

УДК 546.296:616-006

ЗДОРОВЬЕ НАСЕЛЕНИЯ РАДОНООПАСНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

© 2019 г. ¹Д. В. Никифоров, ¹Л. А. Межова, ²В. В. Кульнев, ³А. М. Луговской, ⁴А. Н. Никанов, ⁵А. Н. Кизеев, ²Е. М. Репина

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный педагогический университет», г. Воронеж; ²ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», г. Воронеж; ³ГОУ ВО Московской области «Московский государственный областной университет», г. Москва; ⁴НИЛ ФБУН «Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья» Роспотребнадзора, г. Кировск; ⁵ФГБУН Полярно-альпийский ботанический сад-институт имени Н. А. Аврорина Кольского научного центра РАН, г. Апатиты

Цель исследования заключается в геоэкологической оценке радоноопасности территории и ее влияния на состояние здоровья населения. *Методы*. В процессе исследования были использованы следующие методы: картографический, геоинформационный, статистический, математического моделирования. Вспомогательные операции осуществлялись с помощью компьютерных программ ArcGIS 9.2, CorelDraw 9.0, Adobe Photoshop 10.0, Macromedia Flash MX, Statistica 10.0. *Результаты*. В статье представлен методический подход к изучению характера территориального распределения радона. Для обеспечения комфортности проживания населения необходим комплексный мониторинг радона, включающий изучение его природного фона, конструкций зданий и показателей онкологической заболеваемости. Анализ геотектонической типологии размещения селитебных территорий дает возможность выявить основные типы населенных пунктов с функциональной доминантой степени их радоноопасности. При оценке риска возникновения онкологических заболеваний важно учитывать отклонения от усредненных соотношений нозологических форм для определения факторов, влияющих на заболеваемость раком легких. Разработан механизм ГИС-контроля территорий, который в сочетании с картографическими моделями дает возможность оперативно определить степень ее радоноопасности. Предложенный в статье методический подход дает возможность выявлять зоны экологического риска для проживания населения с учетом радоноопасности как уже заселенной, так и предполагаемой к заселению территории. Особое внимание уделено селитебным территориям, расположенным на линиях тектонических разломов. *Выводы*. В процессе комплексного анализа радоноопасности территории определена природная составляющая радоноопасности исследуемого региона. Картографический подход выявляет пространственные закономерности проявлений онкозаболеваний и позволяет проводить районирование территории по степени онкологического риска.

Ключевые слова: радон, радоноопасность, экологический риск, онкологические заболевания, комплексный мониторинг, тектоническое строение территории

PUBLIC HEALTH IN RADON-AFFECTED TERRITORIES

¹D. V. Nikiforov, ¹L. A. Mezхова, ²V. V. Kulnev, ³A. M. Lugovskoi, ⁴A. N. Nikanov, ⁵A. N. Kizeev, ²E. M. Repina

¹Voronezh State Pedagogical University, Voronezh; ²Voronezh State University, Voronezh; ³Moscow State Regional University, Mytishi; ⁴Kola Research Laboratory for Occupational Health, Kirovsk; ⁵N. A. Avrorin Polar-Alpine Botanical Garden-Institute of Kola Science Centre RAS, Apatity, Russia

The *aim* of the study is to conduct the geoecological assessment of the territory's radon hazard and its impact on the public health. *Methods*. The following methods were used during the study: cartographic method, geoinformation method, statistical method and mathematical modeling method. Secondary operations were carried out with the computer software Arc GIS 9.2, CorelDraw 9.0, Adobe Photoshop 10.0, Macromedia Flash MX, Statistica 10.0. *Results*. The article presents a methodological approach to studying the geographical distribution of radon. To ensure the quality of life for the population one requires a comprehensive radon monitoring, including the study of its natural background level as well as the area building structures and the rate of cancer related diseases. Analyzing the geotectonic typology of residential areas provides an opportunity to identify the main types of (human) settlements with a focus on their radon hazard level. While assessing the risk of cancer-related diseases and outlining the factors that affect the lung cancer rate it is essential to consider the deviations from the average ratio of nosological forms. One has developed the GIS mechanism to monitor territories, which - if combined with cartographic models - enables to quickly determine their radon hazard level. The suggested methodological approach makes it possible to identify the areas with ecological risk for the inhabitants due to the radon hazard of both populated land and the one to be populated in the future. The increasing emphasis is being laid on the residential areas located on tectonic fault lines. *Conclusions*. The natural background level of radon for the investigated region was identified during the integrated analysis of the territory radon hazard level. The cartographic approach reveals spatial patterns of cancer-related diseases and allows mapping the territory according to the degree of cancer risk.

Key words: radon, radon hazard, ecological risk, cancer-related diseases, comprehensive monitoring, tectonic pattern of a territory

Библиографическая ссылка:

Никифоров Д. В., Межова Л. А., Кульнев В. В., Луговской А. М., Никанов А. Н., Кизеев А. Н., Репина Е. М. Здоровье населения радоноопасных территорий // Экология человека. 2019. № 1. С. 40–50.

Nikiforov D. V., Mezхова L. A., Kulnev V. V., Lugovskoi A. M., Nikanov A. N., Kizeev A. N., Repina E. M. Public Health in Radon-Affected Territories. *Ekologia cheloveka* [Human Ecology]. 2019, 1, pp. 40-50.

Среднее значение годовой эффективной дозы граждан Российской Федерации (РФ) от всех источников ионизирующего излучения в расчете на одного жителя составляет 3,76 мЗв/год. При этом 86,1 % дозы дают природные источники и 13,6 % — медицинское облучение. Наибольшие значения этой величины в 2016 г. имели место в Республике Алтай (7,2 мЗв), Еврейской автономной области (6,6 мЗв), Республике Тыва и Иркутской области (5,7 мЗв). В восьмидесятые годы XX века особую актуальность приобрела проблема канцерогенного воздействия высоких доз ионизирующего облучения на людей в повседневной жизни за счет радона и продуктов его распада. Среднее в расчете на одного жителя РФ значение годовой эффективной дозы облучения населения за счет природных источников по данным за 1998–2016 гг. составляет 3,33 мЗв/год, а для отдельных наиболее облучаемых групп населения — 3–60 и более мЗв/год. Наибольший вклад в суммарную дозу природного облучения россиян (59,50 %) вносит радон [1–3, 6, 7, 11, 12].

Всемирной организацией здравоохранения радон был признан второй по значимости после табакокурения причиной возникновения рака легких. Поэтому в большинстве развитых стран мира, в том числе и в России, стали на государственном уровне приниматься национальные программы по изучению и снижению вредного воздействия радона на здоровье людей. В РФ программа «Радон» была принята в 1994 г. Анализ имеющихся материалов по радоноопасности, связанной с природными и техногенными факторами, воздействующими на человека, считается сложной и недостаточно изученной проблемой, особенно на региональном уровне [4, 5, 9, 15]. До настоящего времени отсутствуют научно обоснованные принципы, приоритеты и механизмы учета факторов влияния радоноопасности в системе комплексного экологического мониторинга. Все это определяет актуальность темы исследования. Выявление закономерностей миграции радона в компонентах природно-антропогенной среды и оценка экологических последствий для населения представляет научно-методологический интерес. Актуальность научных и методических исследований проблемы радоноопасности обусловлена необходимостью прогноза и моделирования миграции радона в системе «человек — окружающая среда». Теоретической и методологической основой работы являются результаты и методы исследований отечественных и зарубежных специалистов в области географии, геологии, геоэкологии [8, 13, 16–18, 20–23, 25–30]. В основу легли результаты исследований, проведенных авторами в Воронежской области в 2006–2017 гг., а также материалы Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Федеральной службы по надзору в сфере природопользования, Федерального государственного унитарного научно-производственного предприятия «Аэрогеология»,

Межрегионального центра по геологической картографии Министерства природных ресурсов и экологии РФ, Федерального государственного унитарного геологического предприятия «Воронежгеология». Материалом для работы послужили данные, полученные в ходе лабораторных экспериментов и полевых работ на территории Воронежской области. Анализ статистических закономерностей пространственного распределения радона проводился на основе научных публикаций по результатам исследований радоновой проблемы на региональном уровне. Целью настоящей работы явилась геоэкологическая оценка радоноопасности территории и ее влияния на состояние здоровья населения.

Методы

Используемая методика измерений имеет ряд недостатков: при составлении выборок в системе регионального мониторинга не учитывается характеристика геологического пространства; не фиксируются такие значимые характеристики конструкций зданий, как наличие подвальных помещений; полученные данные не используются для моделирования распределения радона в исследуемой среде; не учитывается вклад источников водоснабжения в радоновый баланс жилого фонда. Для построения модели радоноопасности региона разработана методика, основанная на разнородных геоэкологических данных, представленная на рис. 1.

Каждый этап этой методики ведет к уточнению картографо-математической модели региона. Первым этапом является составление первичной модели распределения радона для прогнозной оценки первичной модели распределения радона, которая используется для прогнозной оценки радоноопасности территории и оценки объема проведения радонозащитных мероприятий. Данный этап базируется на обработке результатов геохимических, радиологических, инженерно-геологических и санитарно-гигиенических исследований, проведенных на исследуемой территории. Второй этап исследований предусматривает ранжирование территории по степени радоноопасности участков и выявлению тектонических, радиационных, геохимических аномалий. Для проведения этого этапа используются геологические карты пород, выходящих на дневную поверхность, в которых измеряются: плотность потока радона из грунта, концентрация радона в грунтовом воздухе, воздухопроницаемость грунта. На основе наложения данной информации строятся карты степени радоноопасности грунтов. Четвертый этап предусматривает статистический анализ результатов измерений концентрации радона в воздухе жилых строений. Пятый этап представляет комплексный анализ радоноопасности региона. В результате совмещения картографической информации и натурных измерений определяется набор кластеров, каждый из которых характеризуется пространственными границами, свойствами зданий

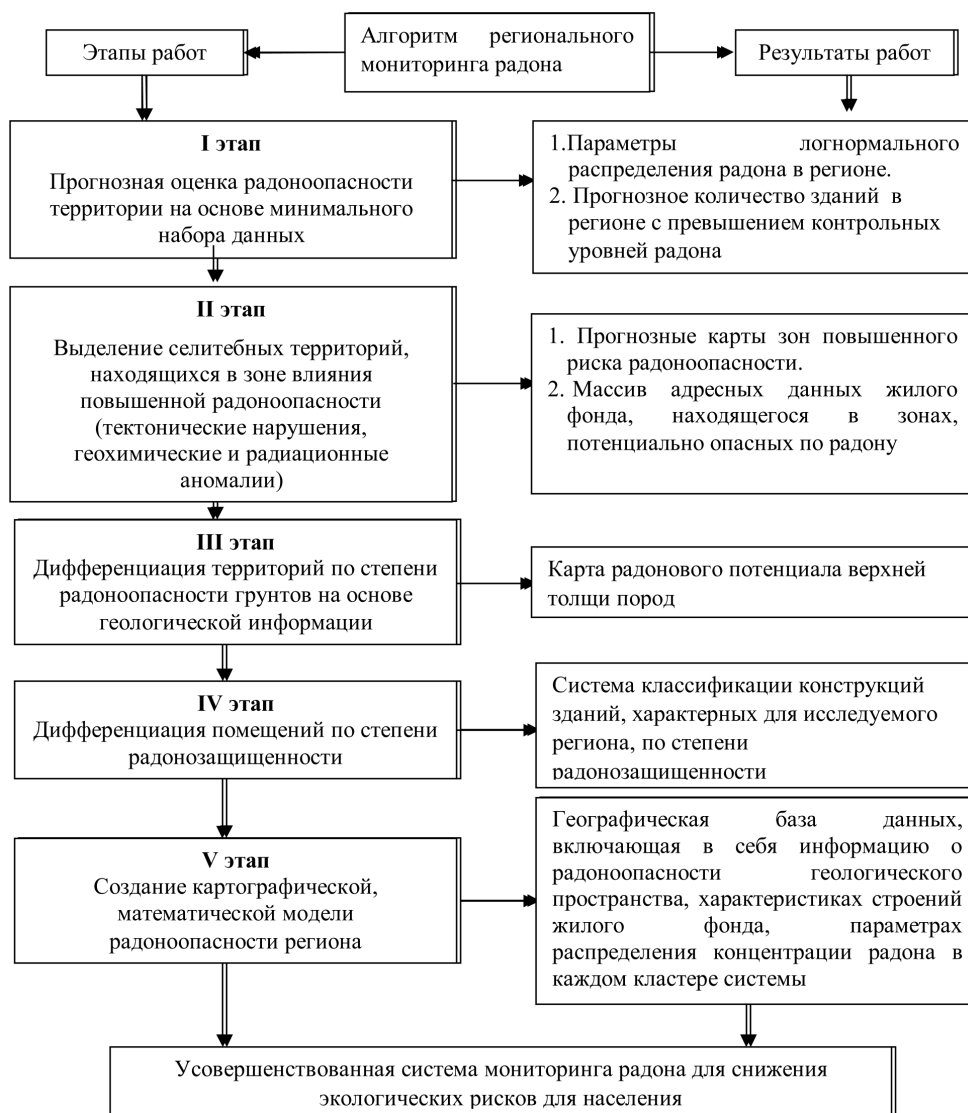


Рис. 1. Алгоритм мониторинга региона на радоноопасность

и параметрами логнормального распределения радона. Уровень концентрации радона в каждом здании в наиболее общем виде является результатом взаимодействия двух факторов: радоноопасности грунтового основания и радонозащищенности здания. Уровень радонозащищенности здания определяется его конструкцией и строительными материалами, которые зависят от природных и социально-экономических условий. Радоноопасность геологического пространства региона зависит от минерального, гранулометрического состава подстилающих горных пород. В результате многочисленных исследований, проведенных в России и во многих странах мира, установлено, что распределение зданий, выбранных случайным образом по величине концентрации радона, близко к логнормальному распределению. Причем чем более однородна выборка по таким показателям, как радоноопасность геологического пространства и радонозащищенность зданий, тем ближе реальное распределение в ней к логнормальному закону.

Плотность логнормального распределения имеет вид:

$$fX(x) = \begin{cases} \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(\ln x - \mu)^2 / 2\sigma^2}, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$$

где μ – параметр масштаба, σ – параметр формы, e – основание натурального логарифма

Сегментация всей совокупности регионального жилого фонда на отдельные кластеры, каждый из которых состоит из жилых помещений, составляющих относительно однородную выборку по сумме факторов геологических условий и конструкций жилых помещений, позволяет получить несколько наборов реальных измерений, удовлетворяющих параметрам логнормального распределения с уровнем значимости 0,05. Таким образом, моделью распределения радона в жилых помещениях на территории региона можно считать «матрицу», каждая ячейка которой представляет собой сочетание геологических условий и характерных для исследованной территории

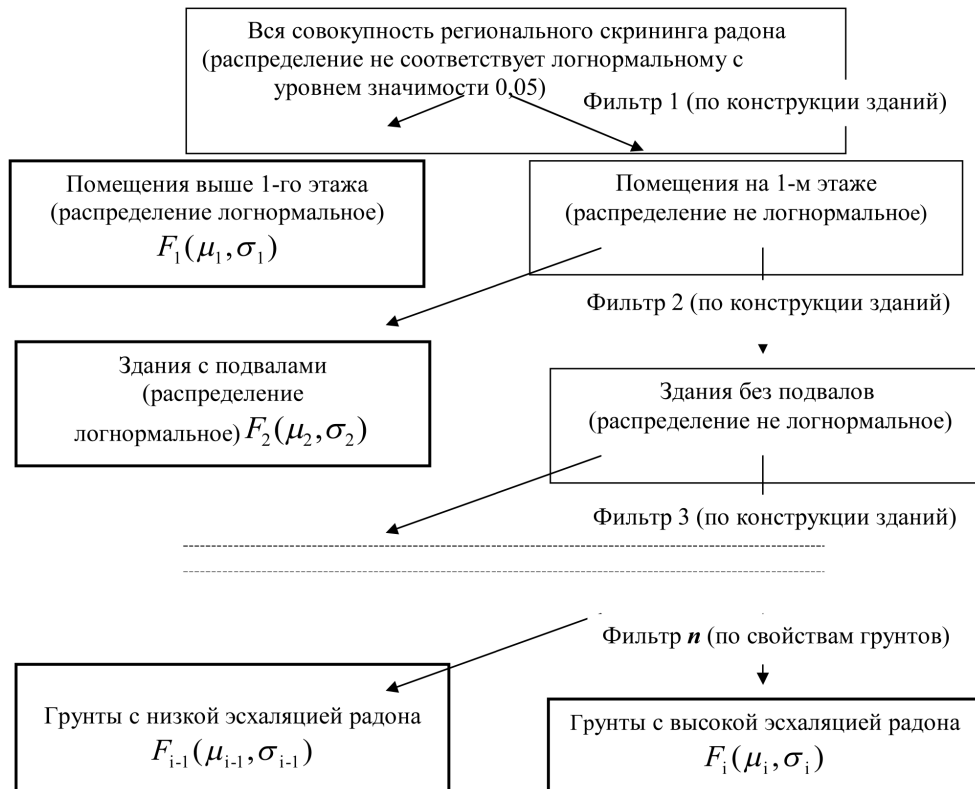


Рис. 2. Алгоритм деления выборки зданий на кластеры до достижения соответствия натуральных измерений логнормальному закону

конструкций зданий, различающихся по степени радонозащищенности, и описывается параметрами собственного логнормального распределения.

Характеристики каждого кластера складываются из следующих составляющих: пространственное положение, конструкция жилых помещений, параметры логнормального распределения. Для получения модели распределения радона в жилых помещениях региона необходимо выявить граничные условия каждого кластера и определить параметры логнормального распределения, характеризующего каждый кластер. Приемлемыми результатами кластеризации регионального распределения можно считать уровень, при котором результаты реальных измерений в каждом кластере настолько близки к логнормальному распределению, чтобы удовлетворять статистическим критериям (с уровнем значимости 0,05).

Наиболее значимыми факторами, оказывающими влияние на концентрацию радона и, таким образом, являющимися «фильтрами» для сегментации выборки, являются следующие параметры: этаж, на котором расположено помещение; наличие подвала в здании; материал, из которого изготовлены строительные конструкции; радоноопасность грунтового основания. Последний из перечисленных факторов позволяет делить выборку по границам залегания разных типов пород, различающихся по следующим параметрам: генезис, минералогический состав, гранулометрический состав, возраст. Алгоритм деления выборки представлен на рис. 2.

В каждом регионе существуют жилые постройки, находящиеся в зонах радоновых аномалий различного генезиса. Наиболее часто встречающиеся аномалии – участки нарушений сплошного залегания горных пород. Такие участки территории необходимо выделять в отдельный кластер, чтобы не исказить результаты исследования в том кластере, в который «вкраплена» аномальная зона, а с практической точки зрения участки аномально высокой эсхалации радона из почвы должны обследоваться особенно тщательно, так как вероятность обнаружения в их пределах помещений с высоким содержанием радона существенно выше. Локализация таких зон выполняется на основе геологической и геохимической информации с использованием ГИС-технологий. На основе статистического анализа результатов измерений по России и зарубежным странам разработан алгоритм прогнозной оценки радоноопасности территории. Он базируется на представлении о том, что распределение радона в зданиях близко к логнормальному виду. Для оценки μ распределения необходимо использовать усредненную величину, полученную на основании информации об имеющихся замерах на данной территории, средней величине гамма-фона, содержанию радона в почвенном воздухе, плотности потока радона из грунтов, содержанию радия и/или урана в почве. Получены корреляционные зависимости содержания радона в домах и некоторых вышеперечисленных косвенных прогнозных данных (табл. 1).

Таблица 1
Усредненные показатели измерений на территории России и ряда европейских стран

Косвенные показатели	(AM) Среднее арифметическое ОА Rп в зданиях, Бк/м ³	(GM) Среднее геометрическое ОА Rп в зданиях, Бк/м ³
γ-фон территории нЗв/ч, (γ)	AM ≈ 0,766 × γ – 6,9592	GM ≈ 0,5004 × γ – 4,5458
ППР из грунта, (мБк/м ² с)	AM ≈ 3,0984 × ППР + 2,5169	GM ≈ 2,0239 × ППР + 1,6441

Таблица 2
Эмпирические соотношения прогнозных показателей радоноопасности грунта

Зависимая величина	Зависимость	Страна, год
ППР, мБк/(м ² с) ОА радона в почвенном воздухе, кБк/м ³ , (ОА _{почв})	ППР ≈ 1,223 × ОА _{почв}	Россия, 2008
ОА радона в почвенном воздухе, кБк/м ³ (ОА _{почв}) Среднегодовая ОА радона в домах, Бк/м ³ , (ОА _{внутр})	ОА _{внутр} ≈ 0,9771 × ОА _{почв} + 20,5	Германия, 2006
	ОА _{внутр} ≈ 6,559 × ОА _{почв} – 75,825	Хорватия, 2006
	ОА _{внутр} ≈ 6,1555 × ОА _{почв} – 2,9925	Испания, 2008
	ОА _{внутр} ≈ 0,2786 × ОА _{почв} + 35,429	Германия, 2009
	ОА _{внутр} ≈ 4,9769 × ОА _{почв} + 35,473	Чехия, 2010
ППР, Бк/(м ² ч), (X) γ-фон территории, нЗв/ч, (γ)	X ≈ 0,89 × γ - 0,11	Германия, Швейцария, 2007

Для этого нами были использованы эмпирические соотношения, полученные в ряде европейских стран

на основе проведенных измерений (табл. 2) [10, 19, 24]. Поэтому на этапе оценочных работ можно использовать его математическое ожидание. Полученные зависимости использовались нами в прогнозной оценке радоноопасности Воронежской области. Результаты анализа параметров региональных выборок показывают, что значение σ распределения в них колеблется в довольно узком интервале. Нами был сделан статистический анализ результатов измерений, выполненных в рамках национальных радоновых программ 26 стран мира (рис. 3).

Результаты

В результате анализа было получено значение σ = ln (GSD) = 0,820 231 769, которое в дальнейшем использовалось в определении степени радоноопасности Воронежской области. Отклонения результатов реальных измерений от логнормального закона в области низких значений объясняются преобладанием в этом интервале таких факторов, как концентрация радона во внешнем воздухе на данной территории, эсхалация радона из строительных материалов, а также погрешности средств измерений в областях, близких к нижнему порогу рабочего диапазона. В области высоких концентраций отклонения от предполагаемого распределения обусловлены нахождением зданий в местах «радоновых аномалий» различного генезиса. Поэтому после определения параметров распределения на всей исследуемой территории необходимо произвести корректировку для области высоких значений. Для определения параметров корректировки проанализировали расчетные и полученные в результате измерений значения распределений в диапазонах объемной активности (ОА) радона 200–400 Бк/м³ и более 400 Бк/м³ (рис. 4).

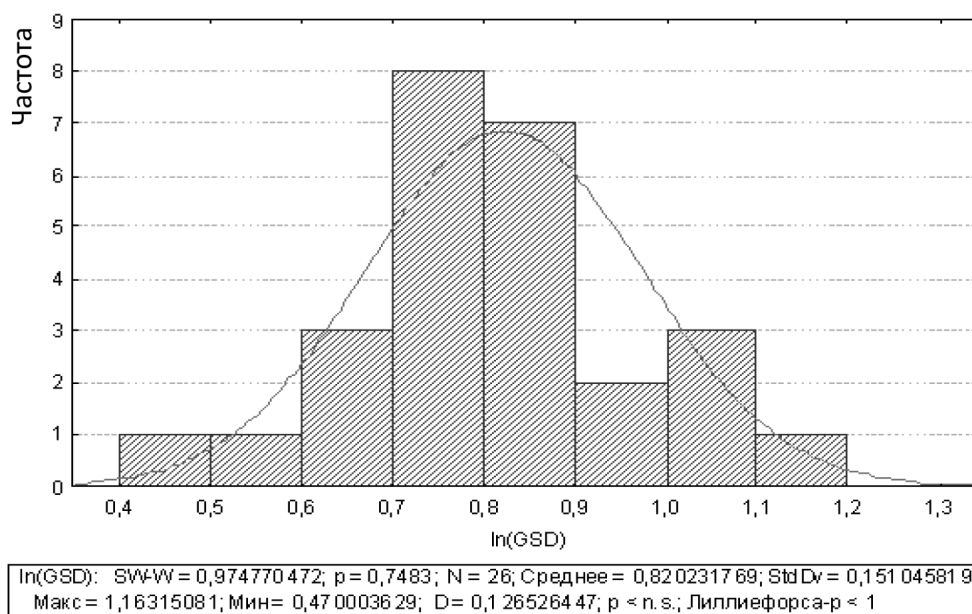


Рис. 3. Гистограмма частот параметра формы (σ) по результатам измерений в 26 странах (GSD – стандартное геометрическое отклонение)

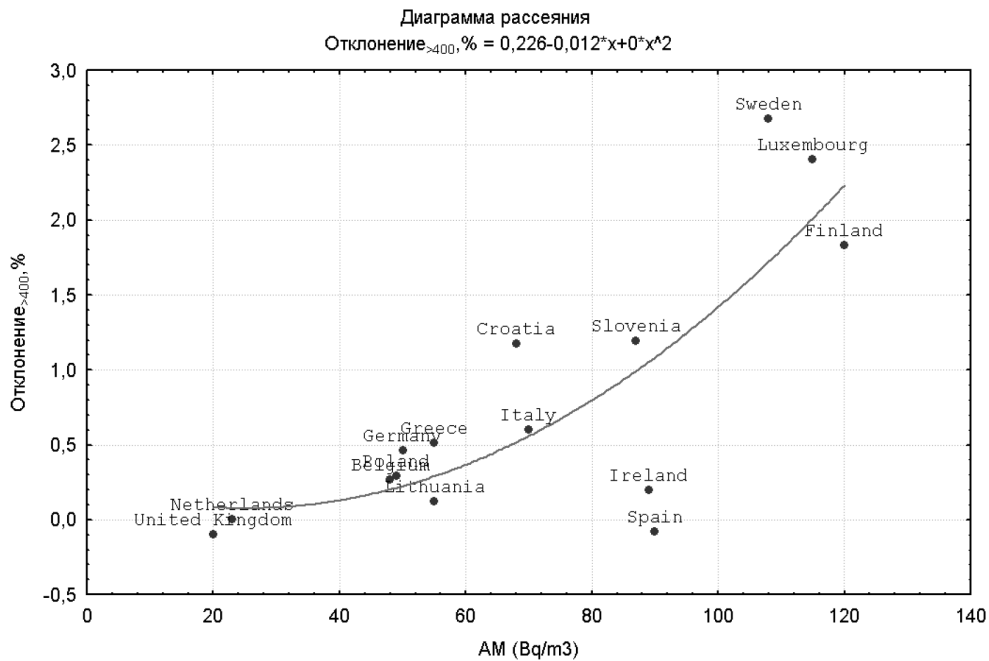


Рис. 4. Отклонение результатов измерений радона от логнормального распределения в области высоких содержаний

В области 200–400 Бк/м³ не выявлено закономерностей отклонения реальных измерений от теоретического тренда. В области значений более 400 Бк/м³ наблюдается статистически значимое увеличение разницы между расчетными и «измеренными» значениями с ростом средней величины концентрации радона в зданиях. Необходимо отметить, что в регионах с небольшой средней концентрацией радона 20–23 Бк/м³ рассмотренный эффект отсутствует.

Таким образом, усовершенствованная комплексная методика проведения мониторинга позволяет: повысить эффективность геоэкологических исследований по выявлению территорий радонового риска, обусловленного зонами влияния тектонических разломов; разрабатывать прогнозные математические модели радоноопасности региона на основе минимального количества данных. Предлагаемый подход позволяет усовершенствовать систему регионального мониторинга радона.

На основе методики геоэкологической типизации радоноопасности регионов был проведен анализ территории Воронежской области. Произведена оценка распределения зданий по содержанию в них радона. Материалом для определения параметров логнормального распределения стали данные обследований, проведенные учреждениями Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Роспотребнадзор), уровень гамма фона и полевые исследования авторов (результаты измерений плотности потока радона из грунтов, преобладающих на территории области). Измерения плотности потока радона (ППР) из грунтов выполнялись с помощью прибора РРА-01М и пробоотборного устройства методом «закрытой камеры». Результаты измерений представлены в табл. 3.

Общее количество проведенных замеров – 512. Средневзвешенное значение ППР (с учетом доли территории, занимаемой каждым из видов отложений) составляет 8,22 мБк/м²с. Значение среднего геометрического содержания радона в зданиях, соответствующее этой величине, – 28 Бк/м³.

Среднее геометрическое значение ОА радона в

Таблица 3
Результаты измерений плотности потока радона из различных типов грунтов на территории Воронежской области

Количество измерений	Среднее арифметическое, мБк/м ² с	Диапазон значений, мБк/м ² с	Стандартное отклонение	Доля площади территории области, занимаемая видом отложений, %
Субаэральные образования, делювиальные отложения склонов и аллювиально-делювиальные выполнения древних балок, нижнее звено неоплейстоцена (суглинки с горизонтами погребенных почв 3–6 м), верхнее звено неоплейстоцена (суглинки с горизонтами погребенных почв 1–5 м)				
160	8,1	4–47	7,5	54
Аллювиальные отложения голоцена (пески, суглинки, до 20 м), аллювиальные отложения надпойменных террас верхнего и среднего звена неоплейстоцена (пески, суглинки, глины. Обычно до 25 м)				
128	5,8	2–42	7,4	33
Делювиальные отложения склонов и аллювиально-делювиальные выполнения древних балок (Суглинки. До 25 м)				
80	13,4	6–21	5,8	6
Субаэральные образования городской серии (Суглинки с горизонтами погребенных почв, иногда песков и глин. До 8 м)				
80	16,7	5–56	13,2	6
Дочетвертичные отложения				
64	10,1	6–16	3,5	1

строениях Воронежской области, по результатам измерений Роспотребнадзора в 2009 г., составляет 25,857 48 Бк/м³. Средняя величина гамма-фона в области около 90 нЗв/ч (10 мкР/ч). Значение среднего геометрического концентрации радона в зданиях при таком гамма-фоне составляет около 40,5 Бк/м³. Значение среднего геометрического содержания радона в зданиях, рассчитанное как усредненный показатель по гамма-фону, данным ППР и ОА радона в жилых домах, составляет 31,5 Бк/м³. То есть параметр μ распределения радона в зданиях области равен 3,434. В качестве параметра σ логнормального распределения радона в зданиях используем значение, полученное по выборке 26 стран мира $\sigma = 0,820\ 231\ 769$. Результаты расчетов приведены в табл. 4. В связи с тем, что значение среднего арифметического менее 40, корректировка распределения в области высоких концентраций не требуется.

радонобезопасным регионам. Расчетное число жилых помещений с превышением допустимого уровня ОА радона составляет около 0,1 %.

На основе анализа геологической информации проведено «выделение» зон повышенного риска в местах влияния тектонических разломов.

Наибольшая плотность зон влияния тектонических разломов наблюдается вдоль долин рек Дон и Хопер. Наиболее крупные участки повышенной плотности находятся в Лискинском, Острогжском, Новохоперском, Грибановском, Павловском и Хохольском районах. В этих районах степень повышенной радоноопасности необходимо учитывать при планировании строительства объектов промышленного и гражданского назначения (рис. 5).

Определена длина разломов, пересекающих населенные пункты. На основании этих значений рассчитано количество домов индивидуальной застройки, которые могут находиться в местах локализации радоновых аномалий. Это позволяет выявлять строения с высоким содержанием радона. Наибольшая длина участков пересечения разломными зонами селитебных территорий наблюдается в Лискинском и Павловском районах. Проведен анализ заболеваемости раком легких (РЛ) и другими формами злокачественных новообразований (ЗНО) на территории Воронежской области [14]. По заболеваемости РЛ наиболее сложная ситуация сложилась на севере и северо-западе области. Заболеваемость ЗНО отражает общее экологическое состояние окружающей среды. Существенное повышение уровня заболеваемости какой-либо нозологической формой по сравнению

Таблица 4
Результаты прогнозных расчетов радоноопасности Воронежской области

Доля жилых помещений Воронежской области, превышающих контролируемые уровни, %			
Уровень ОА радона, Бк/м ³	$\sigma = 0,82$	Min $\sigma = 0,47$	Max $\sigma = 1,16$
>400	0,08	0,00	1,27
200-400	0,95	0,00	3,81

Обсуждение результатов

По результатам первого этапа обследования можно сделать вывод, что Воронежская область относится к

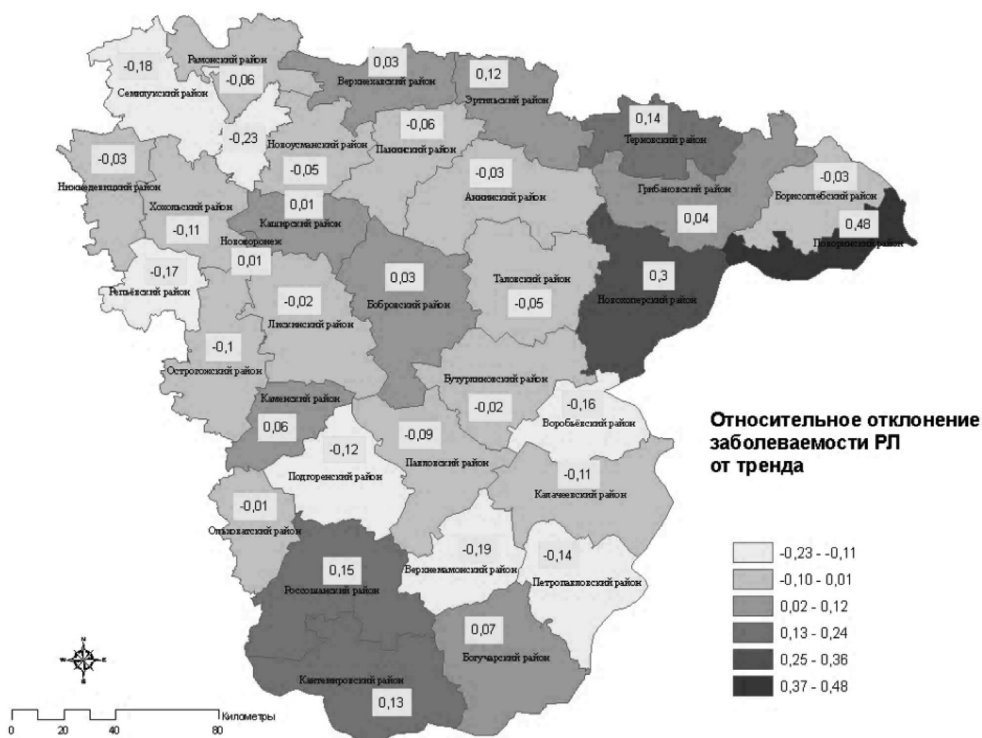


Рис. 5. Отклонение от усредненного соотношения заболеваемости раком легкого и остальных форм онкологических заболеваний

с остальными формами ЗНО означает присутствие канцерогенного фактора или суммы факторов, специфически воздействующих на определенную систему человеческого организма. С этой точки зрения мы дифференцировали районы Воронежской области по степени отклонения заболеваемости РЛ от среднего уровня.

Для этого проанализировали такие показатели, как заболеваемость РЛ, заболеваемость всеми остальными формами ЗНО, и отношение этих значений. Отношение заболеваемости РЛ к остальным форм онкологических заболеваний растет пропорционально РЛ. Для определения степени отклонения заболеваемости РЛ в районах области от общей тенденции рассчитали относительное отклонение реальных значений от линии регрессии.

Было выявлено, что в ряде районов заболеваемость РЛ намного превосходит динамику других форм ЗНО (см. рис. 5). На общем фоне особенно выделяются показатели Поворинского и Новохоперского районов. Существенные отклонения от общего тренда говорят о том, что на общем фоне канцерогенных факторов в этих районах наблюдается негативное воздействие на органы дыхательной системы. В северо-восточных районах области отклонения можно объяснить влиянием Хоперского тектонического разлома. В южных районах негативное влияние может оказывать перенос загрязнителей с территории Донбасса.

Таким образом, изучение радоноопасности Воронежской области выявило зоны геоэкологического риска для проживания населения по линии Хоперского тектонического разлома и по долине реки Дон. Неглубокое залегание докембрийского фундамента и выход его на поверхность также усиливает радоноопасность территории.

В пределах области у ст. Лиски имеется месторождение радоновых вод, на базе которого создан курорт по лечению различных видов заболеваний, где отмечена позитивная роль радона. Наряду с другими факторами радоноопасность территории отражается на здоровье населения, и особенно на онкологических заболеваниях органов дыхания. Благодаря своим химическим, физическим и радиоактивным свойствам радон является уникальным естественным трассером различных процессов, происходящих в природе. Во-первых, образование радона происходит с постоянной скоростью, зависящей только от содержания радия в материнской породе, и подчиняется закону радиоактивного распада. Во-вторых, являясь химически инертным элементом, радон не вступает в химические реакции в естественных условиях. То есть набор факторов, определяющих транспортировку радона, ограничен только физическими процессами. В-третьих, радиоактивные свойства и отсутствие химических связей существенно упрощают задачу по определению содержания радона в среде. В-четвертых, сравнительно короткое время жизни

(период полураспада 3,8 дня) позволяет получить дополнительный источник данных для понимания динамики исследуемых процессов и получать скорости продвижения потоков вещества.

На основе проведенных исследований получены следующие выводы:

1. Комплексный геоэкологический мониторинг радоноопасности территории следует рассматривать как основной методологический подход в изучении характера территориального распределения радона.

2. При комплексном мониторинге радона необходимо учитывать природный фон, конструкцию зданий и показатели онкологической заболеваемости населения как основные элементы, влияющие на условия жизнедеятельности населения.

3. Разработан механизм ГИС-контроля радоноопасности территорий, который в сочетании с картографическими моделями позволяет оперативно определить степень комфортности проживания населения.

4. Геотектоническая типология размещения селитебных территорий позволяет выделить три основных типа населенных пунктов с функциональной доминантой степени радоноопасности.

5. Для комплексной оценки территории на радоноопасность необходима организация регионального банка данных.

6. При изучении рисков возникновения онкологических заболеваний важно учитывать отклонения от усредненных соотношений нозологических форм для выявления факторов, влияющих на заболеваемость раком легкого.

7. В зонах повышенного риска радоноопасности необходима организация длительного мониторинга на селитебных территориях.

Авторство

Никифоров Д. В. осуществил получение, анализ и интерпретацию данных; Межова Л. А. существенно переработала статью на предмет важного интеллектуального содержания; Кульнев В. В. внес существенный вклад в концепцию и дизайн исследования и подготовил первый вариант статьи; Луговской А. М. окончательно утвердил присланную в редакцию рукопись; Никанов А. Н. внес существенный вклад в медицинскую часть концепции исследования; Кизеев А. Н. внес существенный вклад в анализ и интерпретацию данных; Репина Е. М. участвовала в анализе данных.

Авторы подтверждают отсутствие конфликта интересов.

Никифоров Даниил Владимирович — ORCID 0000-0001-6003-2838

Межова Лидия Александровна — SPIN 1138-3964; ORCID 0000-0002-6652-5120

Кульнев Вадим Вячеславович — SPIN 4358-6260; ORCID 0000-0002-1646-9183

Луговской Александр Михайлович — SPIN 4623-6112; ORCID 0000-0002-3985-4535

Никанов Александр Николаевич — SPIN 6838-5002; ORCID 0000-0003-3335-4721

Кизеев Алексей Николаевич — SPIN 8211-7583; ORCID 0000-0002-8689-7327

Репина Елена Михайловна — SPIN 2909-7492; ORCID 0000-0001-6433-8754

Список литературы

1. Алиев Ч. С., Фейзуллаев А. А., Багирли Р. Д., Махмудова Ф. Ф. Распределения радона в зданиях и геологической среде на территории Азербайджана // Геориск. 2016. № 4. С. 34–43.
2. Бакаева Н. В., Калайдо А. В. Механизмы поступления радона в здания и сооружения // Строительство и реконструкция. 2016. № 5 (67). С. 51–59.
3. Бобров А. А. К вопросу о сейсмической активности и поле радона в Приольхонье (Западное Прибайкалье) // Известия Сибирского отделения РАН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2016. № 3 (56). С. 76–85.
4. Бубенчиков А. А., Теддер Ю. Р., Гудков А. Б., Сухомлинов Ю. А., Сухарев А. В., Бубенчикова В. Н., Сухарев А. В. О содержании радионуклидов в некоторых растениях в зависимости от загрязнения внешней среды // Экология человека. 1995. № 2. С. 162–166.
5. Карпин В. А., Кострюкова Н. К., Гудков А. Б. Радиационное воздействие на человека радона и его дочерних продуктов распада // Гигиена и санитария. 2005. № 4. С. 13–17.
6. Кизеев А. Н., Жиров В. К., Ушамова С. Ф., Коклянов Е. Б., Никанов А. Н., Кульнев В. В., Базарский О. В. Экогеосистемы горнодобывающего класса северо-запада Восточно-Европейской платформы (Мурманская область) // Экологическая геология крупных горнодобывающих районов Северной Евразии: коллективная монография / под ред. проф. И. И. Косиновой. Воронеж, 2015. С. 282–326.
7. Козлова Е. А., Юрков А. К. Отражение последовательных сейсмических событий в поле объемной активности радона // Уральский геофизический вестник. 2016. № 1 (27). С. 35–39.
8. Магомедова А. Ш., Езимова Ю. Е., Удоратин В. В. Разнотипные разломы Среднего Тимана и Печоро-Колвинского авлакогена в поле радона // Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента: сб. материалов 24-й науч. конф. Института геологии Коми НЦ УрО РАН. Сыктывкар, 2015. С. 112–114.
9. Никифоров Д. В., Межова Л. А. Геоэкологическая оценка радоноопасности территории Воронежской области // Проблемы региональной экологии. 2012. № 3. С. 54–57.
10. Никифоров Д. В., Межова Л. А. Преимущества радона как трассера природных процессов при геоэкологических исследованиях // Естественные и технические науки. 2009. № 6. С. 434–436.
11. Онищенко Г. Г., Попова А. Ю., Романович И. К., Барковский А. Н., Кормановская Т. А., Шевкун И. Г. Радиационно-гигиеническая паспортизация и ЕСКИД — информационная основа принятия управленческих решений по обеспечению радиационной безопасности населения Российской Федерации. Сообщение 2. Характеристика источников и доз облучения населения Российской Федерации // Радиационная гигиена. 2017. Т. 10, № 3. С. 18–35.
12. Семченко М. И., Трифонова Т. А., Ширкин Л. А. Оценка объемной активности радона в воздухе помещений на примере города Владимира // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2015. Т. 17, № 4–5. С. 972–976.
13. Филиппов В. А., Дмитриев Э. М. Анализ результатов одновременных измерений объемной активности радона

разными приборами // Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН: тезисы докладов и программа конференции / Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук. 2016. С. 71.

14. Чевардов Н. И. Первичная заболеваемость злокачественными новообразованиями населения Воронежской области // Врач. 2018. № 8. С. 52–53.

15. Юнусов М. М., Разыков З. А., Муртазаев Х. Эксхалляция радона из радиоактивных хвостохранилищ северного Таджикистана // XXI век. Техноферная безопасность. 2016. Т. 1, № 3 (3). С. 93–99.

16. Barlesi F., Doddoli Ch., Chetaille Br., Torre J.-Ph. et al. Survival and postoperative complication in daily practice after neoadjuvant therapy in resectable stage IIIA-N2 non-small cell lung cancer // Interact Cardiovasc Thorac Surgery. 2003. Vol. 2. P. 558–563.

17. Dulaiova H., Peterson R., Burnett W. C., and Lane-Smith D. A multi-detector continuous monitor for assessment of ²²²Rn in the coastal ocean // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2005. Vol. 263 (2). P. 361–365.

18. Jeremic Br., Machtay M. Concurrent radiochemotherapy in the treatment of locally advanced non-small cell lung cancer // Hematol Oncol Clin N Amer. 2004. Vol. 18. P. 91–101.

19. Kizeev A. N. Accumulation of radionuclides in natural objects in central part of Murmansk region // European Journal of Natural History. 2015. N 2. P. 67–68.

20. Miklyaev P., Petrova T., Klimshin A. V. The map of radon hazard of Moscow // Engineering Geology for Society and Territory. Vol. 5. Urban Geology, Sustainable Planning and Landscape Exploitation, 2015. P. 919–922.

21. Nikanov A., Anfalova G., Tchachtchine M., Bykov V. Radon and population health in the mountain area of the Kola Peninsula. The Third International Conference on Environmental Radioactivity in the Arctic. Extended abstracts. Tromso, Norway, June 1-5, 1997. Vol. 2. P. 245–246.

22. Parovik R. I. Mathematical modeling of radon sub diffusion into the cylindrical layer in ground // Life Science Journal. 2014. Vol. 11, N 9. P. 281–283

23. Sahu P., Panigrahi D. C., Mishra D. P. A comprehensive review on sources of radon and factors affecting radon concentration in underground uranium mines // Environmental Earth Sciences. 2016. Vol. 75, N 7. P. 617.

24. Schmithüsen D., Levin I., Chambers S., Fischer B., Gilge S., Hatakka J., Paatero J., Kazan V., Ramonet M., Neubert R., Schlosser C., Schmid S., Vermeulen A. A European-wide ²²²Rn and ²²²Rn progeny comparison study // Atmospheric Measurement Techniques. 2017. Vol. 10, N 4. P. 1299–1312.

25. Seminsky K. Z., Bobrov A. A., Demberel S. Variations in radon activity in the crustal fault zones: spatial characteristics // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. 2014. Vol. 50, N 6. P. 795–813

26. Steinitz G., Piatibratova O., Kotlarsky P. Sub-daily periodic radon signals in a confined radon system // Journal of Environmental Radioactivity. 2014. Vol. 134. P. 128–135.

27. Surkov V. V. Pre-seismic variations of atmospheric radon activity as a possible reason for abnormal atmospheric effects // Annals of Geophysics. 2015. Vol. 58, N 5. P. A0554.

28. Vaupotic J., Smrekar N., Žunić Z. S. Comparison of radon doses based on different radon monitoring approaches // Journal of Environmental Radioactivity. 2017. Vol. 169–170. P. 19–26.

29. Yarmoshenko I., Onishchenko A., Zhukovsky M. Establishing a regional reference indoor radon level on the

basis of radon survey data // Journal of Radiological Protection. 2013. Vol. 33, N 2. P. 329–336.

30. Ye Y. J., Ding D. X., Wang L. H., Zhao Y. L., Fan N. B. Inverse method for determining radon diffusion coefficient and free radon production rate of fragmented uranium ore // Radiation Measurements. 2014. Vol. 68. P. 1–6.

References

1. Aliev Ch. S., Fejzullaev A. A., Bagirli R. D., Mahmudova F. F. The distribution of indoor radon and the geological environment on the territory of Azerbaijan. *Georisk* [Georisk]. 2016, 4, pp. 34-43. [In Russian]

2. Bakaeva N. V., Kalajdo A. V. Mechanisms of radon entry into buildings and structures. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya* [Construction and reconstruction]. 2016, 5 (67), pp. 51-59. [In Russian]

3. Bobrov A. A. Seismic activity and radon field in the Priolchonie (West Pribaykalie). *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya RAEN. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenij* [Proceedings of Siberian branch of the Russian Academy of natural Sciences. Geology, prospecting and exploration of ore deposits]. 2016, 3 (56), pp. 76-85. [In Russian]

4. Bubenchikov A. A., Tedder Yu. R., Gudkov A. B., Sukhomlinov Yu. A., Sukharev A. V., Bubenchikova V. N., Sukharev A. V. The content of radionuclides in some plants, depending on environmental pollution. *Ecologiya cheloveka* [Human Ecology]. 1995, 2, pp. 162-166. [In Russian]

5. Karpin V. A., Kostryukova N. K., Gudkov A. B. Human radiation action of radon and its daughter disintegration products. *Gigiena i Sanitarnaya*. 2005, 4, pp. 13-17. [In Russian]

6. Kizeev A. N., Zhiron V. K., Ushamova S. F., Koklyanov E. B., Nikanov A. N., Kufnev V. V., Bazarskiy O. V. Ekogeosistemy gornodobyvaiuschego klassa severo-zapada Vostochno-Evropeyskoy platform (Murmanskaya oblast') [Ecogeosystems of mountain class North-West of East-European area (Murmansk region)]. In: *Ekologicheskaya geologiya krupnykh gornodobyvaiuschikh rayonov Severnoy Yevrazii* [Ecologic geology on the mountain area of North EuroAzia], ed. prof. I. I. Kosinova. Voronezh, 2015, pp. 282-326.

7. Kozlova E. A., Yurkov A. K. Reflection of successive seismic events in the field of radon volume activity. *Ural'skii geofizicheskii vestnik* [Ural Geophysical Bulletin]. 2016, 1 (27), pp. 35-39. [In Russian]

8. Magomedova A. Sh., Ezimova Yu. E., Udoratin V. V. Raznotipnye razlomny Srednego Timana i Pechora-Kolvinskogo avlakogena v pole radona [Different types of faults of the Middle Timan and Pechora-kolvinsk-Avlakogen in the radon field]. In: *Struktura, veshchestvo, istoriya litosfery Timano-Severoural'skogo segmenta. Sbornik materialov 24 nauchnoi konferentsii Instituta geologii Komi NC UrO RAN*. [Structure, substance, history of lithosphere of the Timan-North Ural segment. Collection materials of the 24th scientific conference of the Institute of Geology of Komi NC Uro RAS]. Syktyvkar, Institute of Geology, Komi science center URD RAS, 2015, pp. 112-114.

9. Nikiforov D. V., Mezkhova L. A. Geoeological assessment of the territory of the Voronezh region radon danger. *Problemy regional'noi ekologii* [Problems of regional ecology]. 2012, 3, pp. 54-57. [In Russian]

10. Nikiforov D. V., Mezkhova L. A. Advantages of radon as a tracer of natural processes in geoeological studies.

Estestvennyye i tekhnicheskie nauki [Natural and technical Sciences]. 2009, 6, pp. 434-436. [In Russian]

11. Onishchenko G. G., Popova A. Yu., Romanovich I. K., Barkovsky A. N., Kormanovskaya T. A., Shevkun I. G. Radiation-hygienic passportization and USIDC-information basis for management decision making for radiation safety of the population of the Russian Federation. Report 2: characteristics of the sources and exposure doses of the population of the Russian Federation. *Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene*. 2017, 10 (3), pp. 18-35. [In Russian]

12. Semchenko M. I., Trifonova T. A., Shirkin L. A. Estimation of volume activity of radon in the air of premises on the example of the city of Vladimir. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk* [News of Samara scientific center of the Russian Academy of Sciences]. 2015, 17 (4-5), pp. 972-976. [In Russian]

13. Filippov V. A., Dmitriev Eh. M. Analiz rezul'tatov odnoveremnykh izmerenij ob'yomnoj aktivnosti radona raznymi priborami [Analysis of the results of simultaneous measurements of radon volume activity by different devices]. In: *Nauchnaya konferentsiya molodykh uchennykh i aspirantov IFZ RAN. Tezisy dokladov i programma konferentsii Instituta fiziki Zemli im. O. Yu. Shmidta Rossiiskoi akademii nauk* [Scientific conference of young scientists and postgraduates of IPhE RAS. Abstracts and conference program. Institute of physics of the Earth. O. Yu. Schmidt Russian Academy of Sciences]. 2016, pp. 71.

14. Chevardov N. I. Primary incidence of malignant neoplasms of the population of the Voronezh region. *Vrach* [Doctor]. 2018, 8, pp. 52-53. [In Russian]

15. Yunusov M. M., Razykov Z. A., Murtazaev H. Achalasia of radon from radioactive tailing dumps in Northern Tajikistan. *XXI vek. Tekhnosfernaya bezopasnost'* [Twenty-first century. Technosphere safety]. 2016, 1, N 3 (3), pp. 93-99. [In Russian]

16. Barlesi F., Doddoli Ch., Chetaille Br., Torre J.-Ph. et al. Survival and postoperative complication in daily practice after neoadjuvant therapy in resectable stage IIIA-N2 non-small cell lung cancer. *Interact Cardiovasc Thorac Surgery*. 2003, 2, pp. 558-563.

17. Dulaiova, H., Peterson R., Burnett W. C., and Lane-Smith D. A multi-detector continuous monitor for assessment of ²²²Rn in the coastal ocean. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2005, 263 (2), pp. 361-365.

18. Jeremic Br., Machtay M. Concurrent radiochemotherapy in the treatment of locally advanced non-small cell lung cancer. *Hematol Oncol Clin N Amer*. 2004, 18, pp. 91-101.

19. Kizeev A. N. Accumulation of radionuclides in natural objects in central part of Murmansk region. *European Journal of Natural History*. 2015, 2, pp. 67-68.

20. Miklyaev P., Petrova T., Klimshin A. V. The map of radon hazard of Moscow. In the book: *Engineering Geology for Society and Territory*. Vol. 5. Urban Geology, Sustainable Planning and Landscape Exploitation, 2015, pp. 919-922.

21. Nikanov A., Anfalova G., Tchachtchine M., Bykov V. Radon and population health in the mountain area of the Kola Peninsula. The Third International Conference on Environmental Radioactivity in the Arctic. Extended abstracts. Tromso, Norway, June 1-5, 1997, vol. 2, pp. 245-246.

22. Parovik R. I. Mathematical modeling of radon sub diffusion into the cylindrical layer in ground. *Life Science Journal*. 2014, 11 (9), pp. 281-283.

23. Sahu P., Panigrahi D. C., Mishra D. P. A comprehensive review on sources of radon and factors affecting radon concentration in underground uranium mines. *Environmental Earth Sciences*. 2016, 75 (7), p. 617.

24. Schmithüsen D., Levin I., Chambers S., Fischer B., Gilge S., Hatakka J., Paatero J., Kazan V., Ramonet M., Neubert R., Schlosser C., Schmid S., Vermeulen A. A European-wide ^{222}Rn and ^{222}Rn progeny comparison study. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2017, 10 (4), pp. 1299-1312.
25. Seminsky K. Z., Bobrov A. A., Demberel S. Variations in radon activity in the crustal fault zones: spatial characteristics. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2014, 50 (6), pp. 795-813.
26. Steinitz G., Piatibratova O., Kotlarsky P. Sub-daily periodic radon signals in a confined radon system. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2014, 134, pp. 128-135.
27. Surkov V. V. Pre-seismic variations of atmospheric radon activity as a possible reason for abnormal atmospheric effects. *Annals of Geophysics*. 2015, 58 (5), p. A0554.
28. Vaupotič J., Smrekar N., Žunić Z. S. Comparison of radon doses based on different radon monitoring approaches. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2017, 169-170, pp. 19-26.
29. Yarmoshenko I., Onishchenko A., Zhukovsky M. Establishing a regional reference indoor radon level on the basis of radon survey data. *Journal of Radiological Protection*. 2013, 33 (2), pp. 329-336.
30. Ye Y. J., Ding D. X., Wang L. H., Zhao Y. L., Fan N. B. Inverse method for determining radon diffusion coefficient and free radon production rate of fragmented uranium ore. *Radiation Measurements*. 2014, 68, pp. 1-6.

Контактная информация:

Никанов Александр Николаевич — кандидат медицинских наук, заместитель директора — директор филиала Научно-исследовательская лаборатория ФБУН «Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья» Роспотребнадзора, врач-профпатолог

Адрес: 184250, Мурманская область, г. Кировск, пр. Ленина, д. 34

E-mail: krl_s-znc@mail.ru