

Радоновое обследование в Челябинской области в 2008–2011 гг. Анализ территориальной вариабельности объемной активности радона

А.М. Маренный¹, Д.В. Кононенко², А.Е. Труфанова¹

¹ Научно-технический центр радиационно-химической безопасности и гигиены Федерального медико-биологического агентства, Москва, Россия

² 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

В период 2008–2011 гг. в рамках федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года» было проведено масштабное радоновое обследование на территории 29 муниципальных районов и городских округов Челябинской области. Результаты интегральных измерений объемной активности радона в воздухе помещений зданий различного назначения получены с помощью твердотельных трековых детекторов и аккумулярованы в базе данных «Радон» Научно-технического центра радиационно-химической безопасности и гигиены Федерального медико-биологического агентства России. В статье представлены результаты анализа полученных данных с точки зрения территориальной вариабельности объемной активности радона и результаты исследования связи этой величины с комплексом предикторов потенциальной радоноопасности. Результаты анализа данных показывают, что на всех изученных территориях (районы, городские округа и область в целом) распределение значений объемной активности радона в воздухе помещений соответствует логнормальному закону. Несмотря на то, что на десяти из них распределение лог-логистическим законом описывается несколько лучше, чем логнормальным, в среднем значения медиан для двух законов распределения не отличаются. Использование среднего арифметического значения объемной активности радона вместо медианы для расчета дозы внутреннего облучения приведет к необоснованному ее завышению в 1,4 раза. Ни на одной из изученных территорий медианное значение объемной активности радона не превышает 400 Бк/м³, при этом значение 0,95-квантиля распределения лежит в диапазоне от 96 до 1274 Бк/м³. Ожидаемая доля значений выше 400 Бк/м³ на разных территориях составляет от менее чем 0,1 до 26,8%. Наибольшие значения этого показателя получены для Сосновского, Каслинского и Брединского районов и Миасского г.о. (кроме г. Миасс). В работе проанализировано соответствие полученных результатов и карты эколого-радиогеохимического зонирования территории Челябинской области, составленной в 1993–1995 гг. на основе комплекса геологических предикторов потенциальной радоноопасности. Установлено, что медианные значения объемной активности радона в помещениях подвального, цокольного и первого этажей зданий, расположенных на территории трех из четырех эколого-радиогеохимических зон, достоверно не отличаются от медианного значения объемной активности радона в помещениях тех же этажей зданий, расположенных за пределами таких зон. Полученные результаты приводят к выводу, что возможность использования данной карты в качестве карты потенциальной радоноопасности представляется весьма сомнительной. Используемый в работе массив данных по Челябинской области содержит также обширный набор дополнительных характеристик каждой точки измерений, что дает возможность проанализировать и ряд других аспектов, связанных с изменчивостью объемной активности радона, например, сезонную и поэтажную вариабельность. В дальнейшем данный массив вполне может стать основой для расчетов региональных сезонных корректирующих коэффициентов, что позволит повысить достоверность оценки среднегодового значения ЭРОА изотопов радона по результатам измерений ограниченной длительности.

Ключевые слова: радон, объемная активность, радоновое обследование, трековый детектор, анализ данных, логнормальное распределение, геогенный радоновый потенциал, эколого-радиогеохимическая зона, Челябинская область.

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

Введение

Территория Российской Федерации характеризуется чрезвычайным разнообразием геологических, геофизических и геохимических условий. Различное их сочетание приводит к тому, что отдельные участки территории характеризуются повышенной по сравнению с другими потенциальной радоноопасностью. На данный момент в действующих санитарных правилах и нормативах, касающихся природных источников ионизирующего излучения (НРБ-99/2009¹, ОСПОРБ 99/2010², СанПиН 2.6.1.2800-10³), отсутствует четкое определение понятия «потенциальная радоноопасность территории». Тем не менее, основной признак потенциальной радоноопасности, подлежащий определению при радиационном контроле земельных участков под строительство зданий⁴ (плотность потока радона с поверхности грунта), и нормативы его значения в документах установлены. При этом в определенных случаях в качестве дополнительного признака потенциальной радоноопасности может использоваться объемная активность (ОА) радона в воздухе подвальных помещений или/и помещений первых этажей близлежащих зданий⁵.

Отсутствие единой утвержденной терминологии приводит к тому, что в научных трудах используются различные трактовки этого и близкого к нему терминов. Например, в монографии [1] радоноопасная территория определена как «географическая область или административный район, для которого достоверно установлены значительно более высокие уровни ОА радона в воздухе зданий, чем в других частях страны или района». Такое определение, по сути, допускает признание радоноопасными территорий, где высокие уровни содержания радона в воздухе помещений могут быть обусловлены, к примеру, высоким содержанием ²²⁶Ra в материалах строительных конструкций зданий. В монографии [2] под

потенциальной радоноопасностью территории подразумевается «сочетание геологических, геодинамических, гидрогеологических условий, геофизических, радиационно-физических характеристик грунтов, способствующее повышенному выделению радона из грунтов, при которых среднегодовая эквивалентная равновесная объемная активность (ЭРОА) радона в помещениях зданий, расположенных на данной территории и никак не защищенных от поступления радона из грунта, может превышать допустимые санитарно-гигиенические уровни». Данное определение также подразумевает, что в качестве основного пути поступления радона в воздух помещений рассматривается его выделение из грунтов и подстилающих пород под зданиями. Однако, сравнивая эти определения, важно отметить главный момент: потенциальная радоноопасность может быть охарактеризована множеством предикторов, об адекватности применения которых много лет ведутся научные дискуссии (например, [3–8]), но выражается она в конечном итоге в повышенном по сравнению с неким средним уровнем содержания радона в воздухе помещений зданий, не имеющих радонозащиты. В свою очередь, это означает возможность косвенной оценки радоноопасности территории на основе результатов измерений ОА радона в воздухе помещений нижних этажей зданий.

Результаты интегральных измерений ОА радона в воздухе помещений на первых и цокольных этажах зданий положены в основу создаваемой с 2006 г. Европейской карты радона в помещениях [9–11] (European Indoor Radon Map [12]). В Российской Федерации подобной карты на данный момент не создано, а имеющиеся результаты радоновых обследований в отдельных регионах на Европейской карте не представлены. Между тем результаты уже проведенных обследований в сочетании с информацией об определенных предикторах потенци-

¹ Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 07.07.2009 г. № 47. Зарегистрированы в Министерстве юстиции Российской Федерации 14 августа 2009 г., регистрационный № 14534. [Norms of radiation safety (NRB-99/2009). Sanitary rules and norms SanPiN 2.6.1.2523-09. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 07.07.2009 No. 47. Registered with the Ministry of justice of the Russian Federation on August 14, 2009, registration No. 14534. (In Russ.)]

² Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010): Санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612-10. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 26.04.2010 г. № 40. Зарегистрированы в Министерстве юстиции Российской Федерации 11 августа 2010 г., регистрационный № 18115. [Basic sanitary rules for the provision of radiation safety (OSPORB 99/2010). Sanitary rules and norms SP 2.6.1.2612-10. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 26.04.2010 No. 40. Registered with the Ministry of justice of the Russian Federation on August 11, 2010, registration No. 18115. (In Russ.)]

³ Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения: Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2800-10. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 24.12.2010 г. № 171. Зарегистрированы в Министерстве юстиции Российской Федерации 27 января 2011 г., регистрационный № 19587. [Hygienic requirements for limiting public exposure to the natural sources of ionizing radiation. Sanitary rules and norms SanPiN 2.6.1.2800-10. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 24.12.2010 No. 171. Registered with the Ministry of justice of the Russian Federation on January 27, 2011, registration No. 19587. (In Russ.)]

⁴ Пункт 6.1 МУ 2.6.1.2398-08 «Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка земельных участков под строительство жилых домов, зданий и сооружений общественного и производственного назначения в части обеспечения радиационной безопасности», утвержденных Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 02.07.2008 г. (далее – МУ 2.6.1.2398-08). [Radiation control and sanitary-epidemiological evaluation of land sites for construction of residential, public and industrial buildings and facilities. Guidelines MU 2.6.1.2398-08. Approved by the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 02.07.2008 (hereinafter – MU 2.6.1.2398-08). Paragraph 6.1. (In Russ.)]

⁵ Пункт 6.13 МУ 2.6.1.2398-08. [Paragraph 6.13 of MU 2.6.1.2398-08 (In Russ.)].

альной радоноопасности могут использоваться для планирования более детальных исследований в субъектах РФ, районах или отдельных населенных пунктах. К примеру, сбор данных о результатах измерений содержания изотопов радона в воздухе помещений во всех регионах страны посредством формы федерального статистического наблюдения № 4-ДОЗ⁶, проводимый в рамках функционирования Единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан (ЕСКИД), позволил за 2001–2015 гг. выявить 52 населенных пункта в 19 субъектах РФ, в которых среднегодовая ЭРОА изотопов радона в отдельных типах жилых домов превышает гигиенический норматив 200 Бк/м³ [13].

К числу этих субъектов РФ относится и Челябинская область, территория которой на схеме районирования территории России по степени радоноопасности, представленной в работе [14], была классифицирована как «опасная». Челябинская область расположена, в основном, на восточных склонах Южного Урала и прилегающих территориях Зауральской низменности, на северо-западе захватывает часть горных хребтов Урала. Радоноопасность данной территории определяется в первую очередь ее геологическими особенностями: отсутствием или незначительной мощностью чехла рыхлых отложений и выходом на поверхность горных пород скального основания; широким распространением горных пород с повышенным содержанием радионуклидов (граниты, сиениты, углистые сланцы и пр.); многочисленными тектоническими нарушениями.

В период 2008–2011 гг. в рамках мероприятия 355 федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года» был проведен значительный объем интегральных измерений ОА радона в помещениях зданий различного назначения на территории Челябинской области. Для каждого обследованного помещения заполнялся так называемый «паспорт измерения», который содержал не только полные адресные данные, включая географические координаты здания, и сроки экспонирования детекторов, но и ряд строительно-конструкционных и иных характеристик: назначение здания, год постройки, этажность, основной материал строительных конструкций, тип системы отопления и вентиляции [15]. Столь обширный набор дополнительных сведений позволил в дальнейшем провести детальный анализ полученных данных, основанный на выделении из общего массива результатов измерений отдельных групп, объединенных определенным значением интересующей характеристики.

В статье представлены результаты анализа полученных данных с точки зрения территориальной вариабельности ОА радона в воздухе помещений и результаты исследования связи этой величины с комплексом предикторов потенциальной радоноопасности.

Материалы и методы

В данной работе проведен анализ массива данных об ОА радона объемом 3223 значения из базы данных (БД) «Радон» ФГУП НТЦ РХБГ ФМБА России. Массив представляет собой результаты измерений ОА радона в воздухе помещений зданий различного назначения (жилых, общественных и производственных) на территории Челябинской области, проведенных в период с 2008 по 2011 г. с помощью комплекта аппаратуры для измерения ОА радона в воздухе трековым методом «ТРЕК-РЭИ-1М»⁷. Перед началом статистической обработки были проведены валидация и верификация результатов измерений [16]. В пробоотборных камерах типа «РЭИ-4» в качестве трекового детектора (ТД) используется нитроцеллюлозная пленка Kodak LR-115 Type II. Для данного ТД производителем комплекта аппаратуры указан предел насыщения, равный 120 кБк-сутки/м³. После процедуры валидации 42 результата измерений (1,3% от первоначального количества) были отфильтрованы как недостоверные. Эта часть данных относится, в основном, к зданиям, где были зафиксированы наиболее высокие значения ОА радона, т.е. зданиям, потенциально нуждающимся в разработке рекомендаций по проведению радонозащитных мероприятий. Выход результатов измерений за границы метрологических характеристик средства измерений исключает возможность их использования в процедуре анализа данных, однако подобные результаты можно использовать как «индикаторные» при планировании дальнейших детальных обследований отдельных зданий. На этапе верификации, в рамках задач данного исследования, из массива были исключены 72 результата измерений в подвалах и технических помещениях на цокольных этажах. Таким образом, после процедур валидации и верификации данных объем массива составил 3109 значений.

Описание массива данных приведено в таблице 1, при этом проведена первичная стратификация массива по признаку «период измерений». Деление на сезоны принято календарное (зима – декабрь, январь, февраль; весна – март, апрель, май; лето – июнь, июль, август; осень – сентябрь, октябрь, ноябрь). Сезон каждого измерения определялся как сезон, соответствующий дню середины интервала экспонирования ТД.

⁶ 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. Утверждены врио Главного государственного санитарного врача Российской Федерации 18.03.2014 г. [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. Approved by the acting Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 18.03.2014. (In Russ.)]

⁷ Радон. Измерение объемной активности в воздухе помещений интегральным трековым методом: Методика измерений. Разработана ФГУП НТЦ РХБГ ФМБА России, ООО «ГК РЭИ». Аттестована ФГУП ВНИИФТРИ, свидетельство № 40090.2И385 от 16.07.2012 г. [Measurements of radon concentration with SSNTDs. Guidelines. Developed by Research and Technical Center of Radiation-Chemical Safety and Hygiene (Federal Medical-Biological Agency of Russia) and LLC "REI Group of Companies". Certified by VNIIFTRI, certificate No. 40090.2I385 dated 16.07.2012. (In Russ.)]

Таблица 1
Распределение количества измерений по периодам измерений

[Table 1
Distribution of the number of measurements by measurement period]

Период измерений [Measurement period]	Количество измерений [Number of measurements]
Лето – осень 2008 г. [Summer – Autumn 2008]	571
Зима-весна 2008 – 2009 гг. [Winter – Spring 2008/2009]	667
Лето – осень 2009 г. [Summer – Autumn 2009]	799
Зима – весна 2009 – 2010 гг. [Winter – Spring 2009/2010]	775
Лето – осень 2010 г. [Summer – Autumn 2010]	286
Весна 2011 г. [Spring 2011]	11
ВСЕГО лето – осень [Summer-Autumn, subtotal]	1656
ВСЕГО зима – весна [Winter-Spring, subtotal]	1453
ИТОГО [TOTAL]	3109

На основе информации о назначении здания, содержащейся в таблицах БД «Радон», была дополнительно произведена классификация зданий по типам, которые отражают основные режимы эксплуатации, влияющие на характер накопления радона в воздухе помещений: жилые (гостиница, детский дом, жилой дом, интернат, общежитие, приют, санаторий), общественные (административное здание, аптека, бассейн, библиотека, детский сад, магазин, медучреждение, образовательное учреждение, общественное здание, спорткомплекс, учреждение, храм, школа) и производственные (офис, предприятие, промпредприятие, другое).

За период 2008–2011 гг. интегральные измерения ОА радона были проведены в 29 муниципальных районах и городских округах Челябинской области. Распределение количества проведенных в них измерений по типам зданий приведено в таблице 2. Для Миасского г.о., в котором было проведено наибольшее количество измерений и в состав которого входят помимо г. Миасс еще 28 населенных пунктов, массив дополнительно был разбит на две части: непосредственно г. Миасс и прочие относящиеся к городскому округу населенные пункты.

На рисунке 1 приведена административная карта Челябинской области, на которой оранжевым цветом выделены районы и городские округа, в которых было проведено не менее 100 измерений, зеленым – от 10 до 99 измерений, желтым – менее 10 измерений. Остальные районы и городские округа пока что измерениями охвачены не были.

Таблица 2
Распределение количества измерений по районам и типам зданий

[Table 2
Distribution of the number of measurements by districts and the purpose of the building]

Район [District]	Количество измерений [Number of measurements]			
	Общественные [Public buildings]	Жилые [Dwellings]	Производственные [Industrial buildings]	Итого [Subtotal]
Агаповский [Agapovsky]	2	6	0	8
Ашинский [Ashinsky]	6	20	1	27
Брединский [Bredinsky]	69	43	3	115
Верхнеуральский [Verkhneuralsky]	11	6	2	19
Верхнефaleyский г.о. [Verkhneufaleysky urban dist.]	11	44	13	68
Златоустовский г.о. [Zlatoustovsky urban dist.]	268	63	2	333
Карабашский г.о. [Karabashsky urban dist.]	1	32	0	33
Каслинский [Kaslinsky]	8	72	6	86
Копейский г.о. [Kopeysky urban dist.]	0	1	0	1
Коркинский [Korkinsky]	0	2	0	2
Красноармейский [Krasnoarmeysky]	0	1	0	1

Район [District]	Количество измерений [Number of measurements]			
	Общественные [Public buildings]	Жилые [Dwellings]	Производственные [Industrial buildings]	Итого [Subtotal]
Кыштымский г.о. [Kyshtymsky urban dist.]	21	67	2	90
Магнитогорский г.о. [Magnitogorsky urban dist.]	19	42	1	62
Миасский г.о., г. Миасс [Miassky urban dist., Miass city]	72	509	53	634
Миасский г.о., кроме г. Миасс [Miassky urban dist., except Miass city]	23	131	3	157
Нязепетровский [Nyazepetrovsky]	6	3	1	10
Пластовский [Plastovsky]	6	108	8	122
Саткинский [Satkinsky]	28	1	0	29
Снежинский г.о. [Snezhinsky urban dist.]	0	1	0	1
Сосновский [Sosnovsky]	0	21	2	23
Трёхгорный г.о. [Tryokhgornyy urban dist.]	14	5	1	20
Троицкий г.о. [Troitsky urban dist.]	0	11	4	15
Увельский [Uvelsky]	0	10	0	10
Уйский [Uysky]	14	78	0	92
Усть-Катавский г.о. [Ust-Katavsky urban dist.]	13	2	0	15
Чебаркульский [Chebarkulsky]	1	13	0	14
Чебаркульский г.о. [Chebarkulsky urban dist.]	171	114	14	299
Челябинский г.о. [Chelyabinsky urban dist.]	553	181	16	750
Чесменский [Chesmensky]	35	34	3	72
Южноуральский г.о. [Yuzhnouralsky urban dist.]	0	1	0	1
ВСЕГО [TOTAL]	1352	1622	135	3109

Для 6 районов (Агаповский, Копейский г.о., Коркинский, Красноармейский, Снежинский г.о., Южноуральский г.о.), в каждом из которых было проведено менее 10 измерений, отдельный анализ данных не проводился. Результаты измерений в этих районах входили в массивы, сформированные на основе иных признаков.

Как правило, ОА радона строго следует логнормальному закону до определенного уровня, выше которого начинают наблюдаться отклонения (выбросы и экстремальные значения) [17, 18]. Присутствие в массиве данных подобных результатов в определенной степени искажает оценку среднего значения, в зависимости от того, какая мера центральной тенденции выбрана для характеристики результа-

тов. Использование методов анализа выбросов позволяет устранить верхние экстремальные значения (ВЭЗ) и тем самым уточнить параметры и характеристики распределения. Важно подчеркнуть, что устранение ВЭЗ из анализируемого массива не обязательно означает, что данные результаты являются следствием ошибки при проведении измерений (хотя такой вариант исключать нельзя). С одной стороны, классификация результата как ВЭЗ говорит о необходимости его перепроверки (например, повторного подсчета поверхностной плотности треков на экспонированном ТД), а с другой стороны, является сигналом к тому, чтобы уделить зданию, где получен данный результат, более пристальное внимание при дальнейших обследованиях.

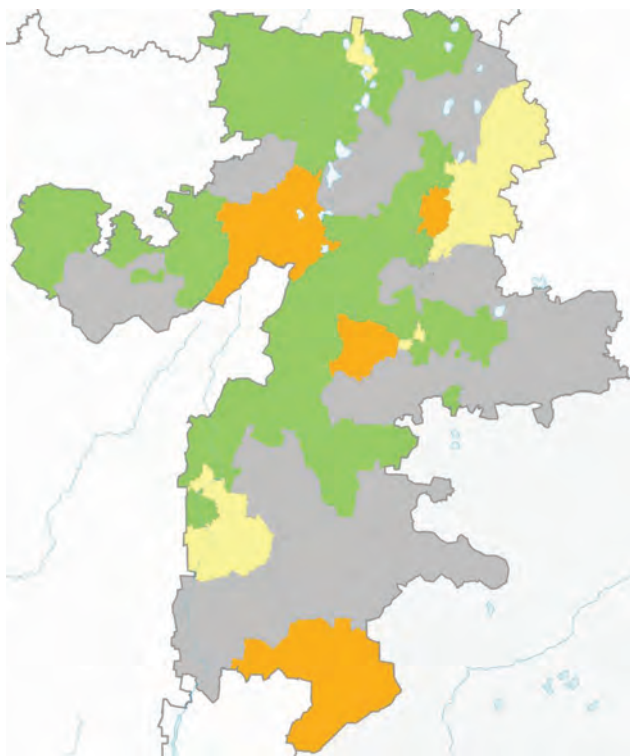


Рис. 1. Карта охвата районов и городских округов Челябинской области измерениями ОА радона (оранжевый – не менее 100 измерений; зеленый – от 10 до 99; желтый – менее 10; серый – измерений не было)

[Fig. 1. Coverage of the districts of the Chelyabinsk Oblast with indoor radon concentration measurements (orange – 100 or more measurement points; green – from 10 to 99; yellow – 10 or less; grey – no measurements at all)]

Обработка каждого массива данных, получаемого после стратификации более крупного массива по какому-либо признаку, включала в себя комплекс процедур, представляющий собой дальнейшее системное развитие подхода, описанного в работе [16]: анализ на наличие выбросов, идентификация и устранение ВЭЗ, анализ характера распределений значений ОА радона и натурального логарифма ОА радона и степени их соответствия некоторым законам. Для визуализации результатов обработки строились три диаграммы (для каждого массива): Q-Q диаграмма (диаграмма квантиль-квантиль или нормальный вероятностный график) с выделением ВЭЗ, гистограмма частотного распределения (ГЧР) значений ОА радона и ГЧР значений натурального логарифма ОА радона с наложением кривых, соответствующих некоторым законам распределений.

В качестве метода анализа на наличие выбросов был использован модифицированный тау-тест Томпсона [19, 20], который рекомендуется к применению, например, в американском национальном стандарте по оценке неопределенностей ASME PTC 19.1-2005 [21].

По массиву значений $Y_i = \ln(X_i)$ рассчитывается среднее арифметическое и стандартное отклонение σ . Далее для каждого значения \bar{Y}_i рассчитывается абсолютное отклонение от среднего арифметического:

$$\delta_i = |Y_i - \bar{Y}| \quad (1)$$

Значение критерия τ рассчитывается по следующей формуле:

$$\tau = \frac{t_{\alpha/2} \cdot (n-1)}{\sqrt{n(n-2+t_{\alpha/2}^2)}} \quad (2)$$

где n – количество значений в массиве;

$t_{\alpha/2}$ – квантиль распределения Стьюдента с $n-2$ степенями свободы уровня $1-\alpha/2$.

Идентификация значений как выбросов представляет собой итерационный процесс (по одному значению за итерацию). На каждой итерации тестируется значение с максимальным отклонением δ_i . Значение считается выбросом, если выполняется следующее условие:

$$\delta_i > \tau \cdot \sigma \quad (3)$$

Поскольку в данной работе интерес представляло устранение не просто выбросов, а ВЭЗ, α было принято равным 0,005. Результаты тау-теста использовались не для устранения выбросов, а лишь для дополнительной проверки того, что значения, идентифицированные далее методом Тьюки как ВЭЗ, действительно являются выбросами.

Идентификация ВЭЗ проводилась модифицированным методом Тьюки [22]. Значение Y_i из нормального распределения считается экстремальным, если оно превышает граничное значение Y_{EV} , определяемое как

$$Y_{EV} = Q_3 + k(Q_3 - Q_1) \quad (4)$$

где Q_1 и Q_3 – нижний и верхний квартили распределения соответственно;

k – параметр идентификации.

Граничное значение X_{EV} для логнормального распределения определяется как $\exp(Y_{EV})$.

В классическом методе Тьюки [23, 24] параметр k равен 1,5 для выбросов и 3,0 для экстремальных значений. В модифицированном методе значение параметра k зависит от объема выборки и лежит в диапазоне от 2,1 до 2,4. Классификация большого количества точек как ВЭЗ позволяет сделать правый хвост распределения не таким тяжелым и тем самым упростить идентификацию закона распределения, описывающего основную часть значений в выборке.

Устранение ВЭЗ, идентифицированных методом Тьюки, представляет собой, как и в случае тау-теста Томпсона, итерационный процесс. Если идентифицировано более одного ВЭЗ, то после устранения наибольшего ВЭЗ из массива заново определяются квартили распределения, и производится расчет нового граничного значения X_{EV} . Данная последовательность операций повторяется, пока не будет выполняться условие $X_i \leq X_{EV}$ для всех i от 1 до N , где N – объем массива. По мере исключения наибольших ВЭЗ из массива в качестве таковых могут быть идентифицированы дополнительные значения, не являвшиеся ВЭЗ в исходном массиве.

В работе [16] был использован метод визуального анализа Q-Q диаграмм, который позволял оценить соответствие распределения значений ОА радона логнормальному закону как условно «хорошее» или «практически идеальное». В данной работе этот метод был модифици-

рован с целью придания ему большей математической строгости. Анализ массивов данных включал проверку четырех гипотез с помощью теста Колмогорова – Смирнова (так называемый Goodness-of-Fit Test): соответствие распределения значений ОА радона логнормальному и логлогистическому (так называемого распределение Фиска [25]) законам и соответствие распределения значений натурального логарифма ОА радона нормальному и логистическому законам. Результаты проверки дополнялись результатами расчета натурального логарифма функции правдоподобия (так называемой Log-likelihood function), ранжируемыми подбираемые распределения по степени соответствия реальным данным.

Лог-логистическое распределение – это вероятностное распределение случайной величины, натуральный логарифм которой имеет логистическое распределение (аналогично паре логнормальное – нормальное). По форме оно похоже на логнормальное распределение, но имеет более тяжелые хвосты. Логистическое распределение, в свою очередь формой напоминает нормальное, но опять же имеет более тяжелые хвосты и больший коэффициент эксцесса. Данное распределение часто используется в качестве аппроксимации других симметричных распределений (в частности, нормального) из-за того, что его кумулятивная (интегральная) функция распределения может быть представлена в виде выражения в замкнутой форме (т.е. комбинации конечного числа стандартных операций и функций, исключающие пределы, дифференцирование, интегрирование и некоторые другие).

В соответствии с описанным модифицированным методом «практически идеальному» совпадению распределения значений ОА радона с логнормальным соответствует следующая ситуация:

– для массива значений ОА радона p -значение (статистическая мощность) теста Колмогорова – Смирнова равно или превышает 0,05 для гипотезы принадлежности выборки к логнормальному распределению, при этом максимальное значение натурального логарифма функции правдоподобия получено для логнормального распределения;

– для массива значений натурального логарифма ОА радона p -значение теста Колмогорова-Смирнова равно или превышает 0,05 для гипотезы принадлежности выборки к нормальному распределению, при этом максимальное значение натурального логарифма функции правдоподобия получено для нормального распределения.

«Хорошему» совпадению распределения значений ОА радона с логнормальным соответствует следующая ситуация:

– для массива значений ОА радона p -значение теста Колмогорова – Смирнова равно или превышает 0,05 для гипотезы принадлежности выборки к логнормальному распределению, при этом максимальное значение натурального логарифма функции правдоподобия получено для лог-логистического распределения;

– для массива значений натурального логарифма ОА радона p -значение теста Колмогорова – Смирнова равно или превышает 0,05 для гипотезы принадлежности выборки к нормальному распределению, при этом максимальное значение натурального логарифма функции правдоподобия получено для логистического распределения.

Если p -значение теста Колмогорова – Смирнова хотя бы для одного массива составляет менее 0,05, то массив с вероятностью 95% не принадлежит соответствующему распределению и является выборкой из так называемого смешанного распределения, т.е. составленного из отдельных распределений с существенно отличающимися параметрами [16, 17]. Эти отдельные распределения описывают части массива результатов измерений, полученных при разных условиях. Такими условиями могут являться время года, тип помещения (жилое, общественное, производственное), конструктивные особенности здания, а также географическое положение (расположение зданий на территориях с отличающейся потенциальной радоноопасностью). В этом случае требуется дальнейшая стратификация массива по дополнительному признаку. В данной работе подобные массивы обнаружены не были.

Результаты и обсуждение

Анализ полученных 26 массивов показал, что на всех обследованных территориях (районы, городские округа и область в целом) распределение значений ОА радона в воздухе помещений соответствует логнормальному закону, при этом на 10 из них (Челябинская обл., Верхнеуфалейский г.о., Карабашский г.о., Магнитогорский г.о., Саткинский, Увельский, Уйский, Усть-Катавский г.о., Чебаркульский г.о., Чесменский) лог-логистическим законом распределение описывается несколько лучше, чем логнормальным.

В случае лог-логистического распределения значений ОА радона медиана (которая используется в качестве робастной меры центральной тенденции) определяется как $\exp(\mu_L)$, где μ_L – среднее для соответствующего логистического распределения значений натуральных логарифмов ОА радона (по аналогии с парой нормальное–логнормальное). Стоит отметить, что автоматизация расчета μ_L затруднена, поскольку это значение является параметром кривой, подобранной статистическим пакетом в процессе анализа массивов на соответствие распределений выбранным законам. Чтобы выяснить, обосновано ли в данном случае рассчитывать медиану тем же методом, который используется для логнормального распределения (как $\exp(\mu_N)$, где μ_N – среднее для соответствующего нормального распределения значений натуральных логарифмов ОА радона), для вышеуказанных 10 массивов был произведен расчет медианы обоими методами, дополненный расчетом относительной разницы значений медиан. Результаты расчета представлены в таблице 3.

Получено, что значение медианы, рассчитанное как $\exp(\mu_L)$, в среднем не отличается от значения, рассчитанного как $\exp(\mu_N)$. Результаты расчета характеристик всех 26 массивов приведены в таблице 4. Следует подчеркнуть, что соответствие распределений значений ОА радона логнормальному закону однозначно говорит о том, что использование среднего арифметического значения вместо медианы для оценки доз внутреннего облучения населения за счет радона и для оценки рисков для здоровья населения при облучении радоном в корне неверно и ведет к необоснованному завышению этих показателей. На этот факт уже обращалось внимание в публикации [16], где среднее завышение составило 1,3 раза. В данной работе получено среднее завышение, равное 1,4 раза.

Таблица 3
Результаты расчета относительной разницы значений медиан, полученных двумя способами

[Table 3
Median values of indoor radon concentrations calculated from normal (μ_N) and logistic (μ_L) fitted distributions and relative difference between the medians]

Массив [Dataset]	Медиана, Бк/м ³ [Median, Bq/m ³]		Разница, % [Difference, %]
	exp(μ_N)	exp(μ_L)	
Челябинская область [Chelyabinsk Oblast]	98	96	-2
Верхнеуфалейский г.о. [Verkhneufaleysky urban dist.]	123	124	1
Карабашский г.о. [Karabashsky urban dist.]	46	48	4
Магнитогорский г.о. [Magnitogorsky urban dist.]	42	43	2
Саткинский [Satkinsky]	89	87	-2
Увельский [Uvelsky]	53	52	-2
Уйский [Uysky]	166	169	2
Усть-Катавский г.о. [Ust-Katavsky urban dist.]	108	105	-3
Чебаркульский г.о. [Chebarkulsky urban dist.]	127	124	-2
Чесменский [Chesmensky]	140	143	2
В СРЕДНЕМ [AVERAGE]			0

Среднее значение ОА радона – это важный показатель, позволяющий оценить степень «радоновой пробле-

мы» в отдельных районах, городских округах и населенных пунктах, но не единственный и, возможно, не самый выразительный. При принятии решений о выделении сил и средств для проведения более масштабных радоновых обследований с целью выявления зданий, в которых требуется осуществление радонозащитных мероприятий, первостепенную роль должна играть доля результатов измерений ОА радона на определенной территории, которая превышает 400 Бк/м³ (с учетом того, что нормируемым в России показателем радиационной безопасности является среднегодовая ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений⁸, равная ЭРОА_{Рн}+4,6·ЭРОА_{Тн}, которая в жилых и общественных зданиях не должна превышать 200 Бк/м³, а стандартное значение коэффициента равновесия между радоном и его короткоживущими дочерними продуктами распада принято равным 0,5⁹).

Важно отметить, что расчет этого показателя, выполненный на основе результатов уже проведенных обследований (обозначим его d_{400+}), далеко не всегда отражает реальную ситуацию на обследуемой территории, т.к. это тесно связано с вопросом методически правильного формирования случайной и представительной выборки зданий¹⁰. Практика проведения радоновых обследований в России показывает, что территориальное распределение точек измерения носит, как правило, псевдослучайный характер, когда к установке детекторов привлекаются сотрудники дружественных организаций, либо детекторы располагаются во всех зданиях определенного назначения (например, дошкольных и школьных образовательных учреждениях [26]) на обследуемой территории, и по умолчанию принимается, что их количество и расположение отражает в определенной мере территориальное

Таблица 4
Характеристики массивов данных об ОА радона в воздухе помещений в обследованных районах и городских округах
 [Table 4

Indoor radon concentrations in surveyed districts: parameters of the datasets]

Массив [Dataset]	N	GM(CI95)	GSD	X ₉₀	X ₉₅	AM
Челябинская область [Chelyabinsk Oblast]	3109	98 (95–101)	2,5	324	455	158
Ашинский [Ashinsky]	27	57 (43–76)	2,1	148	193	76
Брединский [Bredinsky]	115	183 (156–216)	2,4	575	794	283
Верхнеуральский [Verkhneuralsky]	19	88 (64–120)	2,0	215	278	113
Верхнеуфалейский г.о. [Verkhneufaleysky urban dist.]	67	123 (105–144)	1,9	287	365	151

⁸ Пункт 5.3.3 НРБ-99/2009. [Paragraph 5.3.3 of NRB-99/2009. (In Russ.)]

⁹ Пункт 6.3 МУ 2.6.1.2838-11 «Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка жилых, общественных и производственных зданий и сооружений после окончания их строительства, капитального ремонта, реконструкции по показателям радиационной безопасности», утвержденных Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 28.01.2011 г. (далее – МУ 2.6.1.2838-11). [Radiation control and sanitary-epidemiological evaluation of residential, public and industrial buildings and facilities after finishing their construction, capital repair, reconstruction. Guidelines MU 2.6.1.2838-11. Approved by the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 28.01.2011 (hereinafter – MU 2.6.1.2838-11). Paragraph 6.3. (In Russ.)].

¹⁰ Выборочное обследование жилых зданий для оценки доз облучения населения: Методические рекомендации МР 11-2/206-09. Утверждены заместителем Главного государственного санитарного врача Российской Федерации 29.08.2000 г. [Sample survey of residential buildings for assessment of the radiation doses to the population. Guidelines MR 11-2/206-09. Approved by the Deputy Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 29.08.2000. (In Russ.)]

Массив [Dataset]	N	GM(CI95)	GSD	X ₉₀	X ₉₅	AM
Златоустовский г.о. [Zlatoustovsky urban dist.]	332	93 (85–101)	2,2	259	347	132
Карабашский г.о. [Karabashsky urban dist.]	33	46 (36–59)	2,1	118	154	59
Каслинский [Kaslinsky]	86	151 (115–199)	3,7	796	1274	330
Кыштымский г.о. [Kyshtymsky urban dist.]	90	87 (73–104)	2,4	263	360	123
Магнитогорский г.о. [Magnitogorsky urban dist.]	62	42 (35–50)	2,0	102	132	53
Миасский г.о. [Miassky urban dist.]	791	88 (82–95)	2,7	310	442	151
Миасский г.о., г. Миасс [Miassky urban dist., Miass city]	634	77 (72–83)	2,5	250	348	122
Миасский г.о., кроме г. Миасс [Miassky urban dist., except Miass city]	157	153 (130–180)	2,8	578	843	268
Нязепетровский [Nyazepetrovsky]	10	55 (38–78)	1,8	114	140	62
Пластовский [Plastovsky]	122	137 (117–159)	2,4	410	560	198
Саткинский [Satkinsky]	29	89 (69–114)	2,0	218	281	119
Сосновский [Sosnovsky]	23	206 (133–318)	2,9	809	1191	389
Трёхгорный г.о. [Tryokhgornyy urban dist.]	20	45 (34–60)	2,0	106	136	55
Троицкий г.о. [Troitsky urban dist.]	15	84 (58–122)	2,1	215	280	106
Увельский [Uvelsky]	10	53 (43–67)	1,4	84	96	57
Уйский [Uysky]	92	166 (142–194)	2,1	441	582	218
Усть-Катавский г.о. [Ust-Katavsky urban dist.]	15	108 (81–143)	1,7	220	269	128
Чебаркульский [Chebarkulsky]	14	74 (40–138)	3,3	337	518	124
Чебаркульский г.о. [Chebarkulsky urban dist.]	299	127 (114–140)	2,5	403	559	194
Челябинский г.о. [Chelyabinsky urban dist.]	750	86 (81–91)	2,3	256	349	127
Чесменский [Chesmensky]	72	140 (116–169)	2,3	399	537	191

Обозначения в табл. 4: N – количество значений в массиве после устранения ВЭЗ; GM(CI95) – медиана распределения значений ОА радона (в скобках – 95% доверительный интервал), Бк/м³; GSD – геометрическое стандартное отклонение; X₉₀ – 0,90-квантиль распределения, Бк/м³; X₉₅ – 0,95-квантиль распределения, Бк/м³; AM – среднее арифметическое значение ОА радона, Бк/м³. [Designations in table 4: N – number of measurements after discarding outliers (extremely high values); GM(CI95) – median (with 95% confidence interval), Bq/m³; GSD – geometric standard deviation; X₉₀ – 90th percentile, Bq/m³; X₉₅ – 95th percentile, Bq/m³; AM – arithmetic mean, Bq/m³.]

распределение численности населения. В этом случае в выборке может оказаться как неадекватно много зданий с высоким содержанием радона в воздухе, так и неадекватно мало.

Альтернативой расчету d_{400+} является определение ожидаемой доли значений ОА радона выше 400 Бк/м³ (обозначим ее P_{400+}) на основе полученного

нормального распределения значений натурального логарифма ОА радона. С помощью метода стандартизации (т.н. z-преобразования) распределение приводится к стандартному нормальному ($\mu=0$, $\sigma=1$), рассчитывается z-значение, соответствующее ОА радона 400 Бк/м³, и далее определяется вероятность того, что ОА радона превысит этот порог. Результаты расчета d_{400+} и P_{400+} для

всех 26 массивов представлены в табл. 5 и показывают, что разница между ожидаемой долей P_{400+} и полученной в конкретной выборке долей d_{400+} может быть как положительной (в том случае, когда в выборку попало недостаточно зданий с высоким содержанием радона в воздухе), так и отрицательной (в том случае, когда в выборку попало слишком много таких зданий) и асимптотически приближается к нулю с увеличением объема выборки (рис. 2). При этом ожидаемая доля никогда не может быть равна нулю в силу своего вероятностного характера.

Таблица 5

Результаты расчета доли значений ОА радона выше 400 Бк/м³ в обследованных районах и городских округах

[Table 5]

Fraction of indoor radon concentrations above 400 Bq/m³ in surveyed districts

Массив [Dataset]	N	P_{400+} , %	d_{400+} , %
Челябинская область [Chelyabinsk Oblast]	3109	6,6	7,1
Ашинский [Ashinsky]	27	0,4	0
Брединский [Bredinsky]	115	19,2	19,1
Верхнеуральский [Verkhneuralsky]	19	1,5	0
Верхнеуфалейский г.о. [Verkhneufaleysky urban dist.]	67	3,8	6,0
Златоустовский г.о. [Zlatoustovsky urban dist.]	332	3,4	4,8
Карабашский г.о. [Karabashsky urban dist.]	33	0,2	0
Каслинский [Kaslinsky]	86	22,7	19,8
Кыштымский г.о. [Kyshtymsky urban dist.]	90	3,9	1,1
Магнитогорский г.о. [Magnitogorsky urban dist.]	62	< 0,1	0
Миасский г.о. [Miassky urban dist.]	791	6,2	7,7
Миасский г.о., г. Миасс [Miassky urban dist., Miass city]	634	3,6	5,5
Миасский г.о., кроме г. Миасс [Miassky urban dist., except Miass city]	157	17,6	16,6
Нязепетровский [Nyazepetrovsky]	10	< 0,1	0
Пластовский [Plastovsky]	122	10,6	9,0
Саткинский [Satkinsky]	29	1,6	3,4
Сосновский [Sosnovsky]	23	26,8	21,7
Трёхгорный г.о. [Tryokhgornyy urban dist.]	20	< 0,1	0
Троицкий г.о. [Troitsky urban dist.]	15	1,7	0
Увельский [Uvelsky]	10	< 0,1	0
Уйский [Uysky]	92	12,5	7,6
Усть-Катавский г.о. [Ust-Katavsky urban dist.]	15	0,9	6,7
Чебаркульский [Chebarkulsky]	14	7,7	0

Окончание таблицы 5

Массив [Dataset]	N	P_{400+} , %	d_{400+} , %
Чебаркульский г.о. [Chebarkulsky urban dist.]	299	10,2	11,4
Челябинский г.о. [Chelyabinsky urban dist.]	750	3,6	4,3
Чесменский [Chesmensky]	72	10,0	8,3

N – объем выборки (количество значений в массиве после устранения ВЭЗ); P_{400+} – ожидаемая доля значений ОА радона выше 400 Бк/м³; d_{400+} – полученная в выборке доля значений ОА радона выше 400 Бк/м³; Бк/м³. [Designations in table 5: N – number of measurements after discarding outliers (extremely high values); P_{400+} – fraction of concentrations above 400 Bq/m³ expected from the fitted distribution; d_{400+} – fraction of concentrations above 400 Bq/m³ calculated from the dataset.]

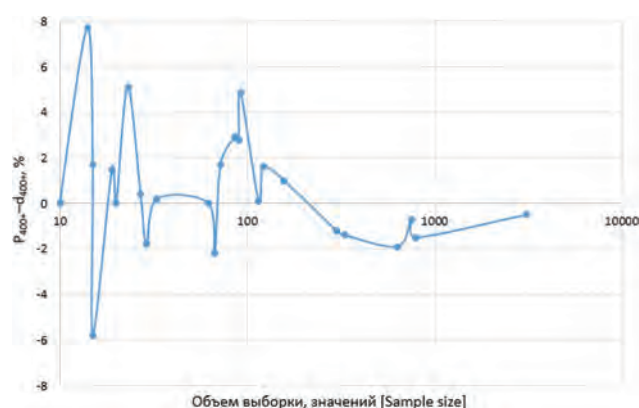


Рис. 2. Разница между ожидаемой долей (P_{400+}) и полученной в выборке долей (d_{400+}) значений ОА радона выше 400 Бк/м³ для 26 проанализированных массивов

[Fig. 2. Relative difference between fraction of concentrations above 400 Bq/m³ expected from the fitted distribution (P_{400+}) and calculated from the dataset (d_{400+}) for 26 surveyed districts]

Особый интерес представляет совместное рассмотрение средних значений ОА радона и значений P_{400+} в изученных районах и городских округах. Соответствующая диаграмма представлена на рисунке 3. Несмотря на то, что в целом более высокие значения медианы соответствуют более высокие значения P_{400+} , наблюдается и несколько резких отклонений от этой тенденции (Чебаркульский и Каслинский районы). Данные всплески надо расценивать как явный сигнал к тому, чтобы уделить этим районам больше внимания при дальнейших обследованиях.

По результатам обследования отдельные значения ОА радона, превышающие 400 Бк/м³, зафиксированы в 28 населенных пунктах в 15 районах и городских округах области, при этом наиболее высокие значения, превышающие 1000 Бк/м³, зафиксированы в 14 населенных пунктах (выделены в списке жирным шрифтом): Агаповском (п. Озерный), Брединском (**п. Бреды**, Комсомольский, **Коряжный**, Рымникский), Верхнеуфалейском г.о. (**г. Верхний Уфалей**, п. Октябрьский), Златоустовском г.о. (**г. Златоуст**), Каслинском (г. Касли, **рп Вишневогорск**), Кыштымском г.о. (п. Слюдорудник), Миасском г.о. (**г. Миасс**, с. Новоандреевка, **п. Северные Печи**, **п. ж/д ст. Сыростан**, с. Сыростан, **п. Тургояк**), Пластовском (**г. Пласт**, п. Михайловский), Саткинском (г. Сатка),

лять от 12 до 15 ч в сутки плюс выходные и праздничные дни. Результаты длительных интегральных измерений в таких условиях неизбежно повышают среднее значение ОА радона и тем выше, чем больше доля измерений в таких зданиях. Данный факт, однако, относится к рассмотрению результатов обследований с гигиенической точки зрения. С точки зрения оценки связи потенциальной радоноопасности территории с формирующейся в зданиях радоновой обстановкой, результаты интегральных измерений являются более объективными, т.к. исключают ряд влияющих факторов, наиболее значимым из которых как раз является поведенческий.

По итогам проведенного обследования протоколы измерений и аналитические материалы были направлены в Центр гигиены и эпидемиологии в Челябинской области. К сожалению, организаторы не располагают информацией о каких-либо радонозащитных мероприятиях, осуществленных или запланированных к проведению в зданиях, где были выявлены наиболее высокие уровни ОА радона. Данный факт заставляет в очередной раз обратить внимание на необходимость разработки национальной радоновой программы, стратегии или плана действий по радону в соответствии с современными рекомендациями МАГАТЭ [27–31]. В программе должна быть не только обозначена необходимость проведения радоновых обследований на различных уровнях административно-территориального деления с использованием «контрольно-измерительных приборов для измерения содержания радона и продуктов его распада в жилых помещениях с применением интегральных методов» с целью «совершенствования 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», о чем говорится в Указе Президента РФ от 13.10.2018 г. № 585 «Об утверждении Основ государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу», но и должны быть определены зоны ответственности различных организаций и ведомств, участвующих в решении «радоновой проблемы», а также, что наиболее важно, указаны источники финансирования корректирующих и защитных мероприятий, которые должны при необходимости осуществляться по итогам проведенных радоновых обследований. В противном случае результаты подобных обследований будут продолжать представлять преимущественно теоретическую научную значимость для изучения закономерностей и связей, отработки статистического инструментария и т.д., а конкретные результаты радонозащитных мероприятий (например, [32, 33]) все так же будут являться скорее уникальным событием, нежели общепринятой

практикой, направленной на снижение уровней внутреннего облучения населения за счет радона, дающего основной вклад в среднегодовую индивидуальную эффективную дозу, и, в конечном итоге, на снижение количества радон-индуцированных случаев рака легкого среди населения Российской Федерации.

Связь ОА радона в воздухе помещений с комплексом предикторов потенциальной радоноопасности

В рамках проекта «Европейский атлас природной радиоактивности» (European Atlas of Natural Radiation [34]), в который входит уже упомянутая карта радона в помещениях, идет создание карты, отображающей такой синтетический показатель, как геогенный радоновый потенциал [11], который формируется на основе целого ряда количественных и качественных показателей, так или иначе связанных с радоном и характеризующих потенциальную радоноопасность территории, обусловленную исключительно геологическими факторами [2] (например, удельная активность ^{238}U в грунте и подстилающих породах, проницаемость грунта, ОА радона в грунтовом и атмосферном воздухе, наличие трещин и разломов [35]). В России имеется опыт создания таких карт, например, для Уральского региона они были составлены в 1993–1995 гг. государственным геологоразведочным предприятием «Зеленогорскгеология» [36, 37]. На этих картах выделен ряд так называемых эколого-радиогеохимических зон, предположительно обладающих по совокупности предикторов повышенным геогенным радоновым потенциалом. На рисунке 4 представлена подобная карта Челябинской области (подготовлена д.г.-м.н. проф. РАН П.С. Микляевым, названия зон даны в соответствии с [36, 37]).

Эколого-радиогеохимические зоны пересекают Челябинскую область в меридиональном направлении, при этом территории районов и городских округов могут относиться как к одной, так и сразу к нескольким зонам, или не относиться к ним вообще. Возникает закономерный вопрос: можно ли на основании лишь того факта, что населенные пункты относятся к одной из таких зон, говорить о том, что в среднем в таких населенных пунктах ОА радона в воздухе помещений будет выше, чем в населенных пунктах, не относящихся к какой-либо из зон? Т.е., иными словами, можно ли использовать эту карту в качестве прогнозной?

Чтобы это выяснить, были сформированы 5 массивов, содержащих результаты измерений ОА радона в воздухе помещений подвального, цокольного и первого этажей (по аналогии с Европейской картой радона в помещениях [12]) в зданиях, расположенных в населенных пунктах, относящихся, согласно карте на рисунке 4, к зонам I, II, IIIa, V и ни к одной из зон (условно «Зона 0»). Для зоны IV объем массива составил всего 1 значение, поэтому анализ не

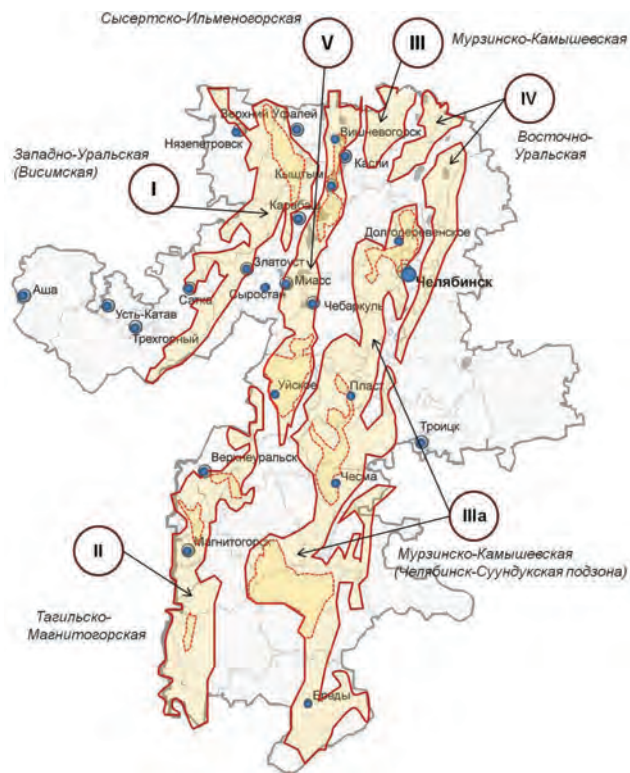


Рис. 4. Карта эколого-радиогеохимического зонирования территории Челябинской области

[Fig. 4. Map of ecological and radiogeochemical zones in Chelyabinsk Oblast: I – Western Ural (Visim); II – Tagil-Magnitogorsk; III – Murzinka-Kamyshevsk; IIIa – Chelyabinsk-Suunduk subzone; IV – Eastern Ural; V – Sysert-Ilmenogorsk]

проводился. Результаты расчета характеристик полученных массивов приведены в таблице 6.

Чтобы определить, существуют ли статистически достоверные различия между значениями медиан полученных логнормальных распределений, был проведен дисперсионный анализ с использованием теста Краскела

– Уоллиса и поправкой Бонферрони на множественное сравнение. Получено, что различия между медианой в зоне II и медианами в остальных зонах, а также между медианой в зоне I и в зонах IIIa и V, являются статистически достоверными с доверительной вероятностью 95%.

Таким образом, установлено, что медианные значения ОА радона в помещениях зданий, расположенных на территории трех из четырех эколого-радиогеохимических зон, достоверно не отличаются от медианного значения ОА радона в помещениях зданий, расположенных за пределами таких зон. Более того, в помещениях зданий, расположенных на территории зоны II, медианное значение ОА радона более чем в 2 раза ниже остальных. Полученные результаты приводят к выводу, что возможность использования карты эколого-радиогеохимического зонирования территории Челябинской области в качестве карты потенциальной радоноопасности представляется весьма сомнительной.

Заключение

Представленные в статье результаты масштабного и продолжительного радонового обследования на территории Челябинской области подробно раскрывают лишь одну сторону радоновой ситуации – территориальную вариабельность значений ОА радона в воздухе помещений зданий. Между тем обширный набор дополнительных характеристик каждой точки измерений, содержащийся в БД «Радон», позволяет проанализировать и ряд других аспектов, связанных с изменчивостью ОА радона, например, сезонную и поэтажную вариабельность. Однако исследование указанных аспектов не входило в задачи данной конкретной работы и будет проведено отдельно.

Повысить достоверность оценки среднегодового значения ЭРОА изотопов радона, являющегося в настоящее время нормируемой величиной согласно НРБ-99/2009 и ОСПОРБ 99/2010, по результатам измерений ограниченной длительности могло бы помочь использование региональных сезонных (месячных) корректирующих коэффициентов. Для их вычисления, однако, необходим

Таблица 6

Характеристики массивов данных об ОА радона в воздухе помещений на территории эколого-радиогеохимических зон

[Table 6

Indoor radon concentrations on the territory of ecological and radiogeochemical zones: parameters of the datasets]

Массив [Dataset]	N	GM(CI95)	GSD	X ₉₀	X ₉₅	AM
Зона 0 [Zone 0 – outside of zones]	293	110 (100–121)	2,3	319	431	159
Зона I [Zone I]	309	99 (91–107)	2,1	259	340	134
Зона II [Zone II]	56	54 (46–64)	1,8	119	149	66
Зона IIIa [Zone IIIa]	801	123 (115–130)	2,5	388	538	190
Зона V [Zone V]	807	130 (122–140)	2,7	468	673	223

Обозначения в табл. 6: N – количество значений в массиве после устранения ВЭЗ; GM(CI95) – медиана распределения значений ОА радона (в скобках – 95% доверительный интервал), Бк/м³; GSD – геометрическое стандартное отклонение; X₉₀ – 0,90-квантиль распределения, Бк/м³; X₉₅ – 0,95-квантиль распределения, Бк/м³; AM – среднее арифметическое значение ОА радона, Бк/м³.

[Designations in table 6: N – number of measurements after discarding outliers (extremely high values); GM(CI95) – median (with 95% confidence interval), Bq/m³; GSD – geometric standard deviation; X₉₀ – 90th percentile, Bq/m³; X₉₅ – 95th percentile, Bq/m³; AM – arithmetic mean, Bq/m³.]

не только значительный по объему массив результатов интегральных измерений ОА радона длительностью 80–100 суток в одних и тех же помещениях, но и результаты определения фонового значения ОА радона в наружном воздухе [38]. Массив данных по Челябинской области, содержащийся в БД «Радон», в будущем вполне может стать основой для подобных расчетов.

Авторы выражают глубокую признательность Андрееву Н.М. (ООО «РЭЛ МГРТ», г. Челябинск), к.э.н. Маренному М.А. (ООО «ГК РЭИ», г. Москва) и к.ф.-м.н. Нефедову Н.А. (ФГУП НТЦ РХБГ ФМБА России, г. Москва) за участие в организации и проведении многолетнего радонового обследования в Челябинской области.

Литература

1. Киселев С.М., Жуковский М.В., Стамат И.П., Ярошенко И.В. Радон: От фундаментальных исследований к практике регулирования. М.: Изд-во «ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России», 2016. 432 с.
2. Маренный А.М., Цапалов А.А., Микляев П.С., Петрова Т.Б. Закономерности формирования радонового поля в геологической среде. М.: Перо, 2016. 394 с.
3. Микляев П.С. Что делать? Или «радоновый» кризис в радиационных изысканиях // АНРИ. 2005. № 3. С. 60–64.
4. Павлов И.В., Гулабянц Л.А., Маренный А.М., Охрименко С.Е. Задачи и методы радиационного контроля при строительстве зданий // АНРИ. 2003. № 3. С. 2–12.
5. Микляев П.С., Петрова Т.Б., Охрименко С.Е. Новые аспекты оценки радоноопасности территорий городской застройки // АНРИ. 2003. № 4. С. 63–71.
6. Маренный А.М., Охрименко С.Е., Павлов И.В. Задачи и методы оценки потенциальной радоноопасности селитебных территорий // АНРИ. 2006. № 2. С. 25–30.
7. Микляев П.С., Петрова Т.Б. Механизмы формирования потока радона с поверхности почв и подходы к оценке радоноопасности селитебных территорий // АНРИ. 2007. № 2. С. 2–16.
8. Маренный А.М. Радон в инженерно-экологических изысканиях для строительства // АНРИ. 2008. № 2. С. 21–28.
9. Dubois G., Bossew P., Tollefsen T., De Cort M. First steps towards a European atlas of natural radiation: status of the European indoor radon map // J. Environ. Radioact. 2010. Vol. 101, No 10. P. 786–798.
10. Tollefsen T., Cinelli G., Bossew P., et al. From the European Indoor Radon Map Towards an Atlas of Natural Radiation // Radiat. Prot. Dosimetry. 2014. Vol. 162, No 1-2. P. 129–134.
11. Микляев П.С., Петрова Т.Б., Маренный А.М. Европейский атлас природной радиации – современное состояние, проблемы, перспективы // АНРИ. 2019. № 2 (97). С. 27–42.
12. European Indoor Radon Map: <https://remon.jrc.ec.europa.eu/About/Atlas-of-Natural-Radiation/Digital-Atlas/Indoor-radon-AM/Indoor-radon-concentration> (дата обращения: 20.07.2020).
13. Романович И.К., Стамат И.П., Кормановская Т.А., Кононенко Д.В. Природные источники ионизирующего излучения: дозы облучения, радиационные риски, профилактические мероприятия / под ред. акад. РАН Г.Г. Онищенко и проф. А.Ю. Поповой. СПб.: ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, 2018. 432 с.
14. Максимовский В.А., Харламов М.Г., Мальцев А.В., Лучин И.А., Смыслов А.А. Районирование территории России по степени радоноопасности // АНРИ. 1996/97. № 3 (9). С. 66–73.
15. Маренный А.М., Андреев Н.М., Астафуров В.И., и др. Интегральные измерения средней объемной активности радона в помещениях населенных пунктов Челябинской области // Сб. тез. науч.-практ. конф. с междунар. уч. «Актуальные вопросы радиационной гигиены», Санкт-Петербург, 7-9 июня 2010 г. СПб., 2010. С. 98–99.
16. 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.
17. Daraktchieva Z., Miles J.C., McColl N. Radon, the lognormal distribution and deviation from it // J. Radiol. Prot. 2014. Vol. 34, No 1. P. 183–190.
18. 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. Vol. 28, No 3. P. 293–302.
19. Jimenez R., Hidalgo M., Klimek P. Supplementary Materials for Testing for voter rigging in small polling stations // Sci. Adv. 2017. No 3. P. e1602363: <https://advances.sciencemag.org/content/suppl/2017/06/26/3.6.e1602363.DC1> (дата обращения: 20.07.2020)
20. Cimbala J.M. Outliers: <https://www.me.psu.edu/cimbala/me345/Lectures/Outliers.pdf> (дата обращения: 20.07.2020)
21. An American National Standard. Test Uncertainty. ASME PTC 19.1-2005 (Revision of ASME PTC 19.1-1998). New York: The American Society of Mechanical Engineers; 2006. 92 p.
22. Hoaglin D.C., Iglewicz B. Fine-Tuning Some Resistant Rules for Outlier Labeling // J. Am. Stat. Assoc. 1987. Vol. 82, No 400. P. 1147–1149.
23. Tukey J.W. Exploratory Data Analysis. Addison-Wesley Pub. Co.; 1977. 688 p.
24. Hoaglin D.C., Iglewicz B., Tukey J.W. Performance of Some Resistant Rules for Outlier Labeling // J. Am. Stat. Assoc. 1986. Vol. 81, No 396. P. 991–999.
25. McLaughlin M.P. Compendium of Common Probability Distributions. Second Edition, v2.7. 2016. 128 p.: https://www.causascientia.org/math_stat/Dists/Compendium.pdf (дата обращения: 20.07.2020)
26. Романович И.К., Стамат И.П., Кормановская Т.А., и др. Результаты выборочного исследования содержания радона в помещениях детских дошкольных и школьных организаций Ленинградской области // Здоровье населения и среда обитания. 2017. № 10 (295). С. 46–49.
27. Киселев С.М., Жуковский М.В. Современные подходы к обеспечению защиты населения от радона. Международный опыт регулирования // Радиационная гигиена. 2014. Т. 7, № 4. С. 48–52.
28. Киселев С.М. Эволюция подходов МКРЗ к регулированию защиты населения от радона // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2016. Т. 61, № 2. С. 70–74.
29. Киселев С.М. Формирование современной методологии регулирования защиты населения от облучения радоном // Гигиена и санитария. 2017. Т. 96, № 1. С. 52–56.
30. Киселев С.М., Стамат И.П., Маренный А.М., Ильин Л.А. Обеспечение защиты населения от облучения радоном. Проблемы и пути решения // Гигиена и санитария. 2018. Т. 97, № 2. С. 101–110.
31. Киселев С.М., Маренный А.М., Романов В.В. Радон. Современные подходы к регулированию радиационной безопасности населения // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 2. С. 94–102.
32. Световидов А.В., Венков В.А., Стамат И.П., Горский Г.А. Защита зданий от радона: первые опыты по разработке и осуществлению защитных мероприятий // Матер. науч.-практ. конф. «Современные проблемы обеспечения радиационной безопасности населения». СПб., 2006. С. 41–44.
33. Световидов А.В., Венков В.А., Горский Г.А. Опыт проведения радонозащитных мероприятий в эксплуатируемых зданиях // Радиационная гигиена. 2009. Т. 2, № 4. С. 35–39.

34. European Atlas of Natural Radiation: <https://remon.jrc.ec.europa.eu/About/Atlas-of-Natural-Radiation/Digital-Atlas> (дата обращения: 20.07.2020)
35. European Geogenic Radon Map: <https://remon.jrc.ec.europa.eu/About/Atlas-of-Natural-Radiation/Digital-Atlas/Geogenic-radon/Geogenic-radon> (дата обращения: 20.07.2020)
36. Жуковский М.В., Ярмошенко И.В. Радон: измерение, дозы, оценка риска. Екатеринбург: УрО РАН, Институт промышленной экологии, 1997. 231 с.
37. Уткин В.И., Чеботина М.Я., Евстигнеев А.В., и др. Радиоактивные беды Урала. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. 93 с.
38. Burke O., Long S., Murphy P., et al. Estimation of seasonal correction factors through Fourier decomposition analysis – a new model for indoor radon levels in Irish homes // J. Radiol. Prot. 2010. Vol. 3. No 3, P. 433–443.

Поступила: 15.06.2020 г.

Маренный Альберт Михайлович – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией природных источников ионизирующих излучений Научно-технического центра радиационно-химической безопасности и гигиены Федерального медико-биологического агентства, Москва, Россия

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

Труфанова Асима Ербулатовна – младший научный сотрудник лаборатории природных источников ионизирующих излучений Научно-технического центра радиационно-химической безопасности и гигиены Федерального медико-биологического агентства, Москва, Россия

Для цитирования: Маренный А.М., Кононенко Д.В., Труфанова А.Е. Радонное обследование в Челябинской области в 2008–2011 гг. Анализ территориальной вариабельности объемной активности радона // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 3. С. 51–67. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-51-67

Radon survey in Chelyabinsk Oblast, Russia, in 2008–2011. Analysis of spatial variability of indoor radon concentration

Albert M. Marennyy¹, Dmitry V. Kononenko², Asima E. Trufanova¹

¹ Research and Technical Center of Radiation-Chemical Safety and Hygiene, Federal Medical-Biological Agency, Moscow, Russia

² 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

An extensive radon survey was conducted in 2008–2011 in the framework of the Federal target program on the territory of 29 districts of Chelyabinsk Oblast. SSNTDs were used to measure indoor radon concentrations in public buildings, dwellings and industrial buildings. The results are stored in the database “Radon” owned by Research and Technical Center of Radiation-Chemical Safety and Hygiene of Federal Medical-Biological Agency. The paper presents the results of the analysis of spatial variability of indoor radon concentration and the relationship of this value with a set of geological predictors of radon potential of the territory integrated into a map of ecological and radiogeochemical zones. The results show that in all districts and the whole Chelyabinsk Oblast radon concentrations conform to a lognormal distribution, but in ten districts log-logistic distribution fits the data slightly better. Nevertheless, relative difference between the median values of indoor radon concentration calculated from the two fitted distributions yields zero. The results show that dose assessment based on the arithmetic means could lead to an overestimation of the doses from radon in 1.4 times on average compared to that based on the medians. The median value does not exceed 400 Bq/m³ in any of the surveyed territories and the 95th percentile lies between 96 and 1274 Bq/m³. The fraction of indoor radon concentrations above 400 Bq/m³ expected from the fitted distribution lies between less than 0.1 and 26.8%. The highest values of this fraction were obtained for the Sosnovsky, Kaslinsky, Bredinsky districts and the Miassky urban district (except for the city of Miass). A map of ecological and radiogeochemical zones in Chelyabinsk Oblast was released in 1993–1995 and it was based on a set of geological predictors of radon potential of the territory. We analyzed the relationship of these zones with the results of the radon survey. One-way ANOVA on ranks with the Bonferroni correction showed that there is no statistically significant difference at the 95% confidence level amongst the medians of indoor radon concentration on basement, ground and first floors in

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

settlements, which are located on the territory of three of four of these zones and outside of the territory of all zones. In the fourth zone the median was even two times lower than outside of the zones. These results lead to the conclusion that the possibility of using this map as a map of radon-prone areas is very doubtful. Each datapoint stored in the “Radon” database has a number of additional properties, which allows analyzing other types of indoor radon concentration variability such as seasonal or floor-to-floor. It is expected that later this dataset could be used for estimating regional seasonal correction factors.

Key words: radon, concentration, radon survey, SSNTD, data analysis, lognormal distribution, geogenic radon potential, ecological and radiogeochemical zone, Chelyabinsk Oblast.

References

- Kiselev SM, Zhukovsky MV, Stamat IP, Yarmoshenko IV. Radon: From fundamental research to regulatory practice. Moscow: Russian State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical-Biological Agency; 2016: 432. (In Russian)
- Marennyy AM, Tsapalov AA, Miklyaev PS, Petrova TB. Regularities of radon field formation in the geological environment. Moscow: Pero; 2016: 394. (In Russian)
- Miklyaev PS. What to do? Or the “radon” crisis in radiation research. *ANRI = ANRI*. 2005;3: 60–4. (In Russian)
- Pavlov IV, Gulabyants LA, Marennyy AM, Okhrimenko SE. Tasks and methods of radiation control while constructing the buildings. *ANRI = ANRI*. 2003;3: 2–12. (In Russian)
- Miklyaev PS, Petrova TB, Okhrimenko SE. New aspects of assessing the radon potential of urban areas. *ANRI = ANRI*. 2003;4: 63–71. (In Russian)
- Marennyy AM, Okhrimenko SE, Pavlov IV. Tasks and methods for assessing the radon potential of residential areas. *ANRI = ANRI*. 2006;2: 25–30. (In Russian)
- Miklyaev PS, Petrova TB. Mechanisms of radon flow formation from the soil surface and approaches to the assessment of the radon potential of residential areas. *ANRI = ANRI*. 2007;2: 2–16. (In Russian)
- Marennyy AM. Radon in engineering and environmental research for construction. *ANRI = ANRI*. 2008;2: 21–8. (In Russian)
- Dubois G, Bossew P, Tollefsen T, De Cort M. First steps towards a European atlas of natural radiation: status of the European indoor radon map. *J. Environ. Radioact.* 2010;101(10): 786–98.
- Tollefsen T, Cinelli G, Bossew P, Gruber V, De Cort M. From the European Indoor Radon Map Towards an Atlas of Natural Radiation. *Radiat. Prot. Dosimetry*. 2014;162(1-2): 129–34.
- Miklyaev PS, Petrova TB, Marennyy AM. European Atlas of Natural Radiation – the Current Status, Problems, Prospects. *ANRI = ANRI*. 2019;2(97): 27–42. (In Russian)
- European Indoor Radon Map. – Available from: <https://remon.jrc.ec.europa.eu/About/Atlas-of-Natural-Radiation/Digital-Atlas/Indoor-radon-AM/Indoor-radon-concentration> (Accessed: 20 July 2020)
- Romanovich IK, Stamat IP, Kormanovskaya TA, Kononenko DV. Natural sources of ionizing radiation: radiation doses, radiation risks, preventive measures. Saint-Petersburg: FBUN NIIRG im. P.V. Ramzaeva; 2018: 432. (In Russian)
- Maksimovskiy VA, Kharlamov MG, Maltsev AV, Luchin IA, Smyslov AA. Zoning of the territory of Russia according to the radon potential. *ANRI = ANRI*. 1996/97;3(9): 66–73. (In Russian)
- Marennyy AM, Andreev NM, Astafurov VI, Gubin AT, Dmitriev VA, Marennyy MA, et al. Long-term measurements of indoor radon concentration in the settlements of Chelyabinsk Oblast, Russia. In: Scientific and practical conference with international participation “Current issues of radiation hygiene”; 2010 Jun 7-9; Saint-Petersburg; 2010: 98–9. (In Russian)
- Kononenko DV. Analysis of distributions of indoor radon concentrations in the regions of the Russian Federation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(1): 85–103. (In Russian)
- Daraktchieva Z, Miles JC, McColl N. Radon, the lognormal distribution and deviation from it. *J. Radiol. Prot.* 2014;34(1): 183–90.
- 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;28(3): 293–302.
- Jimenez R, Hidalgo M, Klimek P. Supplementary Materials for Testing for voter rigging in small polling stations. *Sci. Adv.* 2017;3: e1602363. – Available from: <https://advances.sciencemag.org/content/suppl/2017/06/26/3.6.e1602363.DC1> (Accessed: 20 July 2020)
- Cimbala JM. Outliers. – Available from: <https://www.me.psu.edu/cimbala/me345/Lectures/Outliers.pdf> (Accessed: 20 July 2020)
- An American National Standard. Test Uncertainty. ASME PTC 19.1-2005 (Revision of ASME PTC 19.1-1998). New York: The American Society of Mechanical Engineers; 2006: 92.
- Hoaglin DC, Iglewicz B. Fine-Tuning Some Resistant Rules for Outlier Labeling. *J. Am. Stat. Assoc.* 1987;82(400): 1147–9.
- Tukey JW. Exploratory Data Analysis. Addison-Wesley Pub. Co.; 1977: 688.
- Hoaglin DC, Iglewicz B, Tukey JW. Performance of Some Resistant Rules for Outlier Labeling. *J. Am. Stat. Assoc.* 1986;81(396): 991–9.
- McLaughlin MP. Compendium of Common Probability Distributions. 2016; Second Edition, 2.7: 128. – Available from: https://www.causascientia.org/math_stat/Dists/Compendium.pdf (Accessed: 20 July 2020)
- Romanovich IK, Stamat IP, Kormanovskaya TA, Balabina TA, Koroleva NA, Istorik OA, et al. Results of sampling analysis of radon content in preschool and school organizations in the Leningrad region. *Zdorovie naseleniya i sreda obitaniya = Public Health and Life Environment*. 2017;10(295): 46–9. (In Russian)
- Kiselev SM, Zhukovsky MV. Modern approaches to public protection against indoor radon. International regulatory experience. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2014;7(4): 52–5.
- Kiselev SM. Evolution of Approaches of ICRP to the Regulations of Protection of the Population from Radon. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost' = Medical Radiology and Radiation Safety*. 2016;61(2): 70–4. (In Russian)
- Kiselev SM. Formation of modern methodology of the regulation of protection population from radiation with radon. *Gigiena i Sanitaria = Hygiene and Sanitation*. 2017;96(1): 52–6. (In Russian)
- Kiselev SM, Stamat IP, Marennyy AM, Ilyin LA. Provision of the public radiological protection against radon exposure. Challenges and resolutions. *Gigiena i Sanitaria = Hygiene and Sanitation*. 2018;97(2): 101–10. (In Russian)
- Kiselev SM, Marennyy AM, Romanov VV. Radon. Advanced regulatory approaches to public radiation protection. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(2): 94–102. (In Russian)

32. Svetovidov AV, Venkov VA, Stamat IP, Gorsky GA. Protection of buildings from radon: first experiments on the development and implementation of protective measures. In: Scientific and practical conference "Modern problems of radiation safety of the population". St. Petersburg; 2006: 41–4. (In Russian)
33. Svetovidov AV, Venkov VA, Gorsky GA. Experience in radon mitigation in the operating buildings. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2009;2(4): 35–9. (In Russian)
34. European Atlas of Natural Radiation: <https://remon.jrc.ec.europa.eu/About/Atlas-of-Natural-Radiation/Digital-Atlas> (Accessed: 20 July 2020)
35. European Geogenic Radon Map: <https://remon.jrc.ec.europa.eu/About/Atlas-of-Natural-Radiation/Digital-Atlas/Geogenic-radon/Geogenic-radon> Accessed: 20 July 2020)
36. Zhukovsky MV, Yarmoshenko IV. Radon: measurements, doses, risk assessment. Ekaterinburg: UB RAS, Institute of Industrial Ecology; 1997: 231. (In Russian)
37. Utkin VI, Chebotina MYa, Evstigneev AV, Ekidin AA, Rybakov EN, Trapeznikov AV, et al. Radioactive troubles of the Urals. Ekaterinburg: UB RAS; 2000: 93. (In Russian)
38. Burke O, Long S, Murphy P, Organo C, Fenton D, Colgan PA. Estimation of seasonal correction factors through Fourier decomposition analysis – a new model for indoor radon levels in Irish homes. *J Radiol Prot*. 2010 Sep;30(3): 433–43.

Received: June 15, 2020

Albert M. Marennyy – PhD, Head of Laboratory of Natural Sources of Ionizing Radiation, Research and Technical Center of Radiation-Chemical Safety and Hygiene, Federal Medical-Biological Agency, Moscow, Russia. ORCID <https://orcid.org/0000-0001-6142-0234>

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, Russia. E-mail: d.kononenko@niirg.ru) ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1392-1226>

Asima E. Trufanova – Junior researcher, Research and Technical Center of Radiation-Chemical Safety and Hygiene, Federal Medical-Biological Agency, Moscow, Russia.

For citation: Marennyy A.M., Kononenko D.V., Trufanova A.E. Radon survey in Chelyabinsk Oblast, Russia, in 2008–2011. Analysis of spatial variability of indoor radon concentration. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020. Vol. 13, No. 3. P. 51–67. (In Russian). DOI: [10.21514/1998-426X-2020-13-3-51-67](https://doi.org/10.21514/1998-426X-2020-13-3-51-67)