

Обзор подходов к оценке потенциальной радоноопасности земельных участков

А.С. Васильев, Д.В. Кононенко, Т.А. Кормановская, К.А. Сапрыкин

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

По данным Росстата в последние годы в Российской Федерации отмечается тенденция к росту интенсивности строительства, при этом увеличивается как численность вводимых в эксплуатацию зданий, так и их общая площадь. Проведение оценки потенциальной радоноопасности земельных участков, отводимых под застройку, обеспечивает возможность своевременного включения в проект зданий необходимых инженерно-строительных решений, направленных на предупреждение проникновения радона в воздух помещений или снижение уровня уже поступившего радона при значениях плотности потока радона с поверхности грунта в пределах площади застройки свыше установленных гигиенических нормативов (уровней действия). В статье представлен обзор отечественных и зарубежных подходов к оценке потенциальной радоноопасности земельных участков, проводимой в рамках инженерно-экологических изысканий. Проанализированы действующие нормативные требования к показателям радиационной безопасности земельных участков, отводимых под строительство жилых, общественных и производственных зданий и сооружений в Российской Федерации. Описаны основные недостатки алгоритма определения потенциальной радоноопасности земельных участков, используемого в действующих методических указаниях МУ 2.6.1.2398-08, утвержденных на федеральном уровне уже более 15 лет назад. Представлены критические замечания (неинформативность величины плотности потока радона с поверхности грунта для проектирования противорадионовой защиты здания, отсутствие учета сезонных вариаций плотности потока радона и другие), накопившиеся за прошедшие годы в результате практического применения данного документа. Проанализированы достоинства и недостатки зарубежных подходов к оценке потенциальной радоноопасности территории на основе результатов измерений объемной активности радона в почвенном воздухе, а также сама возможность перехода в отечественном нормировании от величины плотности потока радона с поверхности грунта к величине объемной активности радона в почвенном воздухе. Рассмотрены некоторые рациональные предложения коллективов специалистов из различных профильных организаций по усовершенствованию алгоритма определения потенциальной радоноопасности земельных участков.

Ключевые слова: радон, плотность потока радона, объемная активность радона, радон в почвенном воздухе, радиационный контроль, инженерно-экологические изыскания, земельные участки, угольные адсорберы, открытая накопительная камера.

Введение

В конце XX века в нашей стране активно проводились работы по внедрению радиационного контроля в практику инженерных изысканий для строительства [1–3]. С 2000 г. нормируемым показателем при оценке потенциальной радоноопасности земельных участков в России^{1,2}, а также в

ряде постсоветских стран (Армения, Белоруссия, Киргизия, Таджикистан)³ является плотность потока радона с поверхности грунта (ППР). При этом нормируемый показатель является по своей сути уровнем вмешательства (действия), а не гигиеническим нормативом [4]. В последние годы во многих субъектах Российской Федерации при обследовании зданий, построенных и введенных в эксплуатацию без

¹ Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010): Санитарные правила и нормы СП 2.6.1.2612-10. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 26.04.2010 № 40 (зарегистрировано в Министерстве юстиции Российской Федерации 11.08.2010, регистрационный № 18115), с изменениями, внесенными постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 16.09.2013 № 43 (зарегистрировано Минюстом России 05.11.2013, регистрационный № 30309). [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 11.08.2010, registration No. 18155), as amended by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 16.09.2013 No. 43 (registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 05.11.2013, registration No. 30309). (In Russ.)]

² Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения: Санитарные правила и нормы СанПиН 2.6.1.2800-10. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Феде-

Васильев Алексей Серафимович

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: a.vasilev@niirg.ru

учета радиационных характеристик территории и применяемых строительных материалов, выявлялись помещения, в которых содержание радона в воздухе превышало установленные гигиенические нормативы [5, 6].

По данным Росстата, с 2015 по 2021 гг. в России отмечается тенденция к росту интенсивности строительства: так в 2021 г. было введено в эксплуатацию 403,1 тыс. зданий, общей площадью 148,4 млн м², тогда как в 2020 г. – 326,7 тыс. зданий, общей площадью 143,4 млн м² [7]. Проведение оценки потенциальной радоноопасности земельных участков в рамках инженерно-экологических изысканий является превентивной мерой, позволяющей на стадии проектирования здания прогнозировать возможное превышение уровня содержания радона в воздухе помещений и, таким образом, избежать дополнительных расходов на радонозащитные мероприятия после окончания строительства, реализация которых по разным (в первую очередь, финансовым) причинам до сих пор остается на низком уровне и является актуальной проблемой обеспечения радиационной безопасности населения России [8–10].

Основной целью настоящего обзора является обобщение и анализ отечественной и зарубежной научной литературы по оценке потенциальной радоноопасности земельных участков для улучшения алгоритма их радиационного контроля в рамках будущей актуализации МУ 2.6.1.2398-08⁴.

Нормативно-методические документы

Общие правила проведения инженерно-экологических изысканий для строительства регламентируются сводом правил СП 502.1325800.2021⁵, в котором использованы ссылки на санитарные нормы и правила по радиационной безопасности: НРБ-99/2009⁶, ОСПОРБ 99/2010, СанПиН 2.6.1.2800-10. В Российской Федерации порядок проведения радиационного контроля земельных участков регламентируется методическими указаниями МУ 2.6.1.2398-08, разработанными ведущими специалистами ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева и других ведомств и организаций.

Так, при отводе земельного участка для строительства

жилых, общественных или производственных зданий или сооружений проведение измерений ППР в пределах контура объекта строительства (при наличии) с помощью угольных адсорберов или накопительных камер является обязательной составляющей инженерно-экологических изысканий. Целью проведения этих измерений является обеспечение возможности своевременного включения в проект здания необходимых инженерно-строительных решений, направленных на предупреждение проникновения радона в воздух помещений (пассивные технологии защиты зданий от радона) или снижение уровня уже поступившего радона (активные технологии) при значениях ППР свыше 80 мБк/(м²·с) для участков, отведенных под строительство жилых и общественных зданий, или 250 мБк/(м²·с) для участков, отведенных под строительство производственных зданий и сооружений [9]. В ряде случаев⁷ требуется определение ППР на отметке заложения подошвы фундамента. При этом важно отметить, что измерения ППР не проводятся под открытыми площадками, навесами и т.п.⁸.

Согласно действующим МУ 2.6.1.2398-08, для дополнительной оценки потенциальной радоноопасности земельных участков могут быть использованы следующие данные:

- объемная активность (ОА) радона в воздухе подвальных помещений или/и помещений первых этажей близлежащих зданий;
- ОА радона в почвенном воздухе на глубине 0,5–1,0 м от поверхности почв и грунтов на территории застройки;
- геологические и геофизические характеристики участка территории (наличие разломов, трещин и пр.);
- удельная активность (УА) ²²⁶Ra в подстилающих породах, определяемая по результатам анализа содержания радионуклидов в керне при проведении буровых работ.

Для прогнозной оценки потенциальной радоноопасности больших площадей (крупных территорий) при составлении региональных программ проведения радиационных обследований коллективом авторов, объединенным ФГУП НТЦ РХБГ ФМБА России, в 2006 г. были разработаны специальные методические рекомендации, которые, к сожалению, не были утверждены в установ-

рации от 24.12.2010 № 171 (зарегистрировано в Министерстве юстиции Российской Федерации 27.01.2011, 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 27.01.2011, registration No. 19587). (In Russ.)]

³WHO Global Health Observatory data repository. Radon database. URL: <https://apps.who.int/gho/data/node.main.RADON05> (Дата обращения: 26.06.2024). [Accessed 26 June 2024].

⁴Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка земельных участков под строительство жилых домов, зданий и сооружений общественного и производственного назначения в части обеспечения радиационной безопасности: Методические указания МУ 2.6.1.2398-08. Утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 02.07.2008 (далее – МУ 2.6.1.2398-08). [Radiation survey and sanitary assessment of land plots for construction of residential, public and industrial buildings and facilities in terms of radiation safety. 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). (In Russ.)]

⁵Инженерно-экологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ: свод правил СП 502.1325800.2021. Утверждены приказом Минстроя России от 16.07.2021 № 475/пр. [Building code SP 502.1325800.2021 "Engineering environmental survey for construction. General regulations for execution of work". Approved by the Order of the Ministry of Construction, Housing and Utilities of Russia of 16.07.2021 No. 475/pr. (In Russ.)]

⁶Нормы 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 № 47 (зарегистрировано в Министерстве юстиции Российской Федерации 14.08.2009, 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 14.08.2009, registration No. 14534). (In Russ.)]

⁷МУ 2.6.1.2398-08, п. 6.10. [МУ 2.6.1.2398-08, §6.10. (In Russ.)]

⁸МУ 2.6.1.2398-08, п. 3.4. [МУ 2.6.1.2398-08, §3.4. (In Russ.)]

ленном порядке на уровне надзорного ведомства⁹.

На обслуживаемых Федеральным медико-биологическим агентством (ФМБА России) территориях при оценке потенциальной радоноопасности земельных участков под строительство жилых, общественных и производственных зданий могут быть использованы методические указания МУ 2.6.1.038-2015¹⁰. Этот документ был утвержден в 2015 г. ФМБА России, который является «федеральным органом исполнительной власти, осуществляющим функции <...> по осуществлению федерального государственного санитарно-эпидемиологического контроля <...> на отдельных территориях России, в том числе на объектах и территориях закрытых административно-территориальных образований, по перечню, утверждаемому Правительством России»¹¹. Таким образом, предназначены эти МУ для применения исключительно на обслуживаемых ФМБА России территориях подведомственными агентствами. Кроме того, как показывает практика, описанный в этих методических указаниях порядок оценки потенциальной радоноопасности земельных участков под строительство, как правило, вызывает серьезные трудности у организаций, занимающихся выполнением инженерно-экологических изысканий, а выполнение требований к объему инженерных изысканий, предусмотренных МУ 2.6.1.038-2015, приводит к значительному увеличению сроков выполнения комплекса изыскательных работ. С одной стороны, если ППР на обследованной площади участка в контрольных точках не превышает уровень действия, то выполнение буровых, лабораторных и аналитических работ представляется излишним. С другой стороны, при превышении уровня действия по показателю ППР отбор проб грунта из пробуренных на участке скважин из разнородных литологических слоев и проведение лабораторных измерений их радиационно-физических характеристик (за исключением почвенно-растительного слоя) оправдан, поскольку полученные данные необходимы для проектирования противорадоновой защиты новых жилых и общественных зданий в соответствии со сводом правил СП 321.1325800.2017¹².

Основные недостатки алгоритма определения потенциальной радоноопасности земельных участков, описанного в МУ 2.6.1.2398-08

Алгоритм оценки потенциальной радоноопасности земельных участков путем проведения измерений ППР в соответствии с действующим методическим документом Роспотребнадзора неоднократно подвергался критике мно-

гими коллективами специалистов из разных профильных организаций [9, 10, 12].

Исходно измерения должны проводиться на дневной поверхности грунта, что автоматически подразумевает допущение о том, что параметры радоноразделения грунтов остаются неизменными по глубине до отметки заложения подошвы фундамента (ведь при подготовке котлована часть верхнего активного слоя грунта удаляется), однако опубликованные результаты исследований [2, 13–17] не подтверждают данную гипотезу. В реальных условиях слои грунта сильно неоднородны по своим физическим характеристикам, УА ²²⁶Ra, могут содержать подземные сооружения, трубопроводы, кабели, иные инженерные коммуникации различного диаметра и даже норы животных (на пустырях), а также разломы и трещины [12, 18, 19]. Глубина котлованов при строительстве современных зданий (например, многоэтажного жилого комплекса с подземной парковкой) может достигать от единиц до десятков метров, доходя до более плотных или наоборот рыхлых пород по сравнению с приповерхностным слоем грунта [18]. Таким образом, по мнению некоторых авторов, проведение измерений ППР на дневной поверхности грунта приводит к недостоверным оценкам радоноопасности участков застройки, а наиболее точную информацию можно получить при проведении измерений ППР на отметке заложения подошвы фундамента [9, 13, 20]. Однако и это не может гарантировать получение 100% достоверной информации, т.к. из-за наличия так называемого стек-эффекта после окончания строительства здания или сооружения значение ППР в пределах контура здания может существенно измениться по сравнению с первоначально измеренным значением в зависимости от конструкции фундамента и его нагрузки на грунт, типа здания и режима его эксплуатации [11, 21]. Кроме того, на практике проведение измерений ППР на отметке заложения подошвы фундамента не всегда осуществимо из-за организационных сложностей, связанных с проведением таких измерений (например, котлован может быть залит водой после интенсивных дождей или из-за поступления грунтовых вод) [1, 21]. Достоинства и недостатки методов определения ППР на дневной поверхности грунта, на отметке заложения подошвы фундамента и другими способами подробно описаны в статье А.М. Маренного [21].

Возможность проводить измерения ППР при промерзании грунтов на глубину не более 0,1 м не развивается далее по тексту МУ 2.6.1.2398-08 в указание заранее удалять слой промерзшего грунта на площадках, подготавливаемых к

⁹ Оценка потенциальной радоноопасности крупных территорий: Методические рекомендации. Утверждены директором ФГУП ИТЦ РХБГ ФМБА России, 2006. [Assessment of potential radon hazard of large areas. Guidelines. Approved by the Director of the Federal State Unitary Enterprise "Research and Technical Center of Radiation and Chemical Safety and Hygiene" of the FMBA of Russia, 2006. (In Russ.)]

¹⁰ Оценка потенциальной радоноопасности земельных участков под строительство жилых, общественных и производственных зданий: Методические указания МУ 2.6.1.038-2015. Утверждены заместителем руководителя ФМБА России, Главным государственным санитарным врачом по обслуживаемым организациям и обслуживаемым территориям 15.05.2015. [Assessment of potential radon hazard of land plots for construction of residential, public and industrial buildings. Guidelines MU 2.6.1.038-2015. Approved by the Deputy Head of the FMBA of Russia, the Chief state sanitary doctor for serviced organizations and serviced territories on 15.05.2015. (In Russ.)]

¹¹ Постановление Правительства РФ от 11.04.2005 № 206 «О Федеральном медико-биологическом агентстве» (ред. от 28.07.2022). [Decree of the Government of the Russian Federation of 11.04.2005 No. 206 "On the Federal Medical-Biological Agency" (as amended on 28.07.2022). (In Russ.)]

¹² Здания жилые и общественные. Правила проектирования противорадоновой защиты: Свод правил СП 321.1325800.2017. Утвержден приказом Минстроя России от 05.12.2017 № 1616/пр. [Building code SP 321.1325800.2017 "Residential and public buildings. Regulations for designing of protection against radon". Approved by the Order of the Ministry of Construction, Housing and Utilities of Russia of 05.12.2017 No. 1616/pr. (In Russ.)]

проведению измерений, а рекомендация по контролю влажности грунтов, которая оказывает основное влияние на значение ППР и его вариабельность, апеллирует к некому «характерному для данной местности состоянию», информация о котором у сотрудников испытательных лабораторий (ИЛ) в подавляющем числе случаев отсутствует, а сама влажность грунта (особенно в приповерхностном слое) в течение суток может варьироваться в широких пределах [14, 18, 20, 22]. Опубликованные научные работы показывают, что с увеличением влажности грунта после выпадения атмосферных осадков или таяния ранее выпавшего снега эксхалляция радона с поверхности грунта снижается практически до нулевых значений из-за увеличения степени заполнения пор водой (влагонасыщенности) и, соответственно, снижения газопроницаемости [9, 14, 16, 23–25].

Еще одним недостатком использования методики определения ППР как критерия радоноопасности участка застройки в соответствии с МУ 2.6.1.2398-08 является отсутствие учета сезонных вариаций измеряемой величины [9]. На одном и том же участке застройки величина ППР может изменяться более чем на порядок на протяжении года в зависимости от сезона и метеорологических условий окружающей среды (температуры воздуха, атмосферного давления) [1, 3, 8, 12, 16, 19, 23, 24, 26–28]. Экспериментальные исследования показали, что среднее значение ППР, измеренное на специально оборудованной («эталонной») площадке в пределах г. Москвы, в теплый период года было в 2,2 раза выше, чем в холодный [29], что подтверждается результатами более поздних исследований других авторов [30, 31]. Кроме того, в работах [32, 33] была описана положительная корреляция изменений значений ППР с изменениями солнечной активности. Таким образом, одно значение ППР, измеренное в произвольный момент времени, зависит от случайной комбинации множества влияющих факторов и не может считаться достоверной оценкой потенциальной радоноопасности, а также служить основанием для принятия решения о реализации мероприятий по защите от радона [1, 2, 9, 10, 18, 21]. Т.е. один и тот же земельный участок в разные моменты времени, в зависимости от случайного сочетания вышеуказанных факторов, может быть классифицирован как «радонобезопасный» для строительства зданий и сооружений любого назначения со средним значением ППР не более 80 мБк/(м²·с) или как «радоноопасный» [8, 14, 16, 25].

В.С. Яковлева отмечает, что при обследовании территорий и определении степени их потенциальной радоноопасности отсутствует также учет суточной вариабельности ППР [23]. Так при выполнении измерений в рабочее (дневное) время, когда, как правило, наблюдаются минимальные значения ППР, результат оценки ППР может быть существенно занижен [23], или наоборот завышен за счет выноса из грунта влаги под действием прямых солнечных лучей, а также при резком и значительном по амплитуде падении атмосферного давления [14]. Кроме того, отсутствует учет

влияния торона и его дочерних продуктов распада (ДПР) (в частности, ²¹²Pb с периодом полураспада 10,6 ч) на результат измерения ППР, что может увеличивать неопределенность измерения в зависимости от уровня содержания ²³²Th в исследуемом материале [3, 34]. Однако результаты экспериментальных и расчетных исследований показывают, что при проведении измерений ППР с помощью угольных адсорберов (например, при использовании Комплекса измерительного для мониторинга радона «КАМЕРА-01» (ЗАО «НТЦ «НИТОН», Россия)) влияние эксхалляции торона на результат измерения незначителен [31].

Также специалистами была отмечена неинформативность показателя ППР, поскольку измеренная величина не дает исходных данных для проектирования противорадной защиты здания [9, 10]. При расчете требуемых радонозащитных характеристик ограждающих конструкций здания в соответствии со сводом правил СП 321.1325800.2017 величина ППР не используется, а наибольшее значение имеют характеристики грунта (УА ²²⁶Ra в грунте на глубине до 6 м от отметки заложения подошвы фундамента, плотность грунта и др.) [9]. Не говоря уже о том, что само численное значение гигиенического норматива по показателю ППР было рассчитано в прошлом столетии с учетом некоторых не оправдавшихся в дальнейшем предположений о механизмах поступления радона в «эталонный дом» [9].

Необходимо также упомянуть, что существующий порядок проведения оценки потенциальной радоноопасности земельных участков подразумевает проведение измерений на ранее неиспользованной территории (на пустырях, бывших землях сельскохозяйственного назначения), не предусматривает возможного наличия на участке каких-либо строений и сооружений, т.е. не принимает во внимание интенсивность современного строительства в условиях плотной городской застройки (особенно в инвестиционно привлекательных районах крупных городов с развитой инфраструктурой) [35].

Кроме того, учитывая современные требования ряда ГОСТов^{13,14}, нуждаются в актуализации некоторые пункты МУ 2.6.1.2398-08, касающиеся оценки неопределенности измерений, представления результатов радиационного контроля и оформления протоколов обследований [4].

Предложения по усовершенствованию алгоритма определения потенциальной радоноопасности земельных участков

В статье А.А. Цапалова с соавторами [31] приводится весомое обоснование преимущества использования при определении потенциальной радоноопасности территорий открытых накопительных камер (НК), заполненных активированным углем массой около 5 г, с длительностью непрерывного экспонирования НК от 3 до 5 ч (т.е., по сути, методики измерений с помощью Комплекса измерительного для мониторинга радона «КАМЕРА-01»), вместо рекомендуемого международным стандартом ISO 11665-7 [36] накопления радона в закрытом контейнере.

¹³ Пункт 7.4 ГОСТ 8.638–2013 «Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение радиационного контроля. Основные положения». Введен в действие приказом Росстандарта от 13.03.2014 № 138-ст. [Interstate Standard GOST 8.638–2013 “State system for ensuring the uniformity of measurements. Metrological ensuring of radiation control. General principles”. Put into effect by the order of Rosstandart of 13.03.2014 No. 138-st. §7.4. (In Russ.)]

¹⁴ ГОСТ 34100.3–2017 «Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения». Введен в действие приказом Росстандарта от 12.09.2017 № 1065-ст. [Interstate Standard GOST 34100.3–2017 “Uncertainty of measurement. Part 3. Guide to the expression of uncertainty in measurement” (ISO/IEC Guide 98-3:2008, IDT). Put into effect by the order of Rosstandart of 12.09.2017 No. 1065-st. (In Russ.)]

С другой стороны, согласно патенту RU 2656131 С1 специалистов из ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» [37], измерения ППР следует проводить в течение 1 ч в контрольных точках (на дне котлована, вырытого под фундамент строящегося здания) на расстоянии 10 м друг от друга с использованием НК с активированным углем. Предложение о проведении измерений ППР в контрольных точках, расположенных по сетке 10×10 м на отметке заложения подошвы фундамента, является, в некотором роде, заимствованием из действующих МУ 2.6.1.2398-08 (требования п. 6.2.2, объединенные с требованиями п. 6.7). Кроме того, предлагаемая в патенте схема проведения измерений – экспонирование НК с активированным углем строго в течение 1 ч и дальнейшее определение ППР на основе результата измерения накопленной в угле активности радона по бета-излучению его короткоживущих ДПР ^{214}Pb и ^{214}Bi – фактически заставляет ИЛ, аккредитованные в установленном порядке на соответствующий вид измерений, использовать в своей деятельности только одно единственное средство измерений (СИ) ППР из нескольких, внесенных в государственный реестр СИ, а именно Комплекс измерительный для мониторинга радона «КАМЕРА-01», причем с ограничением в соответствующей методике выполнения измерений (МВИ) ППР. Данное обстоятельство может быть негативно воспринято участниками рынка услуг по радиологическому обследованию земельных участков.

И.В. Ярмошенко с соавторами из Института промышленной экологии УрО РАН предлагают метод оценки радоноопасности участка с учетом потенциальной адвективной составляющей потока радона из грунта в здание, который позволяет прогнозировать ОА радона в возведенном здании, учитывая его конструкционные характеристики [38–40]. Принимая во внимание преобладание адвективного (конвективного) механизма поступления радона в воздух помещений над диффузионным, особенно в районах с суровыми климатическими условиями из-за стек-эффекта, предложенный метод весьма перспективен, однако не может быть оперативно внедрен в отечественную практику в системе Роспотребнадзора, поскольку необходимое оборудование для активации и измерения адвективной составляющей (накопительная камера, радон-монитор, дифференциальный манометр и др.), как правило, отсутствует в ИЛ ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии» в субъектах РФ, а их закупка потребует весьма значительных финансовых затрат.

Н.К. Рыжаковой с соавторами [41] был предложен подход к оценке степени радоноопасности участков застройки, позволяющий избежать проведения трудоемких измерений ППР, снизить финансовые, материальные и трудовые затраты на строительство, который основывается, в первую очередь, на основных видах грунтов, определяющих «активный» слой в основании фундаментов зданий, а также их физических свойствах. Результаты измерений ППР на поверхности нескольких типов грунтов, а также влажности и $\text{UA } ^{226}\text{Ra}$ представлено в статье [41], однако представляется, что все разнообразие грунтов, встречающихся на территории РФ, учитывая многообразие признаков, лежащих в основе их классификации, с учетом всего диапазона возможных значений влажности и других параметров, превращает задачу по составлению предлагаемой классификации участков в практически невыполнимую.

На необходимости закрепления нормативными доку-

ментами проведения прогнозного расчета среднегодового значения ЭРОА радона в воздухе помещений проектируемого здания на основании конкретных физических характеристик геологического разреза ($\text{UA } ^{226}\text{Ra}$ в породах, коэффициент эманирования пород, коэффициент диффузии радона в породах, ОА радона в почвенном воздухе на глубине нулевых годовых амплитуд и т.п.) было акцентировано внимание в статье П.С. Микляева и Т.Б. Петровой [14].

Для участков без радоновых аномалий в качестве основной характеристики потенциальной радоноопасности территорий П.С. Микляев с соавторами в статье [16] предлагает использовать расчетное ожидаемое среднегодовое значение ППР, рассчитываемое по формуле:

$$\text{ППР}_p = k \cdot \text{P}_{\text{Rn}} = k \cdot A_{\text{Ra}} \cdot K_{\text{em}} \cdot \rho, \text{ Бк/м}^2 \cdot \text{с}$$

где: P_{Rn} – радоновый потенциал грунта, представляющий собой ОА свободного радона в условиях радиоактивного равновесия с радием, Бк/м³; k – коэффициент пропорциональности, имеющий размерность скорости, м/с; A_{Ra} – $\text{UA } ^{226}\text{Ra}$ в грунтах, Бк/кг; K_{em} – коэффициент эманирования; ρ – плотность грунта, кг/м³.

Другие косвенные (расчетные) методы определения ППР подробно представлены и описаны в монографии В.С. Яковлевой [3].

Коллективом авторов из ФГУП «ВИМС» был предложен метод оценки потенциальной радоноопасности территорий по $\text{UA } ^{210}\text{Po}$ и ^{210}Pb в почвах, грунтах и осадочных породах (с радиохимическим выделением определяемых радионуклидов), который представляет собой упрощенную версию изотопно-почвенного метода поисков глубокозалегающих месторождений урана, разработанного В.И. Малышевым и др. в 1984 г. [42].

Для выявления аномальных радоновых полей в рамках оценки потенциальной радоноопасности территорий также был предложен неравновесный изотопный геохимический метод, основанный на оценке отношения $\text{UA } ^{210}\text{Pb}$ (долгоживущего ДПР радона) и ^{226}Ra (материнского по отношению к радону радионуклида) в грунтах, являющегося характеристикой, не зависящей от временных колебаний радонового поля (зависимость от которых является недостатком эманиционных методов) и отражающей наличие постоянно существующего в течение длительного времени восходящего потока ^{222}Rn [2, 15].

Ю.А. Баннов, специалист одной из частных лабораторий, предлагал для оптимизации радиационного контроля при оценке радоноопасности земельных участков в качестве критерия использовать не среднее арифметическое значение ППР, а среднее геометрическое, что сгладило бы влияние единичных аномальных значений (т.н. «факельных выбросов»), в разы превышающих фоновые значения, на конечную интерпретацию полученных результатов [12]. В статьях П.С. Микляева с соавторами [2, 16, 19, 43] подтверждается логнормальное распределение ППР и отмечено, что «факельные выбросы» радона встречаются в любое время года, устойчивы во времени и пространстве и, как правило, не являются результатом случайного совпадения метеорологических условий окружающей среды, а также не связаны с возможными нарушениями методики проведения измерений или с повышенным содержанием ^{226}Ra в приповерхностных слоях грунта (на примере наиболее изученной в настоящее время территории г. Москвы).

Белорусскими специалистами [44, 45] был предложен метод оценки радоновой опасности территории с помощью

комплексного радонового показателя (КРП), позволяющий снизить финансово-временные затраты и сузить площадь исследований до территории потенциальных критических зон радоноопасности, а также достаточно точно прогнозировать значение ОА радона в воздухе закрытых помещений. КРП представляет из себя величину, равную произведению значений таких факторов, как мощность дозы дочернобильского фона (ретроспективные данные из карт), ^{238}U в почве, коэффициент фильтрации почвы, а также глубина залегания первого водоносного горизонта в относительных единицах [44–46].

В последние десятилетия в ряде европейских стран на земельных участках, отводимых под строительство зданий и сооружений, определению подлежит радоновый индекс места застройки (RI). В Чешской Республике радоновый индекс RI рассчитывается на основании результатов измерений ОА радона в почвенном воздухе и прямых измерений газопроницаемости почвы или ее экспертной оценки [47]. Классификация радонового индекса RI на низкий, средний или высокий зависит, в первую очередь, от третьего квартиля распределения полученных значений ОА радона в почвенном воздухе [47].

В Швеции принята классификация земельных участков по трем классам риска в зависимости от величины ОА радона в почвенном воздухе на глубине 1 м, и каждому уровню риска соответствуют свои требования к конструкции здания [48]: низкая радоноопасность (менее 10 кБк/м^3) – специальные требования отсутствуют (“Traditional design”); нормальная радоноопасность (от 10 до 50 кБк/м^3) – требуется радонозащитная конструкция (“Radon-protecting design”); высокая радоноопасность (свыше 50 кБк/м^3) – требуется радононепроницаемая конструкция (“Radon-proof design”). В одних случаях наличие определенных подстилающих пород позволяет предварительно отнести участок к какому-то конкретному классу (например, присутствие в подстилающих породах глинистых (квасцовых) сланцев говорит о высокой радоноопасности, а известняка, песчаника, кварцита – о низкой). В других случаях, когда подстилающие породы представлены, например, гранитами, пегматитами, гнейсами (в том числе в виде морены, гравия или песка разной крупности), такая однозначная классификация невозможна, поскольку влияние на результирующее значение ОА радона в почвенном воздухе оказывает не только ^{226}Ra , для которой в данных породах характерна значительная вариабельность, но и проницаемость конкретной породы и ее эманулирующая способность.

Специалисты из ДВГУПС в результате трехгодичного исследования вариации ОА радона в почвенном воздухе и ППР на экспериментальном полигоне выявили сильную (в 2011 г.) и заметную (в 2012, 2013 гг.) связь между этими величинами [49]. Коллективом других авторов в 2009 г. впервые была установлена квадратичная зависимость между этими величинами: ППР по мере увеличения ОА радона в почвенном воздухе вначале растет, достигая максимальной величины, а затем уменьшается, однако данные выводы были сформулированы на ограниченной выборке геологических сред (только для дикиномовых сланцев и песчано-глинистых отложений) [50]. Имеющиеся данные имеют ограниченный характер и не учитывают всего разно-

образия видов грунтов и горных пород, встречающихся на территории РФ.

Значение ОА радона в почвенном воздухе, полученное при измерении на определенной глубине (например, 0,8 м согласно наиболее известному методу, предложенному чешскими специалистами [47]), может быть как заниженным (при многокомпонентном, не гомогенном составе грунта и наличии толстого верхнего слоя глины), так и завышенным (при наличии в верхнем слое грунта пород, богатых ^{238}U или ^{226}Ra) по отношению к реальной эксхалляции радона с поверхности грунта. Помимо глубины отбора, уровень ОА радона в почвенном воздухе зависит также от газопроницаемости грунта (стандартизованная методика измерения которой отсутствует [41]), размеров полости, из которой проводится отбор, а также от применяемой техники отбора проб [47].

По мнению П.С. Микляева с соавторами, для определения радоноопасности территорий нецелесообразно использовать значение ОА радона в почвенном воздухе на глубине около 1 м, т.к. данный показатель обладает теми же недостатками, что и ППР [18]. Многолетний мониторинг показал наличие сезонной и суточной вариабельности данного показателя (хоть и менее выраженной, чем для ППР [16]): средний уровень ОА радона в почвенном воздухе в холодный период года в 2,5 раза выше, чем в теплый, а в ночное время выше, чем в дневное примерно на 18% (в теплое время года) и 3,8% (в холодное время года), в связи с чем венгерские специалисты предлагают оценивать результат единичного измерения ОА радона в почвенном воздухе с учетом поправки на сезонность [51, 52]. В приповерхностных слоях грунта (на глубине 0,25 и 0,75 м) наблюдаются значительные временные вариации ОА радона, и только на глубине около 3 м она принимает постоянное значение, обусловленное ^{226}Ra [14, 25]. В другой работе [53] показано, что на глубине 1,8 м влияние атмосферного давления на значение ОА радона в почвенном воздухе снижается или вовсе отсутствует.

В статье [10] в рамках обсуждения актуализации ОСПОРБ 99/2010 и гармонизации с международными рекомендациями предлагается отказаться от ограничения ППР на участках застройки и ввести классификацию территорий по степени потенциальной радоноопасности по методике, описанной в МУ 2.6.1.038-2015 ФМБА России.

Таким образом, одномоментный переход в нормировании от величины ППР к величине ОА радона в почвенном воздухе пока что не представляется возможным, поскольку отсутствует единый подход не только к процедуре измерения данного показателя, но и к классификации его значений: иными словами, однозначно не определено, какую ОА радона в почвенном воздухе считать условно нормальной, а какую – повышенной и высокой, что потребует определенных действий со стороны проектной организации и застройщика. Кроме того, в государственном реестре СИ¹⁵ нет оборудования, которое могло бы определять газопроницаемость грунта *in situ*. Также можно отметить, что для измерений ОА радона в почвенном воздухе с помощью некоторых типов СИ зарубежного производства требуются определенные расходные материалы к вспомогательному оборудованию (например, в случае радиометра AlphaGUARD любых модификаций с комплектом «Soil Gas

¹⁵ Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. Утвержденные типы средств измерений. URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4> (Дата обращения: 26.06.2024) [Federal Information Fund for ensuring the uniformity of measurements. Approved types of measuring instruments. Available from: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4> [Accessed 26 June 2024]. (In Russ.)]

Probe» таким расходным материалом являются металлические наконечники пробоотборника, остающиеся после проведения измерения в грунте), поставка которых в условиях нынешней сложной геополитической ситуации весьма затруднительна, а импортозамещение пока не налажено вследствие отсутствия реального спроса.

Заключение

Алгоритм проведения радиационного контроля и санитарно-эпидемиологической оценки земельных участков под строительство жилых домов, зданий и сооружений общественного и производственного назначения, включая определение потенциальной радоноопасности земельных участков, описанный и предложенный впервые на федеральном уровне более 15 лет назад в МУ 2.6.1.2398-08, имеет как свои достоинства, так и недостатки.

Проведенный анализ научной литературы по данной тематике выявил ряд критических замечаний, основными из которых являются следующие:

1) отсутствие в существующем алгоритме оценки потенциальной радоноопасности земельных участков возможности проведения радиационного контроля на производном этапе подготовки участка (когда контура будущей застройки еще не определены; в пределах контуров застройки; на отметке заложения подошвы фундамента);

2) неинформативность величины ППР для проектирования противорадовой защиты здания, с одной стороны, а с другой стороны, отсутствие нормативов на ОА радона в почвенном воздухе, отсутствие единого подхода к ее измерению, а также ее сезонная и суточная вариабельность, сопоставимая с ППР;

3) отсутствие учета сезонных вариаций ППР, зависящих, однако, от случайной комбинации множества влияющих факторов;

4) использование среднего арифметического значения ППР вместо среднего геометрического, несмотря на актуальные научные данные о логнормальном характере распределения значений ППР.

При разработке актуализированного проекта методического документа взамен МУ 2.6.1.2398-08 целесообразно руководствоваться накопившимся за последние годы опытом практического применения данного документа, критическими замечаниями и рациональными предложениями специалистов различных профильных организаций, опытом зарубежных стран, представленных в статье, а также учитывать имеющуюся номенклатуру СИ, внесенных в государственный реестр СИ.

Перспективой дальнейшей разработки темы по оценке потенциальной радоноопасности земельных участков может являться пересмотр численных значений установленных гигиенических нормативов (уровней действия) по величине ППР с учетом текущего уровня научных знаний, а также установление нового норматива (взамен ППР или, скорее, наряду с ним) по величине ОА радона в почвенном воздухе в рамках актуализации санитарных правил.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Васильев А.С. написал черновик рукописи, провел поиск и анализ литературных данных и представил окончательный вариант рукописи для публикации в журнал.

Кононенко Д.В. провел поиск и анализ литературных данных, подготовил английский перевод и отредактировал промежуточный вариант рукописи.

Кормановская Т.А. проанализировала действующие требования к показателям радиационной безопасности земельных участков под строительство жилых домов, зданий и сооружений общественного и производственного назначения и отредактировала промежуточный вариант рукописи.

Сапрыкин К.А. отредактировал промежуточный вариант рукописи.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Работа выполнена в рамках отраслевой научно-исследовательской программы Роспотребнадзора на 2021–2025 гг. «Научное обоснование национальной системы обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия, управления рисками здоровью и повышения качества жизни населения России» по теме: «Разработка и научное обоснование рекомендаций по планированию, организации и внедрению программ по снижению уровней облучения населения от природных источников ионизирующего излучения на уровне субъектов Российской Федерации с целью уменьшения рисков заболеваемости населения злокачественными новообразованиями».

Литература

1. Микляев П.С. «ЧТО ДЕЛАТЬ?» или "радоновый кризис" в радиационных изысканиях (впечатления от прочтения статьи Ю.А. Баннова "Лаборатория радиационного контроля ООО "ГЕОКОН". Два года: опыт работы") // АНРИ. 2005. № 3. С. 60–64.
2. Микляев П.С., Макаров В.И., Дорожко А.Л. и др. Радоновое поле Москвы // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2013. № 2. С. 172–187.
3. Яковлева В.С. Методы измерения плотности потока радона и торона с поверхности пористых материалов: монография. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. 174 с.
4. Кононенко Д.В., Кормановская Т.А., Васильев А.С., Сапрыкин К.А. Новые методические рекомендации по радиационному контролю и санитарно-эпидемиологической оценке жилых, общественных и производственных зданий и сооружений по показателям радиационной безопасности. Часть 1 // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 2. С. 138–147. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-2-138-147.
5. Васильев А.С. Облучение обучающихся и сотрудников детских учреждений Ленинградской области природными источниками излучения. Часть 1: Результаты комплексного радиационного обследования // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 2. С. 65–77. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-2-65-77.
6. Кормановская Т.А., Историк О.А., Романович И.К. и др. Исследование уровней содержания радона в воздухе помещений зданий детских учреждений // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 2. С. 6–20. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-2-6-20.
7. Строительство в России. 2022: Стат. сб. / Росстат. М., 2022. 148 с. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Stroit_2022.pdf (Дата обращения: 26.06.2024).
8. Микляев П.С., Петрова Т.Б., Климшин А.В., Смирнова А.П. Картирование геогенного радонового потенциала (на примере территории Москвы) // АНРИ. 2015. № 1. С. 2–13.
9. Гулябянц Л.А., Калайдо А.В. Противорадовая защита жилых и общественных зданий: монография. Москва; Берлин: Директ-Медиа, 2020. 236 с.

10. Цапалов А.А., Микляев П.С., Петрова Т.Б., Кувшинников С.И. Кризис регулирования радона в России: масштаб проблемы и предложения по исправлению // АНРИ. 2024. № 1. С. 3–29.
11. Маренный А.М., Охрименко С.Е., Павлов И.В. Задачи и методы оценки потенциальной радоноопасности селитебных территорий // АНРИ. 2006. № 2. С. 25–30.
12. Баннов Ю.А. Лаборатория радиационного контроля ООО "ГЕОКОН". Два года: опыт работы // АНРИ. 2005. № 2. С. 54–72.
13. Гулябняц Л.А., Заболотский Б.Ю. Плотность потока радона как критерий оценки радоноопасности // АНРИ. 2004. № 3. С. 16–20.
14. 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.
15. Микляев П.С., Петрова Т.Б., Цапалов А.А., Борисов А.П. Опыт применения изотопного геохимического метода для исследования условий переноса радона к дневной поверхности // АНРИ. 2012. № 1. С. 15–21.
16. Микляев П.С., Маренный А.М., Цапалов А.А., Петрова Т.Б. Комплексные мониторинговые исследования формирования радоновых полей грунтовых массивов. Основные результаты // АНРИ. 2017. № 4. С. 2–22.
17. Охрименко С.Е., Коренков И.П., Микляев П.С. и др. Ранжирование территории Москвы по потенциальной радоновой опасности // Гигиена и санитария. 2017. Т. 96, № 3. С. 211–216. DOI: 10.18821/0016-9900-2017-96-3-211-216.
18. Микляев П.С., Петрова Т.Б., Охрименко С.Е. Новые аспекты оценки радоноопасности территорий строительства на примере Москвы // АНРИ. 2003. № 4. С. 63–71.
19. Микляев П.С., Петрова Т.Б., Маренный М.А. и др. Карта плотности потока радона на территории Москвы // АНРИ. 2012. № 3. С. 15–24.
20. Рыжакова Н.К., Ставицкая К.О., Удалов А.А. Проблемы оценки потенциальной радоноопасности участков застройки // Радиационная гигиена. 2018. Т. 11, № 2. С. 37–44. DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-2-37-44.
21. Маренный А.М. Радон в инженерно-экологических изысканиях для строительства // АНРИ. 2008. № 2. С. 21–28.
22. Баннов Ю.А. ЛРК ООО "Сталкер". 10 лет: опыт работы // АНРИ. 2013. № 4. С. 72–88.
23. Яковлева В.С., Нагорский П.М., Яковлев Г.А. Метод мониторинга плотности невозмущенного потока радона с поверхности грунта // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. 2016. Т. 12, № 1. С. 85–93. DOI: 10.18454/2079-6641-2016-12-1-85-93.
24. Микляев П.С., Петрова Т.Б., Баннов Ю.А., Анисимова Н.Г. Механизмы формирования потока радона с поверхности почв на платформенных территориях (на примере г. Москвы) // Сергеевские чтения. Выпуск 10. Международный год планеты Земля: задачи геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии: матер. годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (Москва, 20–21 марта 2008 г.). М.: ГЕОС, 2008. С. 235–240.
25. Микляев П.С., Маренный А.М., Цапалов А.А., Пенезев А.В. Результаты мониторинга параметров радонового поля на экспериментальных площадках // Евразийский Союз Ученых. 2015. № 1-1 (18). С. 155–159.
26. Климшин А.В., Козлова И.А., Рыбаков Е.Н., Луковской М.Ю. Влияние промерзания поверхностного слоя грунтов на перенос радона // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2010. № 2. С. 146–151.
27. Gavriliev S., Petrova T., Miklyaev P. Factors influencing radon transport in the soils of Moscow // Environmental Science and Pollution Research. 2022. Vol. 29, No. 59. P. 88606–88617. DOI: 10.1007/s11356-022-21919-y.
28. Butkus D., Gagiškis A., Streckytė E., Grubliauskas R. The measuring of radon volumetric activity and exhalation rate in ground-level air // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2013. Vol. 295. P. 1085–1092. DOI: 10.1007/s10967-012-1922-8.
29. Зайцев В.В., Роголис В.С., Кузьмич С.Г. Исследования влияния временных условий на потоки радона на строительных площадках // АНРИ. 2008. № 2. С. 34–36.
30. Белецкая Ю.В., Крупный Г.И., Мамаев А.М., Расцветалов Я.Н. Вариации плотности потока радона с поверхности почвы экспериментального полигона // АНРИ. 2010. № 1. С. 34–37.
31. Tsapalov A., Kovler K., Miklyaev P. Open charcoal chamber method for mass measurements of radon exhalation rate from soil surface // Journal of Environmental Radioactivity. 2016. Vol. 160. P. 28–35. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2016.04.016.
32. Зуевич Ф.И., Довгуша В.В., Шкрабо И.В. и др. Взаимная корреляция солнечной активности и потока радона с поверхности грунтов // Экологические системы и приборы. 2008. № 10. С. 14–16.
33. Маренный А.М., Микляев П.С., Петрова Т.Б. и др. Временные флуктуации плотности потока радона на территории Москвы // АНРИ. 2011. № 1. С. 23–36.
34. Яковлева В.С. Особенности совместного измерения плотности потоков радона и торона с поверхности пористых материалов // АНРИ. 2010. № 4. С. 31–37.
35. Кормановская Т.А., Кононенко Д.В., Сапрыкин К.А. и др. Контроль показателей радиационной безопасности зданий и сооружений, подлежащих сносу // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 2. С. 42–51. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-2-42-51.
36. ISO 11665-7:2012. Measurement of radioactivity in the environment – Air: radon-222 – Part 7: Accumulation method for estimating surface exhalation rate. Geneva: International Organization for Standardization, 2012. 23 p.
37. Рыжакова Н.К., Шилова К.О. Пат. № 2656131, Российская Федерация, МПК G01T1/167. Способ оценки радоноопасности участков застройки. Заявл. 01.06.2017. Опубл. 31.05.2018 Бюл. № 16.
38. Ярмошенко И.В., Малиновский Г.П., Васильев А.В., Жуковский М.В. Метод измерения плотности потока радона из грунта, активированного градиентом давления // АНРИ. 2018. № 2. С. 48–55.
39. Yarmoshenko I., Malinovsky G., Vasilyev A., Zhukovsky M. Method for measuring radon flux density from soil activated by a pressure gradient // Radiation Measurements. 2018. Vol. 119. P. 150–154. DOI: 10.1016/j.radmeas.2018.10.011.
40. Ярмошенко И.В., Малиновский Г.П., Юрков И.А. Метод оценки радоноопасности участка с учетом потенциальной адвективной составляющей потока радона // Актуальные вопросы радиационной гигиены: матер. всеросс. науч.-практ. конф. с междунар. участ. (Санкт-Петербург, 10–11 октября 2023 г.). СПб.: ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, 2023. С. 315–318.
41. Рыжакова Н.К., Ставицкая К.О., Удалов А.А. Новый подход к проблеме оценки радоноопасности участков застройки // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 2. С. 57–64. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-2-57-64.
42. Бахур А.Е., Мануилова Л.И., Овсянникова Т.М. О возможности оценки потенциальной радоноопасности территорий по содержанию Po-210 и Pb-210 в почвах, грунтах и осадочных породах // АНРИ. 2009. № 3. С. 21–26.
43. Микляев П.С., Петрова Т.Б., Макеев В.М., Климшин А.В. Аномалии плотности потока радона на территории Москвы // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2017. № 5. С. 39–47.
44. Чеховский А.Л., Дроздов Д.Н. Картирование территории Гомельской, Могилевской и Витебской областей по комплексному радоновому показателю и объемной активности радона в жилых зданиях // Радиация и риск. 2016. Т. 25, № 4. С. 126–136. DOI: 10.21870/0131-3878-2016-25-4-126-136.
45. Чеховский А.Л., Чеховская Д.В. Обоснование модели комплексного радонового показателя, используемой для

- определения объемной активности радона в жилых зданиях // АНРИ. 2019. № 4. С. 51–56.
46. Чеховский А.Л. Обоснование применения компонентов радонового показателя для картирования радонового потенциала // Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. 2014. № 6 (87). С. 100–106.
 47. Neznal M., Neznal M., Matolín M., et al. The new method for assessing the radon risk of building sites. Prague: Czech Geological Survey, 2004. 94 p.
 48. Clavensjö B., Åkerblom G. The Radon Book – measures against radon. Stockholm: Ljunglöfs Offset AB, 1994. 129 p.
 49. Андреев А.И., Тесленко И.М., Цыцарева М.Б. Вариации почвенного радона и плотности потока радона с поверхности почвы экспериментального полигона // Вестник ТОГУ. 2014. № 3. С. 113–122.
 50. Бондаренко В.М., Демин Н.В., Соболев А.И. Квадратичная зависимость плотности потока радона с земной поверхности от объемной активности подпочвенного радона // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2009. № 6. С. 54–59.
 51. Szabó K.Z., Jordan G., Horváth Á., Szabó C. Dynamics of soil gas radon concentration in a highly permeable soil based on a long-term high temporal resolution observation series // Journal of Environmental Radioactivity. 2013. Vol. 124. P. 74–83. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2013.04.004.
 52. Müllerová M., Holý K., Bulko M. Daily and seasonal variations in radon activity concentration in the soil air // Radiation Protection Dosimetry. 2014. Vol. 160, No. 1-3. P. 222–225. DOI: 10.1093/rpd/ncu087.
 53. Козлова И.А., Юрков А.К. Влияние атмосферного давления на поведение почвенного радона в массиве горных пород // АНРИ. 2008. № 2. С. 28–31.

Поступила: 26.06.2024

Васильев Алексей Серафимович – младший 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: a.vasilev@niirg.ru

ORCID: 0000-0002-1277-3807

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, Санкт-Петербург, Россия

ORCID: 0000-0002-1392-1226

Кормановская Татьяна Анатольевна – кандидат биологических наук, ведущий 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, Санкт-Петербург, Россия

ORCID: 0009-0005-7922-7367

Сапрыкин Кирилл Александрович – старший научный сотрудник, заведующий лабораторией 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, Санкт-Петербург, Россия

ORCID: 0000-0003-2387-7051

Для цитирования: Васильев А.С., Кононенко Д.В., Кормановская Т.А., Сапрыкин К.А. Обзор подходов к оценке потенциальной радоноопасности земельных участков // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 3. С. 142–153. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-3-142-153

A review of approaches to assessment of potential radon hazard of land plots

Alexey S. Vasilyev, Dmitry V. Kononenko, Tatyana A. Kormanovskaya, Kirill A. Saprykin

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

According to Rosstat statistics, in recent years there has been a tendency in the Russian Federation to increase the intensity of construction, while both the number of buildings put into operation and their total area are increasing. The assessment of the potential radon hazard of land plots for construction provides the possibility of timely inclusion of the necessary protective (preventive) measures against radon in the design of buildings. This is a legal requirement in cases where the density of radon flux from the ground surface within the building area exceeds the established hygienic standards (action levels). The paper presents a review of Russian and foreign approaches to assessing the potential radon hazard of land plots conducted within the framework of engineering and environmental surveys. The current regulatory requirements to

Alexey S. Vasilyev

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

Address for correspondence: Mira Str., 8, Saint Petersburg, 197101, Russia. E-mail: a.vasilev@niirg.ru

radiation safety indicators of land plots for construction of residential, public and industrial buildings and facilities in the Russian Federation are analyzed. The main drawbacks of the algorithm for determining the potential radon hazard of land plots, used in the current guidelines MU 2.6.1.2398-08 approved at the federal level more than 15 years ago, are described. Critical remarks (the unsuitability of the value of density of radon flux from the ground surface for designing radon protective and mitigation (remedial) measures, lack of consideration of seasonal variations of radon flux density, etc.) accumulated over the years as a result of practical application of these guidelines are presented. Benefits and drawbacks of foreign approaches to assessing the potential radon hazard of the territory based on the results of measurements of radon concentration in soil gas, as well as the very possibility of a transition in Russian regulations from the density of radon flux from the ground surface to the radon concentration in soil gas, are analyzed. Some rational proposals of various Russian research teams on improving the algorithm for determining the potential radon hazard of land plots are considered.

Key words: radon, radon flux density, radon concentration, radon in soil gas, radiation survey, engineering environmental survey, land plots, charcoal canister, open chamber.

Authors' personal contribution

A.S. Vasilyev wrote the draft of the manuscript, conducted a search and analysis of literature data, and arranged the final version of the manuscript for publication in the journal.

D.V. Kononenko conducted a search and analysis of literature data, translated the manuscript, and edited the interim version of the manuscript.

T.A. Kormanovskaya analyzed the current requirements to the radiation safety of land plots for construction of residential, public and industrial buildings and facilities, and edited the interim version of the manuscript.

K.A. Saprykin edited the interim version of the manuscript.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interest.

Sources of funding

The work was carried out within the framework of the sectoral program of Rospotrebnadzor for 2021–2025 “Scientific substantiation of the national system for ensuring sanitary and epidemiological wellbeing, managing health risks and improving the quality of life of the population of Russia” on the topic: “Development and scientific substantiation of recommendations for planning, organizing and implementing programs to reduce the levels of public exposure due to natural sources of ionizing radiation on the regional level in order to reduce the risks of malignant neoplasms morbidity of the population of the Russian Federation”.

References

- Miklyaev P. “WHAT TO DO?” or “Radon crisis” in radiation surveys (impressions from reading the paper by Yu.A. Bannov “Laboratory of radiation control GEOCON LLC. Two years: work experience”). *ANRI=ANRI*. 2005;3: 60–64. (In Russian).
- Miklyaev PS, Makarov VI, Dorozhko AL, Petrova TB, Marenniy MA, Marenniy AM, et al. Radon field of Moscow. *Geokologiya. Inzheneraya Geologiya, Gidrogeologiya, Geokriologiya = Geoecology. Engineering Geology, Hydrogeology, Geocryology*. 2013;2: 172–187. (In Russian).
- Yakovleva VS. Methods for measuring radon and thoron flux density from the surface of porous materials. Tomsk: Publishing house of Tomsk Polytechnic University; 2011. 174 p. (In Russian).
- Kononenko DV, Kormanovskaya TA, Vasilyev AS, Saprykin KA. New guidelines on radiation survey and sanitary assessment of residential, public and industrial buildings and facilities in terms of radiation safety indicators. Part 1. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024;17(2): 138–147. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-2-138-147.
- Vasilyev AS. Exposure of students (pupils) and employees of educational institutions in the Leningrad region to natural sources of radiation. Part 1: Results of a comprehensive survey. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(2): 65–77. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-2-65-77.
- Kormanovskaya TA, Istorik OA, Romanovich IK, Eremina LA, Koroleva NA, Balabina TA, et al. Radon surveys in the buildings of children institutions. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(2): 6–20. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-2-6-20.
- Construction in Russia. 2022 Statistical digest. Moscow: Rosstat; 2022. 148 p. Available from: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Stroit_2022.pdf [Accessed 26 June 2024]. (In Russian).
- Miklyaev P, Petrova T, Klimshin A, Smirnova A. Mapping the geogenic radon potential (for example, the City of Moscow). *ANRI=ANRI*. 2015;1: 2–13. (In Russian).
- Gulabyants L, Kalaydo A. Radon protection of residential and public buildings. Moscow: Berlin: DirectMEDIA; 2020. 236 p. (In Russian).
- Tsapalov A, Miklyaev P, Petrova T, Kuvshinnikov S. Radon regulation crisis in Russia: scale of the problem and proposals for remediation. *ANRI=ANRI*. 2024;1: 3–29. (In Russian) DOI: 10.37414/2075-1338-2024-116-1-3-29.
- Marenniy AM, Okhrimenko SE, Pavlov IV. Objectives and methods of assessing the potential radon hazard of residential areas. *ANRI=ANRI*. 2006;2: 25–30. (In Russian).
- Bannov YuA. Laboratory of radiation control GEOCON LLC. Two years: work experience. *ANRI=ANRI*. 2005;2: 54–72. (In Russian).
- Gulabyants LA, Zabolotskiy BYu. Radon flux density as a criterion for assessing radon hazard. *ANRI=ANRI*. 2004;3: 16–20. (In Russian).
- Miklyaev PS, Petrova TB. Mechanisms of formation of radon flux from the soil surface and approaches to assessing the radon hazard of residential areas. *ANRI=ANRI*. 2007;2: 2–16. (In Russian).
- Miklyaev P, Petrova T, Tsapalov A, Borisov A. Application experience the isotope geochemical method to study the condition of radon migration to the soil surface. *ANRI=ANRI*. 2012; 1: 15–21. (In Russian).
- Miklyaev P, Marenniy A, Tsapalov A, Petrova T. The comprehensive monitored research of the formation of the radon fields in the massifs of soil. Part 8 – the main results. *ANRI=ANRI*. 2017;4: 2–22. (In Russian).
- Okhrimenko SE, Korenkov IP, Miklyaev PS, Prokhorov NI, Verbova LF, Orlov YuV. Ranking of the territory of the city of Moscow for potential radon danger. *Gigiena i Sanitaria = Hygiene and Sanitation*. 2017;96(3): 211–216. (In Russian). DOI: 10.18821/0016-9900-2017-96-3-211-216.
- Miklyaev PS, Petrova TB, Okhrimenko SE. New aspects of assessing the radon hazard of construction sites on the example of Moscow. *ANRI=ANRI*. 2003;4: 63–71. (In Russian).
- Miklyaev PS, Petrova TB, Marenniy MA, Marenniy AM, Dorozhko AL, Makeev VM. The map of the flux density of radon on the territory of Moscow. *ANRI=ANRI*. 2012;3: 15–24. (In Russian).
- Ryzhakova NK, Stavitskaya KO, Udalov AA. Issues in assessment of potential radon hazard at building sites. *Radi-*

- atsionnaya Gygienna = *Radiation Hygiene*. 2018;11(2): 37–44. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-2-37-44.
21. Marennyy AM. Radon in the framework of engineering and environmental surveys for construction. *ANRI=ANRI*. 2008;2: 21–28. (In Russian).
 22. Bannov Yu. Radiation control laboratory “Stalker” JSC: 10 years experience. *ANRI=ANRI*. 2013;4: 72–88. (In Russian).
 23. Yakovleva VS, Nagorskiy PM, Yakovlev GA. Method of monitoring of undisturbed radon flux density from the soil surface. *Bulletin KRASEC. Physical and Mathematical Sciences*. 2016;12(1): 75–82. DOI: 10.18454/2313-0156-2016-12-1-75-82.
 24. Miklyaev PS, Petrova TB, Bannov YuA, Anisimova NG. Mechanisms of formation of radon flux from the soil surface in platform territories (on the example of Moscow). In: Sergeev readings. Issue 10. International Year of Planet Earth: challenges of geoecology, engineering geology and hydrogeology. Proceedings of the annual session of the Scientific Council of the RAS on problems of geoecology, engineering geology and hydrogeology, 20–21 March 2008, Moscow. Moscow: GEOS; 2008. P. 235–240. (In Russian).
 25. Miklyaev PS, Marennyy AM, Tsapalov AA, Penezev AV. Results of monitoring of radon field parameters at experimental sites. *Evraziyskiy Soyuz Uchenykh = Eurasian Union of Scientists*. 2015;1-1(18): 155–159. (In Russian).
 26. Klimshin AV, Kozlova IA, Rybacov EN, Lukovskoy MY. Effect of freezing the surface layer of soil on the radon transport. *Bulletin KRASEC. Earth Sciences*. 2010;2: 146–151. (In Russian).
 27. Gavriliev S, Petrova T, Miklyaev P. Factors influencing radon transport in the soils of Moscow. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022;29(59): 88606–88617. DOI: 10.1007/s11356-022-21919-y.
 28. Butkus D, Gagiskis A, Streckytė E, Grubliauskas R. The measuring of radon volumetric activity and exhalation rate in ground-level air. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2013;295: 1085–1092. DOI: 10.1007/s10967-012-1922-8.
 29. Zaytsev VV, Rogalis BC, Kuzmich SG. Studies of the influence of time conditions on radon fluxes at construction sites. *ANRI=ANRI*. 2008;2: 34–36. (In Russian).
 30. Beletskaya YuV, Krupnyy GI, Mamaev AM, Rastsvetlov YaN. Variations in the density of radon flux from the soil surface of the experimental land plots. *ANRI=ANRI*. 2010;1: 34–37. (In Russian).
 31. Tsapalov A, Kovler K, Miklyaev P. Open charcoal chamber method for mass measurements of radon exhalation rate from soil surface. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2016;160: 28–35. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2016.04.016.
 32. Zuevich FI, Dovgusha VV, Shkrabo IV, Lazarev AV, Voronin LA. Correlation of radon exhalation flux from the soil surface and solar activity. *Ekologicheskie sistemy i pribory = Ecological Systems and Devices*. 2008;10: 14–16. (In Russian).
 33. Marennyy AM, Miklyaev PS, Petrova TB, Marennyy MA, Penezev AV, Kozlova NV. Time fluctuations of radon flux in territory of Moscow. *ANRI=ANRI*. 2011;1: 23–36. (In Russian).
 34. Yakovleva VS. Features of simultaneous measurements of radon and thoron flux densities from the surface of porous materials. *ANRI=ANRI*. 2010;4: 31–37. (In Russian).
 35. Kormanovskaya TA, Kononenko DV, Saprykin KA, Vasilyev AS, Koroleva NA, Kokoulina ES, et al. Radiation survey of buildings and structures to be demolished. *Radiatsionnaya Gygienna = Radiation Hygiene*. 2022;15(2): 42–51. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-2-42-51.
 36. ISO 11665-7:2012. Measurement of radioactivity in the environment – Air: radon-222 – Part 7: Accumulation method for estimating surface exhalation rate. Geneva: International Organization for Standardization; 2012. 23 p.
 37. Ryzhakova NK, Shilova KO. Pat. No. 2656131, Russian Federation, Int. Cl. G01T 1/167. Method for evaluation of radon hazard at areas of construction. Appl. 01.06.2017. Publ. 31.05.2018 Bull. № 16.
 38. Yarmoshenko I, Malinovsky G, Vasilyev A, Zhukovsky M. Method for measuring radon flux density from soil activated by a pressure gradient. *ANRI=ANRI*. 2018;2: 48–55. (In Russian).
 39. Yarmoshenko I, Malinovsky G, Vasilyev A, Zhukovsky M. Method for measuring radon flux density from soil activated by a pressure gradient. *Radiation Measurements*. 2018;119: 150–154. DOI: 10.1016/j.radmeas.2018.10.011.
 40. Yarmoshenko IV, Malinovsky GP, Yurkov IA. A method for assessing the radon hazard of a site, taking into account the potential advective component of the radon flux. In: Current issues of radiation hygiene. Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference, 10–11 October 2023, St. Petersburg. St. Petersburg: FBUN NIIRG im. P.V. Ramzaeva; 2023. P. 315–318. (In Russian).
 41. Ryzhakova NK, Stavitskaya KO, Udalov AA. A new approach to the problem of assessing the radon hazard of building sites. *Radiatsionnaya Gygienna = Radiation Hygiene*. 2020;13(2): 57–64. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-2-57-64.
 42. Bakhur AE, Manuilova LI, Ovsyannikova TM. On the possibility of assessing the potential radon hazard of territories using activity concentrations of Po-210 and Pb-210 in soils and sedimentary rocks. *ANRI=ANRI*. 2009;3: 21–26. (In Russian).
 43. Miklyaev PS, Petrova TB, Makeev VM, Klimshin AV. Abnormal radon exhalation rate in Moscow. *Geoekologiya. Inzheneraya Geologiya, Gidrogeologiya, Geokriologiya = Geoecology. Engineering Geology, Hydrogeology, Geocryology*. 2017;5: 39–47. (In Russian).
 44. Chekhovskiy AL, Drozdov DN. Mapping territory of Gomel, Mogilev and Vitebsk regions for complex radon index and radon volume activity in residential buildings. *Radiatsiya i risk = Radiation and Risk*. 2016; 25(4): 126–136. (In Russian) DOI: 10.21870/0131-3878-2016-25-4-126-136
 45. Chekhovskiy AL, Chekhovskaya DV. Substantiation of model of complex radon index used to determine volumetric activity of radon in residential buildings. *ANRI=ANRI*. 2019;4: 51–56. (In Russian).
 46. Chekhovskiy AL. Justification for the use of the components of radon index for radon potential mapping. *Proceedings of Francisk Scorina Gomel State University*. 2014;6 (87): 100–106. (In Russian).
 47. Neznal M, Neznal M, Matolin M, Barnet I, Miksova J. The new method for assessing the radon risk of building sites. Prague: Czech Geological Survey; 2004. 94 p.
 48. Clavensjö B, Åkerblom G. The Radon Book – measures against radon. Stockholm: Ljunglöfs Offset AB; 1994. 129 p.
 49. Andreev AI, Teslenko IM, Cicareva MB. Variations of ground radon and density of radon stream from the ground surface of experimental polygon. *Vestnik TOGU = Bulletin of PNU*. 2014;3: 113–122. (In Russian).
 50. Bondarenko VM, Demin NV, Sobolev AI. Quadratic dependence of radon surface flow density on volumetric activity of subsurface radon. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka = Proceedings of Higher Educational Establishments. Geology and Exploration*. 2009;6: 54–59. (In Russian).
 51. Szabó KZ, Jordan G, Horváth Á, Szabó C. Dynamics of soil gas radon concentration in a highly permeable soil based on a long-term high temporal resolution observation series. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2013;124: 74–83. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2013.04.004.
 52. Müllerová M, Holý K, Bulko M. Daily and seasonal variations in radon activity concentration in the soil air. *Radiation Protection Dosimetry*. 2014;160(1-3): 222–225. DOI: 10.1093/rpd/ncu087.
 53. Kozlova IA, Yurkov AK. Influence of atmospheric pressure on the behavior of soil radon in a rock mass. *ANRI=ANRI*. 2008;2: 28–31. (In Russian).

Received: June 26, 2024

For correspondence: Alexey S. Vasilyev – Junior researcher, Laboratory for dosimetry of natural sources of radiation, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing (Mira Str., 8, Saint Petersburg, 197101, Russia; E-mail: a.vasilev@niirg.ru)

ORCID: 0000-0002-1277-3807

Dmitry V. Kononenko – Researcher, Laboratory for dosimetry of natural sources of radiation, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0000-0002-1392-1226

Tatyana A. Kormanovskaya – Candidate of Biological Sciences, Leading researcher, Laboratory for dosimetry of natural sources of radiation, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0009-0005-7922-7367

Kirill A. Saprykin – Senior researcher, Head of the Laboratory for dosimetry of natural sources of radiation, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0000-0003-2387-7051

For citation: Vasilyev A.S., Kononenko D.V., Kormanovskaya T.A., Saprykin K.A. A review of approaches to assessment of potential radon hazard of land plots. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 3. P. 142-153. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-3-142-153