (2,37%). Причины такого значительного количества недостоверных данных проанализированы далее.

Методы

В случаях, когда редкими событиями нельзя пренебречь, а средние арифметические значения являются неинформативными, можно говорить об анализе распределений с тяжелыми хвостами. Распределение имеет тяжелый хвост, если его плотность вероятности убывает медленнее плотности вероятности экспоненциального закона. Например, логнормальное распределение относится к распределениям с так называемым умеренно тяжелым хвостом [5]: плотность вероятности для логнормального распределения убывает медленнее, чем для экспоненциального закона, но быстрее, чем для степенного.

Логнормальное распределение, при котором нормально распределены не сами случайные величины, а их логарифмы, свидетельствует о том, что оцениваемый показатель формируется благодаря мультипликативному воздействию факторов. При этом воздействие факторов, определяющих случайную величину, не суммируется, как в случае нормального распределения, а умножается, что и выражается в увеличении вероятности появления высоких значений (хвоста в правой части гистограммы частотного распределения) [6, 7]. Во многих физических, химических, биологических и токсикологических процессах случайные величины подчиняются именно логнормальному закону [8, 9].

В целом ряде работ было показано, что ОА радона в воздухе помещений более или менее точно подчиняется именно логнормальному закону [10–18]. Этот факт был также подтвержден Научным комитетом ООН по действию атомной радиации (НКДАР ООН) в отчетах 2000 и 2006 гг. [19, 20]. Мультипликативными факторами в данном случае являются удельная активность ²²⁶Ra в подстилающих грунтах и материалах строительных конструкций, проницаемость грунтов, возможные пути поступления радона из грунта в помещения здания, разница давлений между наружным и внутренним воздухом, кратность воздухообмена в помещениях и др.

Оговорку «более или менее точно» необходимо было сделать по той причине, что ОА радона в воздухе помещений строго следует логнормальному закону до уровня порядка 200 Бк/м³, выше которого начинают наблюдаться отклонения. Предпринимался ряд попыток подобрать альтернативное распределение [21–24], но в результате более глубокого анализа данных было установлено, что ОА радона в помещении точно следует логнормальному закону в том случае, когда данные получены на территории одной геологической формации (платформы); в случае же рассмотрения данных, полученных на территории целого региона или страны, отклонения неизбежны [25].

Результаты измерений, намеренно проведенные в зданиях с высокими уровнями содержания радона, содержащиеся в общем массиве данных, искажают распределение, добавляя тяжелый хвост. При использовании в качестве оценки среднего значения содержания радона

среднего арифметического, являющегося гораздо менее робастной (устойчивой к различным отклонениям, неоднородностям и выбросам в выборке) характеристикой распределения по сравнению с медианой, возможна заметная переоценка доз за счет внутреннего облучения радоном. По этой причине результаты подобных измерений, как и результаты спланированных радоновых обследований, необходимо хранить отдельно от массива результатов рутинных измерений, коим являются РБДОПИ и ФБДОПИ.

Несмотря на то, что о несоответствии распределения ОА радона в воздухе помещений нормальному закону было известно на момент разработки первых версий комплекса программного обеспечения (ПО) для заполнения БД результатов измерений и генерации формы № 4-ДОЗ, в качестве оценки среднего значения содержания радона ПО рассчитывает среднее арифметическое по всему накопленному массиву данных. Возможно, это связано с тем, что расчет медианы (50-й процентиль для логнормального распределения совпадает со средним геометрическим) является более сложной вычислительной задачей. Как бы то ни было, накопленный к настоящему моменту объем данных об ОА радона в воздухе помещений в субъектах РФ позволяет провести полноценный анализ с целью проверки соответствия распределений этой величины логнормальному закону. Это позволит получить параметры распределений, в частности медиану, которая в дальнейшем может быть использована в процедурах расчета показателей риска для здоровья населения при облучении радоном.

Для решения этой задачи были использованы следующие методы статистической обработки данных: 1) построение гистограмм частотного распределения результатов измерений; 2) проверка гипотезы о нормальном характере распределения значений с помощью различных критериев (Хи-квадрат, W-критерия Шапиро – Уилка (для выборок объемом не более 2000 значений), критерия Колмогорова – Смирнова (в некоторых случаях для выборок небольшого объема), оценок коэффициентов асимметрии и эксцесса); 3) построение и визуальный анализ Q-Q диаграмм; 4) в ряде случаев – методы восстановления формы распределения (детали этих методов изложены далее по тексту). Поскольку первые два метода являются общеупотребительными, остановимся подробнее на методе построения и анализа Q-Q диаграмм [26] (диаграмм квантиль-квантиль или нормальных вероятностных графиков [27]), который является довольно распространенным в зарубежных научных работах инструментом анализа характера распределения значений ОА радона в воздухе [10, 28] и рекомендуется к применению МАГАТЭ [29], но в отечественных публикациях ранее не встречался.

Q-Q диаграмма показывает, насколько результаты измерений физической величины отклоняются от теоретических значений, полученных из нормального распределения с теми же параметрами, что и для эмпирических данных. В случае идеального совпадения диаграмма представляет собой прямую линию. В нашем случае в качестве результатов измерений используются натуральные логарифмы ОА радона. В качестве примера идеального совпадения на рисунке 1 представлены Q-Q диаграмма и гистограммы частотного распределения,

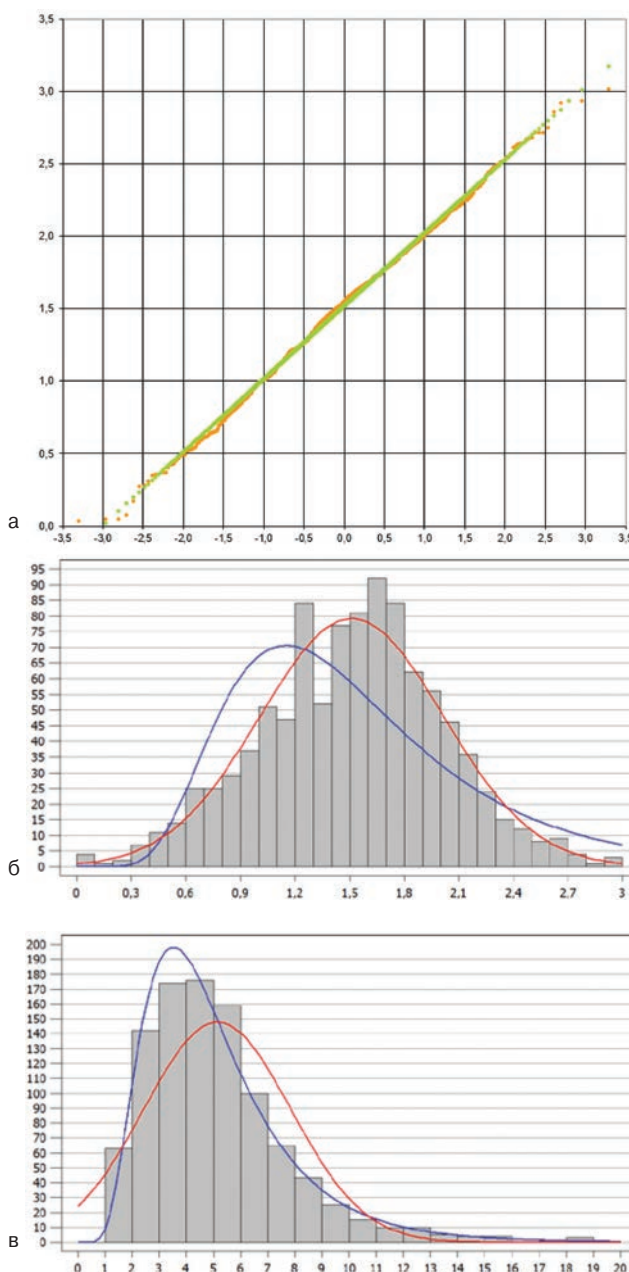


Рис. 1. Q-Q диаграмма и гистограммы частотного распределения для выборки объемом 1000 значений, сгенерированной случайным образом

[Fig. 1. Q-Q plot and frequency distribution histogram of a sample of size 1000 randomly generated from normal distribution with $\mu=1,5$ and $\sigma=0,5$]

построенные для выборки объемом 1000 значений, сгенерированной случайным образом из нормального распределения с параметрами $\mu=1,5$; $\sigma=0,5$ для моделирования логнормального распределения ОА радона в воздухе помещений в интервале значений 1–20 Бк/м³.

На Q-Q диаграмме, представленной на рисунке 1а, оранжевые точки – это сгенерированные случайным образом значения, а зеленые – теоретические значения, полученные из нормального распределения. По оси ординат отложены значения натурального логарифма ОА радона, а по оси абсцисс – z-значения (т.е. обратные значения стандартного нормального распределения, имею-

шего среднее, равное нулю, и стандартное отклонение, равное единице).

На рисунке 1б представлена гистограмма частотного распределения сгенерированных значений натурального логарифма ОА радона; видно, что эта выборка описывается нормальным законом (красная огибающая кривая). Гипотеза о нормальном характере распределения также подтверждается результатами расчетов критерия Хи-квадрат ($p=0,17$), W-критерия Шапиро – Уилка ($p=0,08$), оценки коэффициентов асимметрии ($p=0,43$) и эксцесса ($p=0,86$): поскольку наименьшее значение $p \geq 0,05$, то с вероятностью 95% данные подчиняются нормальному закону распределения. На основе критерия Колмогорова – Смирнова можно сделать вывод о том, что распределение значений, скорее всего, является логнормальным ($p=0,35$) и с вероятностью 95% не является логнормальным ($p=0$).

На рисунке 1в представлена гистограмма частотного распределения значений ОА радона, полученных экспонированием из сгенерированных значений натурального логарифма; явно видно, что эта выборка описывается логнормальным законом (синяя огибающая кривая), а не нормальным (красная огибающая кривая). Гипотеза о нормальном характере распределения в этом случае не подтверждается с вероятностью 95% результатами расчетов критерия Хи-квадрат, W-критерия Шапиро – Уилка, оценки коэффициентов асимметрии и эксцесса: во всех случаях $p=0$. На основе критерия Колмогорова – Смирнова можно сделать вывод о том, что распределение значений, скорее всего, является логнормальным ($p=0,35$) и с вероятностью 95% не является нормальным ($p=0$).

Описанные выше методы были применены к массивам результатов измерений ОА радона в воздухе помещений в субъектах РФ, полученных всеми методами (мгновенными, квазиинтегральными и интегральными). При построении Q-Q диаграммы автоматически рассчи-

тывались и характеристики логнормального распределения [30]: медиана (GM) с 95% доверительным интервалом, геометрическое стандартное отклонение (GSD) и, для сравнения, среднее арифметическое (AM).

Результаты и обсуждение

Из 85 субъектов РФ за период 2001–2017 гг. ни разу не передавали БД с результатами измерений радона в ФБДОПИ 5 субъектов: Республика Ингушетия, Чеченская Республика, Ульяновская область, Республика Крым и Севастополь. Для двух регионов (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/м³.

Для остальных 78 субъектов РФ были построены Q-Q диаграммы и гистограммы частотного распределения значений ОА радона. Визуальный анализ Q-Q диаграмм позволил условно разделить регионы на четыре группы:

- практически идеальное совпадение с логнормальным распределением (19 регионов);
- хорошее совпадение с логнормальным распределением (16 регионов);
- недостаточное совпадение с логнормальным распределением (4 региона);
- на Q-Q диаграмме присутствует одно или два плато, искажающие логнормальное распределение (39 регионов).

В таблице 3 перечислены субъекты РФ, отнесенные к первой группе, и полученные характеристики распределений, в таблице 4 – субъекты РФ, отнесенные ко второй группе. На рисунке 2 представлены примеры Q-Q диаграмм, характерных для субъектов РФ из первой (рис. 2а) и второй групп (рис. 2б).

Таблица 3

Регионы, в которых выявлено практически идеальное совпадение распределения значений ОА радона с логнормальным
[Table 3]

Regions of Russia in which radon concentrations conform almost perfect to a lognormal distribution]

Код [Code]	Субъект РФ [Region]	N	min	max	GM	GSD	AM
01	Республика Адыгея [The Republic of Adygea]	3869	2,6	1278	39,1 (37,9–40,4)	2,8	66,7
04	Республика Алтай [The Altai Republic]	10555	2	5128	98,2 (96,3–100,0)	2,6	163,9
09	Карачаево-Черкесская Республика [The Karachay-Cherkess Republic]	1477	13	854	71,1 (69,0–73,3)	1,8	84,9
11	Республика Коми [The Komi Republic]	4632	1,6	237	18,7 (18,3–19,1)	2,0	23,1
15	Республика Северная Осетия – Алания [The Republic of North Ossetia – Alania]	605	10	462	66,8 (63,7–69,9)	1,8	79,3
18	Удмуртская Республика [The Udmurt Republic]	1233	3	300	31,2 (30,2–32,2)	1,8	36,9

Код [Code]	Субъект РФ [Region]	N	min	max	GM	GSD	AM
28	Амурская область [Amur Oblast]	3381	2,2	1500	65,4 (64,2–66,7)	1,7	76,5
40	Калужская область [Kaluga Oblast]	7273	3,6	590	61,3 (60,7–61,9)	1,5	67,2
42	Кемеровская область [Kemerovo Oblast]	18683	2	1182	54,4 (53,9–55,0)	2,0	69,9
43	Кировская область [Kirov Oblast]	4961	2	1118	37,7 (37,1–38,3)	1,8	46,0
44	Костромская область [Kostroma Oblast]	4745	4	270	39,6 (39,0–40,2)	1,8	46,2
45	Курганская область [Kurgan Oblast]	4410	15	456,9	47,8 (47,0–48,7)	1,9	59,1
46	Курская область [Kursk Oblast]	3711	2,4	604	33,8 (33,2–34,4)	1,7	39,5
54	Новосибирская область [Novosibirsk Oblast]	43913	2	5550	35,6 (35,4–35,8)	1,7	43,8
61	Ростовская область [Rostov Oblast]	18397	1	1413	56,2 (55,6–56,8)	2,1	74,1
68	Тамбовская область [Tambov Oblast]	5179	9,2	219,5	43,0 (42,5–43,6)	1,6	48,4
71	Тульская область [Tula Oblast]	14084	5	1258	45,2 (44,8–45,6)	1,8	53,9
75	Забайкальский край [Zabaykalsky Krai]	5790	1	5532	109,7 (106,5–113,0)	3,2	231,2
79	Еврейская АО [Jewish Autonomous Oblast]	3565	2	4286	54,1 (52,4–55,9)	2,7	100,0

N – количество измерений; min и max – минимальное и максимальное значения ОА радона, Бк/м³; GM – медиана распределения ОА радона (в скобках – 95% доверительный интервал), Бк/м³; GSD – геометрическое стандартное отклонение; AM – среднее арифметическое значение ОА радона, Бк/м³.

[N – number of measurements; min and max – minimum and maximum radon concentration values, Bq/m³; GM – geometric mean (with 95% confidence interval), Bq/m³; GSD – geometric standard deviation; AM – arithmetic mean, Bq/m³.]

Таблица 4

Регионы, в которых выявлено хорошее совпадение распределения значений ОА радона с логнормальным

[Table 4

Regions of Russia in which radon concentrations conform quite well to a lognormal distribution]

Код [Code]	Субъект РФ [Region]	N	min	max	GM	GSD	AM
03	Республика Бурятия [The Republic of Buryatia]	886	1	1174	60,7 (56,3–65,4)	3,1	114,1
05	Республика Дагестан [The Republic of Dagestan]	1313	3,8	1414	56,0 (54,1–58,0)	1,9	71,2

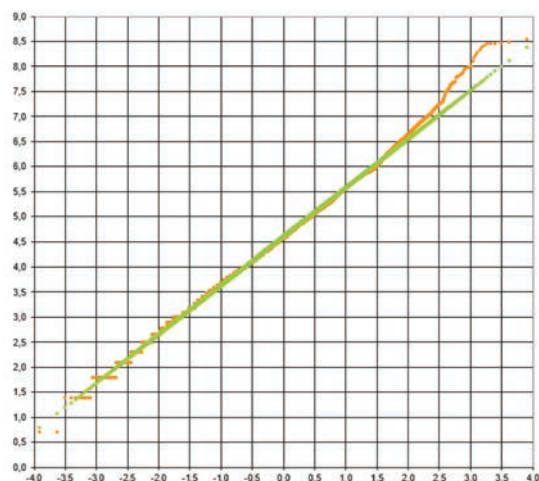
Research articles

Окончание таблицы 4

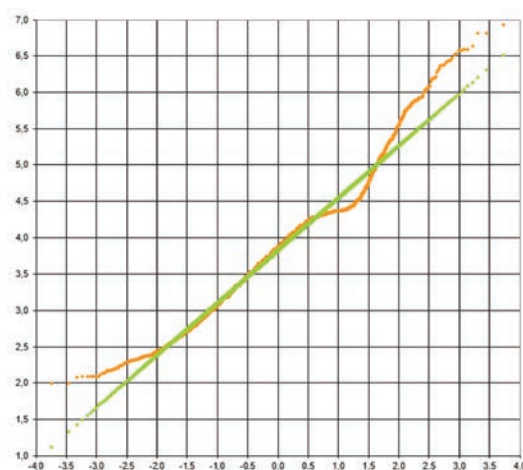
Код [Code]	Субъект РФ [Region]	N	min	max	GM	GSD	AM
17	Республика Тыва [The Tyva Republic]	2319	7,6	2410	103,3 (100,2– 106,6)	2,2	143,0
24	Красноярский край [Krasnoyarsk Krai]	10881	6	1660	47,7 (47,0– 48,4)	2,2	66,6
31	Белгородская область [Belgorod Oblast]	48377	6	1150	39,9 (39,7– 40,2)	1,9	49,4
32	Брянская область [Bryansk Oblast]	14829	1	326,4	23,9 (23,7– 24,0)	1,6	26,7
37	Ивановская область [Ivanovo Oblast]	23385	3,8	1982,2	57,5 (57,0– 58,0)	2,1	80,0
48	Липецкая область [Lipetsk Oblast]	5532	7,3	1016	45,2 (44,3– 46,0)	2,1	60,5
52	Нижегородская область [Nizhny Novgorod Oblast]	2993	6	1600	33,6 (33,0– 34,2)	1,6	40,2
55	Омская область [Omsk Oblast]	8192	6	366	50,4 (50,0– 50,9)	1,5	54,1
56	Оренбургская область [Orenburg Oblast]	4181	2	333,2	45,6 (44,7– 46,5)	2,0	55,1
57	Орловская область [Oryol Oblast]	8650	1,1	1290	29,0 (28,5– 29,5)	2,2	42,3
65	Сахалинская область [Sakhalin Oblast]	348	3	538	20,8 (19,4– 22,2)	1,9	27,6
72	Тюменская область [Tyumen Oblast]	810	2	158	14,4 (13,5– 15,3)	2,4	20,1
74	Челябинская область [Chelyabinsk Oblast]	47363	1,9	54100	51,3 (51,0– 51,6)	1,9	70,5
87	Чукотский АО [Chukotka Autonomous Okrug]	112	2	200	13,6 (11,9– 15,6)	2,1	19,6

N – количество измерений; min и max – минимальное и максимальное значения ОА радона, Бк/м³; GM – медиана распределения ОА радона (в скобках – 95% доверительный интервал), Бк/м³; GSD – геометрическое стандартное отклонение; AM – среднее арифметическое значение ОА радона, Бк/м³.

[N – number of measurements; min and max – minimum and maximum radon concentration values, Bq/m³; GM – geometric mean (with 95% confidence interval), Bq/m³; GSD – geometric standard deviation; AM – arithmetic mean, Bq/m³.]



а) Республика Алтай
[a] The Altai Republic]



б) Липецкая область
[b] Lipetsk Oblast]

Рис. 2. Примеры Q-Q диаграмм результатов измерений ОА радона в субъектах РФ, отнесенных к первой (а) и второй (б) группам
[Fig. 2. Examples of Q-Q plots of radon concentrations (natural logarithms) in the regions of Russia assigned to the a) 1st and b) 2nd groups]

В третью группу было отнесено 4 субъекта РФ: Кабардино-Балкарская Республика, Республика Марий Эл, Архангельская область и Магаданская область. Соответствующие Q-Q диаграммы представлены на рисунке 3.

В Кабардино-Балкарской Республике (рис. 3а) объем данных крайне невелик (30 измерений), поэтому Q-Q диаграмма пока что не имеет характерного для логнормального распределения вида, однако гипотеза о нормальном характере распределения значений ОА радона не подтверждается с вероятностью 95% результатами расчетов критерия Хи-квадрат, W-критерия Шапиро – Уилка, оценки коэффициентов асимметрии и эксцесса (во всех случаях $p < 0,05$). Дополнительно был рассчитан критерий Колмогорова – Смирнова, на основе которого можно сделать вывод о том, что распределение значений ОА радона в регионе, скорее всего, является логнормальным ($p = 0,33$) и с вероятностью 95% не является нормальным ($p < 0,05$).

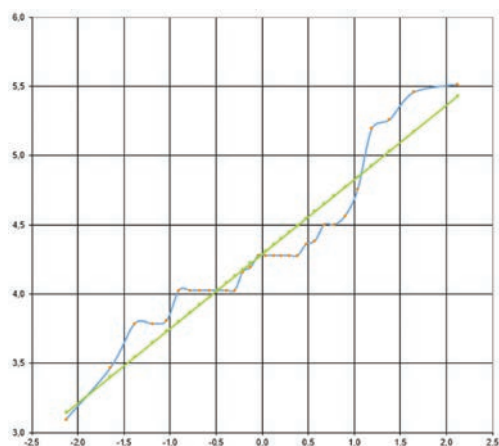
Несмотря на то, что гипотеза о нормальном характере распределения значений ОА радона в Республике Марий Эл (рис. 3б) не подтверждается с вероятностью 95% результатами расчетов критерия Хи-квадрат, оценки коэффициентов асимметрии и эксцесса (во всех случаях $p = 0$), Q-Q диаграмма имеет вид, более подходящий нормальному распределению; на гистограмме частотного распределения видно, что красная огибающая кривая, представляющая нормальное распределение, более точно накрывает основную часть результатов, нежели синяя огибающая кривая, представляющая логнормальное распределение. Однако распределение имеет нехарактерные для нормального распределения тяжелые хвосты,

особенно левый, что также нехарактерно и для логнормального распределения. Установить причины такого характера распределения пока что не удалось.

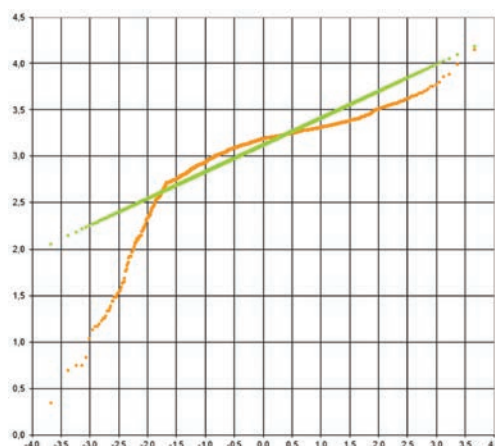
В Архангельской области (рис. 3в) Q-Q диаграмма не имеет обычной для выборок большого объема плавности, на ней обнаруживается множество мелких плато. Это объясняется методическими ошибками при заполнении БД на лабораторном уровне, а именно внесением не результатов отдельных измерений, а множества идентичных значений, полученных усреднением реальных результатов измерений.

В Магаданской области (рис. 3г) объем данных также крайне невелик (23 измерения), поэтому Q-Q диаграмма пока что не имеет характерного для логнормального распределения вида, однако гипотеза о нормальном характере распределения значений ОА радона не подтверждается с вероятностью 95% результатами расчетов критерия Хи-квадрат, W-критерия Шапиро – Уилка, оценки коэффициентов асимметрии и эксцесса (во всех случаях $p < 0,05$). Дополнительно был рассчитан критерий Колмогорова – Смирнова, на основе которого можно сделать вывод о том, что распределение значений ОА радона в регионе, скорее всего, является логнормальным ($p = 0,23$) и с вероятностью 95% не является нормальным ($p < 0,05$).

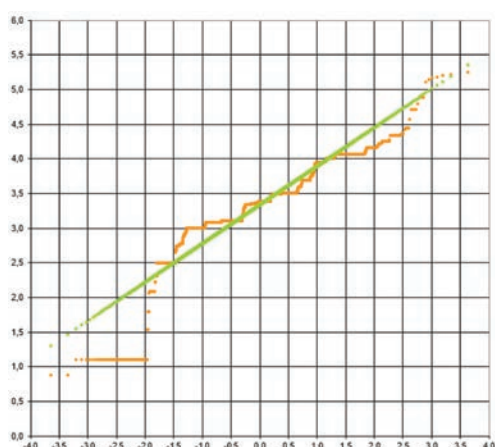
Поскольку, несмотря на визуальное недостаточное совпадение с логнормальным, распределения значений ОА радона в этих субъектах РФ не являются нормальными с вероятностью 95% и, скорее всего, являются логнормальными, для них были рассчитаны те же самые характеристики, что и для остальных субъектов РФ. Результаты приведены в таблице 5.



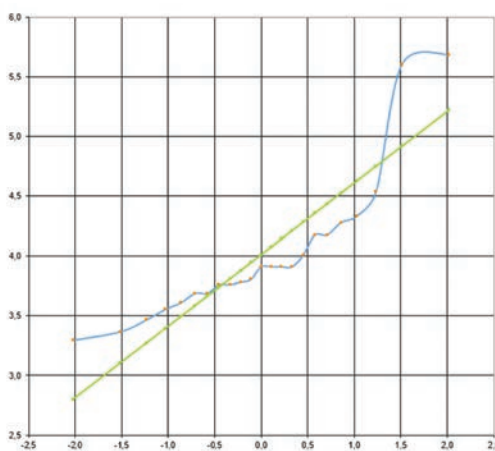
а) Кабардино-Балкарская Республика
[a) The Kabardino-Balkar Republic]



б) Республика Марий Эл
[b) The Mari El Republic]



в) Архангельская область
[c) Arkhangelsk Oblast]



г) Магаданская область
[d) Magadan Oblast]

Рис. 3. Q-Q диаграммы результатов измерений ОА радона в четырех субъектах РФ, отнесенных к третьей группе
[Fig. 3. Q-Q plots of radon concentrations (natural logarithms) in four regions of Russia assigned to the 3rd group]

Таблица 5

Регионы, в которых выявлено визуальное недостаточное совпадение распределения значений ОА радона с логнормальным
[Table 5

Regions of Russia in which radon concentrations conform insufficiently (visually) to a lognormal distribution]

Код [Code]	Субъект РФ [Region]	N	min	max	GM	GSD	AM
07	Кабардино-Балкарская Республика [The Kabardino-Balkar Republic]	30	22	248	72,7 (59,5–88,8)	1,7	84,8
12	Республика Марий Эл [The Mari El Republic]	4088	1,4	63,2	22,5 (22,3–22,7)	1,3	23,3
29	Архангельская область [Arkhangelsk Oblast]	3614	2,4	190	27,8 (27,3–28,3)	1,7	31,7
49	Магаданская область [Magadan Oblast]	23	27	294	55,1 (42,6–71,4)	1,8	69,8

N – количество измерений; min и max – минимальное и максимальные значения ОА радона, Бк/м³; GM – медиана распределения ОА радона (в скобках – 95% доверительный интервал), Бк/м³; GSD – геометрическое стандартное отклонение; AM – среднее арифметическое значение ОА радона, Бк/м³.

[N – number of measurements; min and max – minimum and maximum radon concentration values, Bq/m³; GM – geometric mean (with 95% confidence interval), Bq/m³; GSD – geometric standard deviation; AM – arithmetic mean, Bq/m³.]

Наиболее многочисленной оказалась четвертая группа субъектов РФ, в которых на Q-Q диаграмме присутствует одно или два промежуточных плато, которые представляют собой значительное количество идентичных результатов измерений (рис. 4). В подавляющем большинстве регионов из данной группы первое плато находится на уровне 3,00 (что соответствует ОА радона в 20 Бк/м³); второе плато присутствует в 8 регионах на уровне 3,69 (что соответствует ОА радона в 40 Бк/м³) и еще в трех регионах на уровне 3,40 (что соответствует ОА радона в 30 Бк/м³).

Появление первого плато на уровне 20 Бк/м³ связано со значением минимально измеряемой ОА или ЭРОА радона наиболее распространенными в стране типами СИ: РРА-01М различных модификаций (20 Бк/м³ ОА радона) и РАА-10 (10 Бк/м³ ЭРОА радона). В протоколах радиационного обследования результаты подобных измерений фигурируют в виде «< 20» в случае измерения ОА радона радиометрами радона РРА-01М различных модификаций и «< 10» в случае измерения ЭРОА радона радиометром аэрозолей РАА-10 в режиме СПЕКТР-5. Для целей санитарно-гигиенической оценки помещений такое представление результатов является приемлемым, однако при заполнении БД такие результаты заносятся в виде точных значений 20 и 10, что является абсолютно некорректным, поскольку реально измеряемая величина может при-

нимать любое значение из интервала 0–20 (в случае измерения ОА радона) или 0–10 (в случае измерения ЭРОА радона). В дальнейшем невозможно отличить такие результаты от измеренных значений, действительно равных 20 и 10 Бк/м³ для ОА и ЭРОА соответственно, поскольку в текущих версиях ПО отсутствует возможность указать, что результат измерения не превышает нижней границы диапазона измерения (НГДИ) конкретного типа СИ, который также невозможно указать в качестве дополнительной характеристики результата измерения.

Данная методическая проблема особенно актуальна для субъектов РФ со стабильно невысоким уровнем содержания радона в воздухе помещений, который на самом деле может оказаться ниже указанной минимально измеряемой ОА или ЭРОА радона. В идеальном случае следовало бы дать рекомендацию использовать типы СИ с меньшей НГДИ, тем более что в продаже есть приборы, имеющие действующее свидетельство об утверждении типа СИ, у которых значение минимально измеряемой ОА (или ЭРОА) радона не превышает 1 Бк/м³. Однако обсуждение реалистичности этого варианта, имеющего явно выраженную экономическую составляющую, следует оставить за рамками данной работы.

Появление второго плато в восьми субъектах РФ (Республика Хакасия, Краснодарский край, Ставропольский край, Московская область, Пензенская

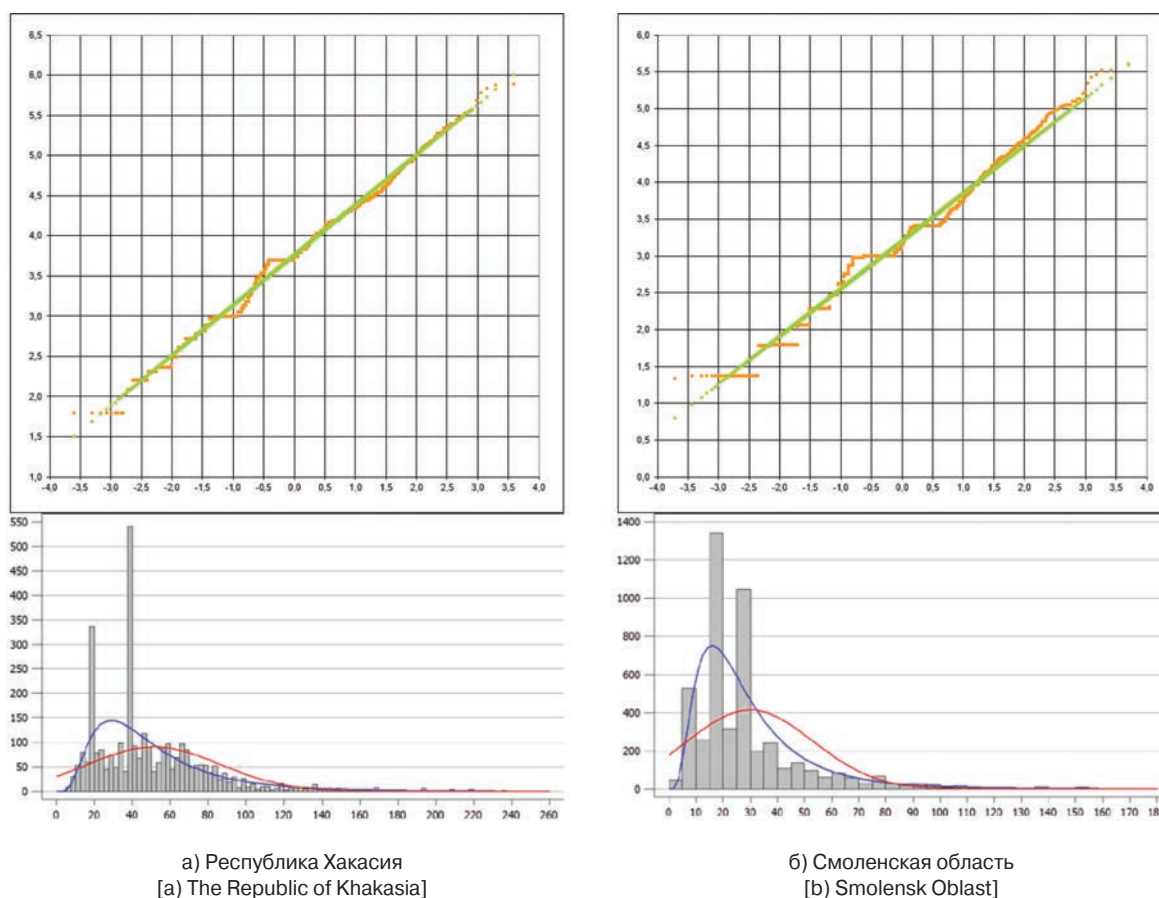


Рис. 4. Q-Q диаграммы и гистограммы частотного распределения результатов измерений ОА радона, на которых присутствуют два плато (пика): на уровне 3,00 (20 Бк/м³) и а) 3,69 (40 Бк/м³) или б) 3,40 (30 Бк/м³)

[Fig. 4. Q-Q plots and frequency distribution histograms of radon concentrations with two plateaus (peaks) detected: at 3.00 (20 Bq/m³) and а) 3.69 (40 Bq/m³) or б) 3.40 (30 Bq/m³)]

область, Пермский край, Саратовская область, Тверская область) на уровне 40 Бк/м^3 (рис. 4а) связано предположительно с ошибочным занесением результатов мгновенных измерений ОА радону в графу ЭРОА радона. Это предположение уже было подтверждено при общении с лицами, ответственными за РБДОПИ во ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии» в некоторых субъектах РФ. Кроме 8 вышеназванных регионов, где плато на уровне 40 Бк/м^3 четко идентифицируется на Q-Q диаграмме, подозрительные пики в 40 Бк/м^3 отмечены на гистограммах в следующих регионах: Республика Татарстан, Чувашская Республика, Приморский край, Орловская, Самарская, Томская области, но однозначно отнести их появление к ошибкам операторов на данный момент невозможно.

Появление второго плато в трех субъектах РФ (Республика Калмыкия, Смоленская и Томская области) на уровне 30 Бк/м^3 (см. рис. 4б) связано предположительно с еще более грубой ошибкой операторов, заносивших результаты измерений в БД, заключающейся в том, что в качестве результата измерения ЭРОА радона были занесены результаты измерения ОА, полученные квазиинтегральными методами (пассивная сорбция на активированном угле), для которых характерным значением минимально измеряемой ОА радона является 15 Бк/м^3 .

В трех субъектах РФ на гистограммах частотного распределения были обнаружены выбивающиеся из логнормального распределения пики в интервалах значений, которые не связаны с минимально измеряемыми значениями каких-либо типов СИ: $65\text{--}70 \text{ Бк/м}^3$ в Воронежской области, $70\text{--}80 \text{ Бк/м}^3$ – в Липецкой и $60\text{--}70$ – в Омской. Причина появления этих пиков на данный момент неясна. Возможно, они связаны с проведением большого количества измерений в рамках детального обследования зданий, расположенных на небольшом участке территории, имеющем определенные геолого-геофизические характеристики.

Очевидно, что установление конкретных причин искажения Q-Q диаграмм является довольно сложной задачей, требующей в большинстве случаев прямых консультаций с лицами, ответственными за ведение БД на лабораторном или региональном уровнях. На данный момент эта работа продолжается. В подавляющем большинстве регионов основную долю записей, признанных на этапе валидации недействительными, составили результаты квазиинтегральных измерений. Принимая во внимание уже выявленные типы ошибок операторов, возможно, что нижняя часть Q-Q диаграмм в некоторых регионах улучшится, если в качестве уровня валидации квазиинтегральных измерений использовать не 15 Бк/м^3 , а 1 Бк/м^3 – т.е. допустить, что туда заносятся результаты мгновенных измерений ОА радона (например, в Хабаровском крае, где доля недействительных значений оказалась максимальной – $20,16\%$). Все эти факты говорят о необходимости повышения квалификации лиц, ответственных за ведение БД на уровне лабораторий и РБДОПИ в субъектах РФ, а также о необходимости дополнительной методической поддержки со стороны ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева.

Поскольку одной из подзадач данной работы являлась проверка соответствия распределений значений ОА радона логнормальному закону, а «ошибочные» плато значительно искажают Q-Q диаграмму, возникла необхо-

димость устранить плато, не затрагивая при этом остальные результаты, и восстановить таким образом форму распределений.

Для восстановления неизвестной функции плотности распределения вероятности разработан ряд методов и алгоритмов; к числу наиболее часто используемых относится метод гистограмм [31]. В нашем случае проблема с его использованием заключается в том, что определенная часть результатов измерений по сути завышена и должна быть представлена в виде «< НГДИ». Для оценки параметров распределения физических величин, результаты измерений которых часто оказываются ниже предела обнаружения, также разработан ряд методов, объединенных общим термином «анализ цензурированных данных» (CDA – censored data analysis), рекомендованных к применению такими международными организациями, как Европейское агентство по безопасности продуктов питания [32] и Всемирная организация здравоохранения [33]. В нашем случае применение этих методов напрямую также невозможно, поскольку результаты измерений, не превышающие НГДИ, однозначно не идентифицируются в БД. Кроме того, в БД присутствуют подобные результаты, полученные с помощью различных типов СИ, и для каждого из них должна быть четко указана соответствующая НГДИ.

Учитывая вышесказанное, было протестировано два метода устранения плато на Q-Q диаграммах. Первый заключался в простом отсечении результатов измерений ОА радона в 20 и 40 Бк/м^3 (30 Бк/м^3 в случае Смоленской и Томской областей) в столбцах мгновенных измерений. Однако после процедуры отсечения по провалу на гистограмме частотного распределения и ходу огибающей логнормальной кривой было заметно, что теряется определенное количество результатов, которые являются реальными значениями. Наиболее заметен этот провал был на гистограммах частотного распределения в семи субъектах РФ (Республика Татарстан, Краснодарский край, Воронежская, Московская, Самарская области, Москва, Ханты-Мансийский АО – Югра). Для восстановления формы распределения (устранения провала) и возврата части данных, являющихся реальными значениями, в массив для дальнейших расчетов параметров распределений был произведен расчет количества значений, которое должно быть в выборке, с использованием кумулятивной функции распределения (с параметрами, полученными после отсечения).

Второй метод был, с одной стороны, упрощенным вариантом первого, но с другой стороны, упрощение заключалось в том, что был исключен довольно дискуссионный прием – прямое отсечение части результатов измерений, не являющихся реальными значениями. Вместо этого расчет количества значений, которое должно быть в выборке на уровень устраняемых плато, производился с использованием кумулятивной функции распределения с параметрами, полученными по исходному массиву данных.

Процедура устранения плато на Q-Q диаграмме слабо влияет на величину геометрического стандартного отклонения: среднее по всем субъектам РФ увеличение составило $0,1$. Причем в отдельных субъектах РФ наблюдается не только увеличение, но и уменьшение этого параметра, а в ряде случаев он остается неизменным. Однако второй метод в целом дает меньшее увеличения данного параметра.

После применения вышеописанных методов к массивам данных во всех 39 субъектах РФ из четвертой группы на Q-Q диаграммах отмечается хорошее или практически идеальное совпадение распределения значений ОА радона с логнормальным (рис. 5), что говорит о правильности описанного подхода к устранению плато на Q-Q диаграмме и восстановлению формы распределения. Характеристики распределений, рассчитанные по выборкам, полученным первым и вторым методом, отличались между собой незначительно (в пределах 1 Бк/м³), однако второй метод был признан более оптимальным за счет большей простоты реализации, большей стабильности

геометрического стандартного отклонения, меньшего влияния «экспертного» фактора и меньшей консервативности получаемых характеристик распределений. В таблице 6 приведены субъекты РФ из четвертой группы и соответствующие характеристики распределений, полученные после устранения плато на Q-Q диаграммах и восстановления формы распределения вторым методом.

Для всех 78 проанализированных субъектов РФ гипотеза о нормальном характере распределения значений ОА радона не подтверждается с вероятностью 95% результатами расчетов критерия Хи-квадрат, W-критерия Шапиро – Уилка, оценки коэффициентов асимметрии и эксцесса (во всех случаях $p < 0,05$).

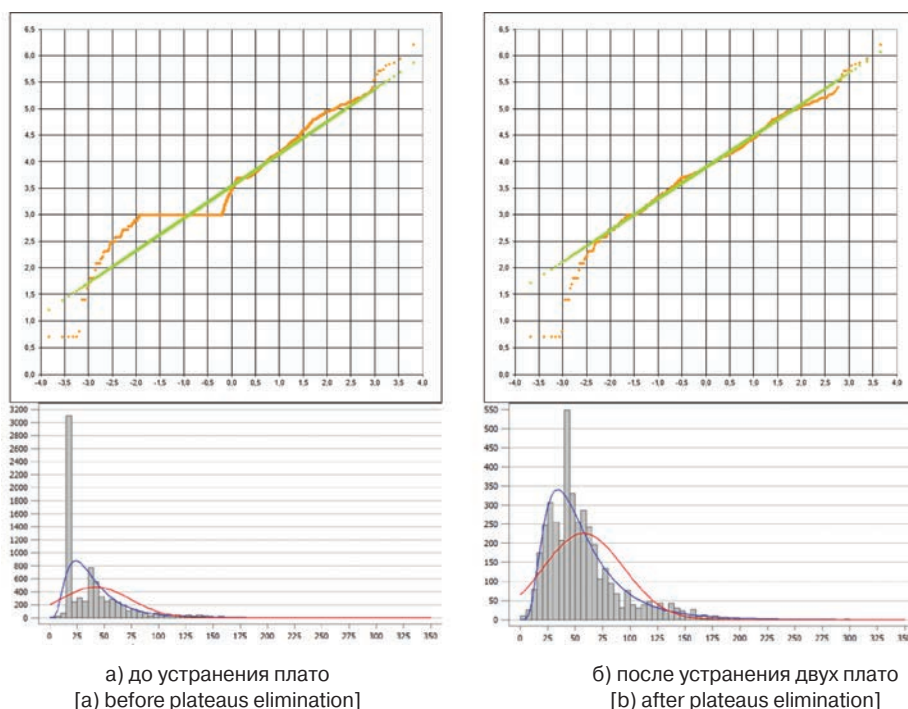


Рис. 5. Q-Q диаграммы и гистограммы частотного распределения результатов измерений ОА радона в Пермском крае
 [Fig. 5. Q-Q plots and frequency distribution histograms of radon concentrations in Perm Krai]

Таблица 6

Регионы с устраненным плато на Q-Q диаграмме, в которых получено хорошее или практически идеальное совпадение распределения значений ОА радона с логнормальным

[Table 6

Regions of Russia in which radon concentrations conform almost perfect or quite well to a lognormal distribution after plateaus elimination]

Код [Code]	Субъект РФ [Region]	N	min	max	GM	GSD	AM
02	Республика Башкортостан [The Republic of Bashkortostan]	4625	2,6	1006	45,8 (45,0–46,6)	1,8	57,1
08	Республика Калмыкия [The Republic of Kalmykia]	1893	2	1042	72,7 (70,2–75,3)	2,2	99,8
10	Республика Карелия [The Republic of Karelia]	2687	2	652	35,2 (34,5–35,9)	1,7	40,5
13	Республика Мордовия [The Republic of Mordovia]	1004	4	197,6	47,3 (45,1–49,7)	2,2	60,2
14	Республика Саха (Якутия) [The Republic of Sakha (Yakutia)]	3080	1	5622	38,7 (37,4–40,0)	2,6	60,9

Research articles

Продолжение таблицы 6

Код [Code]	Субъект РФ [Region]	N	min	max	GM	GSD	AM
16	Республика Татарстан [The Republic of Tatarstan]	28239	2	202	23,8 (23,7–23,9)	1,6	26,4
19	Республика Хакасия [The Republic of Khakasia]	2482	6	360	46,3 (45,1–47,5)	1,9	56,7
21	Чувашская Республика [The Chuvash Republic]	10255	2	1600	38,3 (37,9–38,7)	1,8	45,0
22	Алтайский край [Altai Krai]	26477	6	640	57,4 (57,1–57,7)	1,5	62,7
23	Краснодарский край [Krasnodar Krai]	13280	2	1200	27,0 (26,8–27,2)	1,6	30,0
25	Приморский край [Primorsky Krai]	4294	8	208,4	41,3 (40,7–41,9)	1,6	46,5
26	Ставропольский край [Stavropol Krai]	16641	2	7530	69,6 (68,8–70,5)	2,2	102,5
27	Хабаровский край [Khabarovsk Krai]	3184	8	560,6	36,1 (35,5–36,7)	1,6	40,9
33	Владимирская область [Vladimir Oblast]	1139	9	211	39,3 (37,9–40,7)	1,9	47,5
34	Волгоградская область [Volgograd Oblast]	1741	3	79	24,1 (23,7–24,6)	1,5	25,8
35	Вологодская область [Vologda Oblast]	2194	1,6	776	49,2 (48,1–50,3)	1,7	55,4
36	Воронежская область [Voronezh Oblast]	15197	1,4	496	41,1 (40,8–41,5)	1,7	47,6
38	Иркутская область [Irkutsk Oblast]	10759	1	20300	56,1 (55,3–56,9)	2,1	90,0
39	Калининградская область [Kaliningrad Oblast]	7084	2	1146,6	44,9 (44,3–45,5)	1,8	55,0
41	Камчатский край [Kamchatka Krai]	1087	10	120	28,2 (27,5–28,8)	1,5	30,6
47	Ленинградская область [Leningrad Oblast]	13913	2	930	41,9 (41,3–42,5)	2,3	60,0
50	Московская область [Moscow Oblast]	6247	2	278	36,8 (36,4–37,3)	1,7	42,6
51	Мурманская область [Murmansk Oblast]	448	6	82	28,1 (27,1–29,1)	1,5	30,1
53	Новгородская область [Novgorod Oblast]	2378	1	276	32,6 (31,7–33,6)	2,1	41,4
58	Пензенская область [Penza Oblast]	4892	2	422	20,9 (20,5–21,3)	1,9	25,8
59	Пермский край [Perm Krai]	4128	2	492	48,5 (47,6–49,4)	1,8	57,5
60	Псковская область [Pskov Oblast]	302	20,5	1038	43,6 (40,2–47,2)	2,0	58,3
62	Рязанская область [Ryazan Oblast]	8098	2	1044	39,0 (38,2–39,7)	2,3	54,5
63	Самарская область [Samara Oblast]	26789	2	750	33,8 (33,6–34,1)	1,8	40,1
64	Саратовская область [Saratov Oblast]	1241	4	510	30,0 (29,1–30,9)	1,7	36,2
66	Свердловская область [Sverdlovsk Oblast]	12008	2	998	51,1 (50,5–51,7)	1,9	64,7

Код [Code]	Субъект РФ [Region]	N	min	max	GM	GSD	AM
67	Смоленская область [Smolensk Oblast]	3422	3,8	268	24,4 (23,8–25,0)	2,1	32,3
69	Тверская область [Tver Oblast]	4721	1	358	37,1 (36,4–37,7)	1,8	44,2
70	Томская область [Tomsk Oblast]	7955	2	756	35,6 (35,4–35,9)	1,3	37,1
76	Ярославская область [Yaroslavl Oblast]	8719	2	1060	33,2 (32,7–33,7)	2,1	41,6
77	Москва [Moscow]	8991	2	890	26,2 (25,8–26,5)	1,8	31,2
78	Санкт-Петербург [Saint-Petersburg]	52350	2	4390	41,1 (41,0–41,3)	1,5	45,6
86	Ханты-Мансийский АО – Югра [Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Yugra]	4096	2	340	26,0 (25,5–26,5)	1,9	32,5
89	Ямало-Ненецкий АО [Yamalo-Nenets Autonomous Okrug]	1386	1	372	21,1 (19,9–22,4)	3,2	43,4

N – количество измерений; min и max – минимальное и максимальное значения ОА радона, Бк/м³; GM – медиана распределения ОА радона (в скобках – 95% доверительный интервал), Бк/м³; GSD – геометрическое стандартное отклонение; AM – среднее арифметическое значение ОА радона, Бк/м³.

[N – number of measurements; min and max – minimum and maximum radon concentration values, Bq/m³; GM – geometric mean (with 95% confidence interval), Bq/m³; GSD – geometric standard deviation; AM – arithmetic mean, Bq/m³]

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/м³ при диапазоне 55–4915 Бк/м³, среднее арифметическое составило 175 Бк/м³. Это в целом согласуется с данными других авторов [10] и подтверждает тот факт, что ОА радона точно следу-

ет логнормальному закону в том случае, когда данные получены на территории одной геологической формации [34]: максимальное значение порогового уровня в 4915 Бк/м³ получено в Забайкальском крае (рис. 6), на территории которого заметно преобладают горные области и для которого характерны высокие, по сравнению с остальными субъектами РФ, средние значения ОА радона.

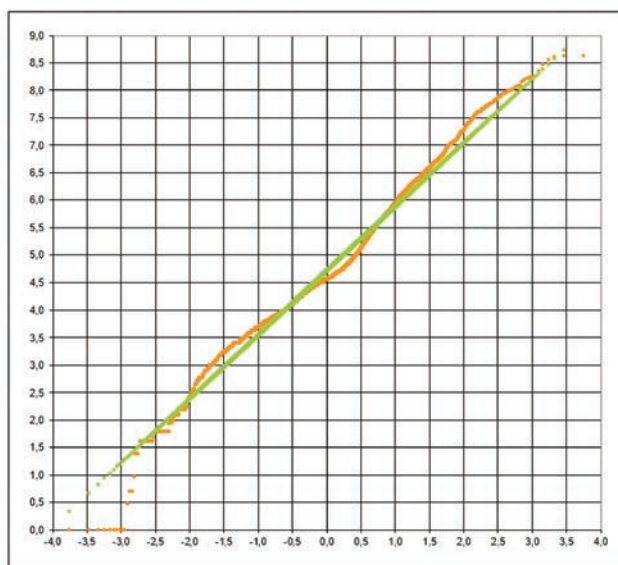


Рис. 6. Q-Q диаграмма результатов измерений ОА радона в Забайкальском крае: распределение имеет логнормальный характер до уровня в 4915 Бк/м³

[Fig. 6. Q-Q plot of radon concentrations in Zabaykalsky Krai: values conform lognormal distribution very well up to about 4915 Bq/m³]

Заключение

За 2001–2017 гг. в ФБДОПИ был накоплен гигантский массив данных о содержании радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий в 78 субъектах РФ, представляющий собой результаты измерений ОА и ЭРОА радона, полученные всеми методами (мгновенными, квазиинтегральными и интегральными). В данной работе впервые был проведен комплексный анализ хранящихся в ФБДОПИ результатов измерений с целью проверки соответствия распределений ОА радона логнормальному закону. В результате применения целого ряда методов анализа данных было установлено, что в 74 субъектах РФ распределения значений ОА радона, в целом, следуют логнормальному закону до определенного уровня, максимальное значение которого составило 4915 Бк/м³. Для всех 78 проанализированных субъектов РФ были рассчитаны параметры распределений (медиана с 95% доверительным интервалом, геометрическое стандартное отклонение и среднее арифметическое). В дальнейшем полученные медианные значения могут быть использованы для расчета различных показателей риска для здоровья населения субъектов РФ при облучении радоном [35, 36]. Следует, однако, отметить, что полученные для части субъектов РФ параметры описывают так называемое смешанное распределение [37], составленное из распределений результатов измерений, полученных разными методами. Тем не менее, вследствие самой идеологии ФБДОПИ как массива результатов рутинных измерений, получить надежную оценку параметров отдельных распределений на данный момент не представляется возможным.

Результаты исследования также показывают, что использование при расчете доз внутреннего облучения населения радоном средних арифметических значений является некорректным и приводит к завышению доз в среднем в 1,3 раза, а в ряде случаев – в 2,1 раза. Исходя из этого, становится очевидным, что разработка нового комплекса ПО для заполнения БД результатов измерений и генерации формы № 4-ДОЗ, а также внесение изменений в соответствующие инструктивно-методические документы, вне всяких сомнений, является актуальнейшей задачей.

Автор выражает признательность В.С. Репину (ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева) за ценные замечания, а также двум рецензентам за полезные комментарии.

Литература

- Барковский, А.Н. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2016 году: информационный сборник / А.Н. Барковский, Н.К. Барышков, Г.Я. Брук, Б.Ф. Воробьев, Т.А. Кормановская, Л.В. Репин, И.К. Романович, Т.Н. Титова, В.С. Степанов, А.Г. Цовьянов, А.Г. Сивенков, В.Е. Журавлева. – СПб., 2017. – 78 с.
- Конonenко, Д.В. Оценка радиационного риска для населения Санкт-Петербурга при облучении радоном / Д.В. Конonenко // Радиационная гигиена. – 2013. – Т. 6, № 1. – С. 31–37.
- Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. Утвержденные типы средств измерений (сведения представлены по состоянию на 01.11.2018): <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4> (дата обращения: 23.01.2019)
- Конonenко, Д.В. Типичные ошибки операторов при внесении результатов измерений содержания радона в воздухе помещений в банк данных лабораторий радиационного контроля «ФФ-4» / Д.В. Конonenко, Т.А. Кормановская // Материалы международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы радиационной гигиены», Санкт-Петербург, 23-24 октября 2018 г. – СПб., 2018. – С. 176–178.
- Embrechts P., Klüppelberg C., Mikosch T. Modelling Extremal Events for Insurance and Finance. Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 1997. 648 p. ISBN 978-3-642-33483-2 (eBook).
- Limpert E., Stahel W.A., Abbt M. Log-Normal Distributions Across the Sciences: Keys and Clues. BioScience. 2001 May;51(5):341–52.
- Микляев, П.С. Научные основы оценки потенциальной радоноопасности платформенных территорий: дисс. ... докт. г.-м. наук / П.С. Микляев. – М., 2015. – 307 с.
- Ott W.R. A physical explanation of the lognormality of pollutant concentrations. J Air Waste Manage Assoc. 1990 Oct;40(10):1378–83.
- Hattis D.B., Burmaster D.E. Assessment of variability and uncertainty distributions for practical risk assessments. Risk Anal. 1994;14(5):713–30.
- Daraktchieva Z., Miles J.C., McColl N. Radon, the lognormal distribution and deviation from it. J Radiol Prot. 2014 Mar;34(1):183–90.
- Cohen B.L. A national survey of ²²²Rn in U.S. homes and correlating factors. Health Phys. 1986 Aug;51(2):175–83.
- Nero A.V., Schwehr M.B., Nazaroff W.W., Revzan K.L. Distribution of airborne radon-222 concentrations in U.S. homes. Science. 1986 Nov;234(4779):992–7.
- White S.B., Bergsten J.W., Alexander B.V., Rodman N.F., Phillips J.L. Indoor ²²²Rn concentrations in a probability sample of 43,000 houses across 30 states. Health Phys. 1992 Jan;62(1):41–50.
- Marcinowski F., Lucas R.M., Yeager W.M. National and regional distributions of airborne radon concentrations in U.S. homes. Health Phys. 1994 Jun;66(6):699–706.
- Miles J.C.H. Mapping the proportion of the housing stock exceeding a radon reference level. Radiat Prot Dosimetry. 1994 Dec;56(1-4):207–10.
- Miles J. Mapping radon-prone areas by lognormal modelling of house radon data. Health Phys. 1998 Mar;74(3):370–8.
- Kim C.K., Lee S.C., Lee D.M., Chang B.U., Rho B.H., Kang H.D. Nationwide survey of radon levels in Korea. Health Phys. 2003 Mar;84(3):354–60.
- Hámori K., Tóth E., Losonci A., Minda M. Some remarks on the indoor radon distribution in a country. Appl Radiat Isot. 2006 Aug;64(8):859–63.
- Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Volume I: Sources. Annex B: Exposures from natural radiation sources. New York: United Nations; 2000. 76 p. ISBN 92-1-142238-8.
- Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2006 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Volume II: Scientific Annexes C, D and E. Annex E: Sources-to-effects assessment for radon in homes and workplaces. New York: United Nations; 2009. 142 p. ISBN 978-92-1-142270-2.
- Andersen C.E., Ulbak K., Damkjaer A., Kirkegaard P., Gravesen P. Mapping indoor radon-222 in Denmark: design and test of the statistical model used in the second nationwide survey. Sci Total Environ. 2001 May 14;272(1-3):231–41.
- Murphy P., Organo C. A comparative study of lognormal, gamma and beta modelling in radon mapping with recommendations regarding bias, sample sizes and the treatment of outliers. J Radiol Prot. 2008 Sep;28(3):293–302.
- Tuia D., Kanevski M. Indoor radon distribution in Switzerland: lognormality and Extreme Value Theory. J Environ Radioact. 2008 Apr;99(4):649–57.

24. Bossew P. Radon: exploring the log-normal mystery. *J Environ Radioact.* 2010 Oct;101(10):826–34.
25. Kies A., Feider M., Biell A., Rowlinson L. Radon survey in the Grand-Duchy of Luxembourg. Indoor measurements related to house features, soil, geology and environment. *Environ. Int.* 1996 Jan;22:805–8.
26. StatSoft, Inc. Электронный учебник по статистике: http://statsoft.ru/home/textbook/glossary/gloss_n.html (дата обращения: 23.01.2019)
27. Цыплаков, А. Мини-словарь англоязычных эконометрических терминов, часть 3 / А. Цыплаков // *Квантиль.* – 2014. – № 12. – С. 45–51.
28. Gunby J.A., Darby S.C., Miles J.C., Green B.M., Cox D.R. Factors affecting indoor radon concentrations in the United Kingdom. *Health Phys.* 1993 Jan;64(1):2–12.
29. National and Regional Surveys of Radon Concentration in Dwellings. Review of Methodology and Measurement Techniques. IAEA Analytical Quality in Nuclear Applications Series No. 33 (IAEA/AQ/33). Vienna: International Atomic Energy Agency; 2013. 35 p. ISSN 2074–7659.
30. Measurement and reporting of radon exposures. ICRU Report No. 88. *Journal of the ICRU* 12 (2). Oxford University Press; 2012. 191 p.
31. Сызранцев, В.Н. Адаптивные методы восстановления функции плотности распределения вероятности / В.Н. Сызранцев, Я.П. Невелев, С.Л. Голофаст // *Известия вузов. Машиностроение.* – 2006. – № 12. – С. 3–11.
32. European Food Safety Authority. Management of left-censored data in dietary exposure assessment of chemical substances. Scientific report of EFSA. *EFSA Journal* 2010 Jun;8(3):1557–1653.
33. GEMS/Food-EURO Second Workshop on Reliable Evaluation of Low-Level Contamination of Food. Report on a Workshop in the Frame of GEMS/Food-EURO (with Addendum, January 2013); 1995 May 26-27; Kulmbach, Federal Republic of Germany. 10 p.
34. Cinelli G., Tondeur F. Log-normality of indoor radon data in the Walloon region of Belgium. *J Environ Radioact.* 2015 May;143:100–9.
35. 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.
36. 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.
37. Дубнер, П.Н. Англо-русский статистический глоссарий: основные понятия: <http://masters.donntu.org/2002/fvti/spivak/library/book2/book2.htm> (дата обращения: 23.01.2019)

Поступила: 24.01.2019 г.

Кононенко Дмитрий Викторович – научный сотрудник лаборатории дозиметрии природных источников Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. . **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: d.kononenko@niirg.ru

Для цитирования: Кононенко Д.В. Анализ распределений значений объемной активности радона в воздухе помещений в субъектах Российской Федерации // *Радиационная гигиена.* – 2019. – Т. 12, №1. – С.85–103. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-1-85-103

Analysis of distributions of indoor radon concentrations in the regions of the Russian Federation

Dmitry V. Kononenko

Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

During 2001–2017 more than 800 thousand records containing the results of measurements of radon concentration taken in 78 regions of Russia were accumulated in the Federal databank of radiation doses to the population of the Russian Federation. The paper presents the procedure and results of the first data analysis carried out to check the conformity of radon concentrations in the regions of Russia with the lognormal distribution and to calculate the parameters of these distributions. The procedure included verification and validation of data, plotting the frequency distribution histograms and Q-Q plots (normal probability plots) and the use of some methods of elimination of plateaus on the Q-Q plots and the distribution recovery. As a result,

Dmitry V. Kononenko

Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev.

Address for correspondence: Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: d.kononenko@niirg.ru

in 74 of 78 analyzed regions radon concentrations conform quite well or almost perfect to a lognormal distribution up to a certain level (this level ranged from 55 to 4915 Bq/m³). For all 78 regions geometric means with 95% confidence intervals, geometric standard deviations and arithmetic means were calculated. It should be noted that due to the fact that the Federal databank is a database containing results of measurements taken with different techniques (instant measurements, charcoal canisters, radon monitors and etched track detectors), the lognormal distributions for most regions are in fact contaminated distributions, and currently it is impossible to calculate the parameters of separate distributions that form the mixture. The results show that dose assessment based on arithmetic means could lead to an overestimation of the doses from radon up to 2.1 times compared to that based on geometric means. The calculated medians can also be used for risk assessment purposes.

Key words: radon, concentration, verification, validation, data analysis, lognormal distribution, distribution parameters, Q-Q plot, distribution recovery, federal databank.

References

- Barkovsky A.N., Baryshkov N.K., Bruk G.Ya. Doses of exposure of the population of the Russian Federation in 2016: Informational digest. St.Petersburg; 2017. 78 p. (In Russian)
- Kononenko D.V. Risk assessment for the population of Saint-Petersburg from residential exposure to radon. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene. 2013;6(1):31–7. (In Russian)
- Federal Information Fund for ensuring the uniformity of measurements. Approved types of measuring instruments (information is presented as of 01.11.2018). – Available from: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4> (Accessed: 23.01.2019) (In Russian)
- Kononenko D.V., Kormanovskaya T.A. Typical mistakes made by users while entering indoor radon measurements results into the laboratory database “FF-4”. In: Current issues of radiation hygiene. Materials of the international scientific and practical conference; 2018 Oct 23–24; St.Petersburg, Russia. St.Petersburg; 2018. P. 176–178. (In Russian)
- Embrechts P., Klüppelberg C., Mikosch T. Modelling Extremal Events for Insurance and Finance. Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 1997. 648 p. ISBN 978-3-642-33483-2 (eBook).
- Limpert E., Stahel W.A., Abbt M. Log-Normal Distributions Across the Sciences: Keys and Clues. BioScience. 2001 May;51(5):341–52.
- Miklyayev P.S. Scientific basis for assessing the potential radon hazard of platform areas [dissertation]. Moscow; 2015. 307 p. (In Russian)
- Ott W.R. A physical explanation of the lognormality of pollutant concentrations. J Air Waste Manage Assoc. 1990 Oct;40(10):1378–83.
- Hattis D.B., Burmaster D.E. Assessment of variability and uncertainty distributions for practical risk assessments. Risk Anal. 1994;14(5):713–30.
- Daraktchieva Z., Miles J.C., McColl N. Radon, the lognormal distribution and deviation from it. J Radiol Prot. 2014 Mar;34(1):183–90.
- Cohen B.L. A national survey of ²²²Rn in U.S. homes and correlating factors. Health Phys. 1986 Aug;51(2):175–83.
- Nero A.V., Schwehr M.B., Nazaroff W.W., Revzan K.L. Distribution of airborne radon-222 concentrations in U.S. homes. Science. 1986 Nov;234(4779):992–7.
- White S.B., Bergsten J.W., Alexander B.V., Rodman N.F., Phillips J.L. Indoor ²²²Rn concentrations in a probability sample of 43,000 houses across 30 states. Health Phys. 1992 Jan;62(1):41–50.
- Marcinowski F., Lucas R.M., Yeager W.M. National and regional distributions of airborne radon concentrations in U.S. homes. Health Phys. 1994 Jun;66(6):699–706.
- Miles J.C.H. Mapping the proportion of the housing stock exceeding a radon reference level. Radiat Prot Dosimetry. 1994 Dec;56(1-4):207–10.
- Miles J. Mapping radon-prone areas by lognormal modelling of house radon data. Health Phys. 1998 Mar;74(3):370–8.
- Kim C.K., Lee S.C., Lee D.M., Chang B.U., Rho B.H., Kang H.D. Nationwide survey of radon levels in Korea. Health Phys. 2003 Mar;84(3):354–60.
- Hámori K., Tóth E., Losonci A., Minda M. Some remarks on the indoor radon distribution in a country. Appl Radiat Isot. 2006 Aug;64(8):859–63.
- Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Volume I: Sources. Annex B: Exposures from natural radiation sources. New York: United Nations; 2000. 76 p. ISBN 92-1-142238-8.
- Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2006 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Volume II: Scientific Annexes C, D and E. Annex E: Sources-to-effects assessment for radon in homes and workplaces. New York: United Nations; 2009. 142 p. ISBN 978-92-1-142270-2.
- Andersen C.E., Ulbak K., Damkjaer A., Kirkegaard P., Gravesen P. Mapping indoor radon-222 in Denmark: design and test of the statistical model used in the second nationwide survey. Sci Total Environ. 2001 May 14;272(1-3):231–41.
- Murphy P., Organo C. A comparative study of lognormal, gamma and beta modelling in radon mapping with recommendations regarding bias, sample sizes and the treatment of outliers. J Radiol Prot. 2008 Sep;28(3):293–302.
- Tuia D., Kanevski M. Indoor radon distribution in Switzerland: lognormality and Extreme Value Theory. J Environ Radioact. 2008 Apr;99(4):649–57.
- Bossew P. Radon: exploring the log-normal mystery. J Environ Radioact. 2010 Oct;101(10):826–34.
- Kies A., Feider M., Biell A., Rowlinson L. Radon survey in the Grand-Duchy of Luxembourg. Indoor measurements related to house features, soil, geology and environment. Environ. Int. 1996 Jan;22:805–8.
- StatSoft, Inc. Electronic textbook on statistics. – Available from: http://statsoft.ru/home/textbook/glossary/gloss_n.html (Accessed: 23.01.2019) (In Russian)
- Tsyplakov A. A mini-dictionary of English econometric terminology III. Quantile. 2014;12:45–51. (In Russian)
- Gunby J.A., Darby S.C., Miles J.C., Green B.M., Cox D.R. Factors affecting indoor radon concentrations in the United Kingdom. Health Phys. 1993 Jan;64(1):2–12.
- National and Regional Surveys of Radon Concentration in Dwellings. Review of Methodology and Measurement Techniques. IAEA Analytical Quality in Nuclear Applications Series No. 33 (IAEA/AQ/33). Vienna: International Atomic Energy Agency; 2013. 35 p. ISSN 2074–7659.
- Measurement and reporting of radon exposures. ICRU Report No. 88. Journal of the ICRU 12 (2). Oxford University Press; 2012. 191 p.
- Syzrantsev V.N., Nevelev Ya.P., Golofast S.L. Adaptive methods for recovering the probability density function. Izvestiya vuzov. Mashinostroyeniye = News of universities. Engineering. 2006;12:3–11. (In Russian)

32. European Food Safety Authority. Management of left-censored data in dietary exposure assessment of chemical substances. Scientific report of EFSA. EFSA Journal 2010 Jun;8(3):1557–1653.
33. GEMS/Food-EURO Second Workshop on Reliable Evaluation of Low-Level Contamination of Food. Report on a Workshop in the Frame of GEMS/Food-EURO (with Addendum, January 2013); 1995 May 26-27; Kulmbach, Federal Republic of Germany. 10 p.
34. Cinelli G., Tondeur F. Log-normality of indoor radon data in the Walloon region of Belgium. J Environ Radioact. 2015 May;143:100–9.
35. Kononenko D.V., Kormanovskaya T.A. Risk assessment for the population of regions of the Russian Federation from exposure to radon based on data from radiation-hygienic passports of territories. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene. 2015;8(4):15–22. (In Russian)
36. Kononenko D.V. A differentiated approach to the risk assessment from exposure to radon. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene. 2017;10(1):76–83. (In Russian)
37. Dubner P.N. English-Russian glossary on statistics: basic concepts. Available from: <http://masters.donntu.org/2002/fvti/spivak/library/book2/book2.htm> (Accessed: 23.01.2019) (In Russian)

Received: January 24, 2019

For correspondence: Dmitry V. Kononenko – researcher, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being (Mira str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russian Federation. E-mail: d.kononenko@niirg.ru)

For citation: Kononenko D.V. Analysis of distributions of indoor radon concentrations in the regions of the Russian Federation. Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene, 2019, Vol. 12, No 1, pp.85-103. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-1-85-103