

2.3 ОЦЕНКА РАДОНООПАСНОСТИ ТЕРРИТОРИЙ

2.3.1. Радоноопасность и радоновый риск. Основные понятия

В общем случае под природной опасностью понимаются природные процессы и/или явления, которые представляют угрозу для людей и/или сооружений. Чем выше интенсивность и/или пространственная распространенность процесса, тем выше степень опасности. Опасность обычно выражается как вероятность возникновения процесса в виде частоты его проявления во времени или в пространстве. Степень опасности, как и само ее существование на той или иной территории, определяется только характеристиками самого опасного процесса/явления (то есть, по сути, характеристиками природных условий территории) и не зависит от количества людей или объектов, которые могут подвергнуться негативному воздействию. Риск – это вероятность реализации негативного сценария, то есть, вероятность реализации опасности в виде жертв, разрушений и т.п. с учетом подверженности и уязвимости территории. Подверженность риску отражает сферу распространения опасности, в техническом смысле это количество единиц наблюдения – количество лиц в исследуемой группе, плотность инфраструктуры, площадь опасной территории и т.п. Уязвимость выражает степень или интенсивность, с которой может возникнуть ущерб в отношении рассматриваемого объекта (степень защищенности / незащищенности объекта от природной опасности). Риск обычно выражают в виде произведения опасности, подверженности и уязвимости территории.

В 2013 г. Л.А. Гулабянц [Гулабянц, 2013] предложил определение радоноопасности зданий: «радоноопасность – заключенная в объекте возможность нанесения ущерба здоровью человека вследствие избыточного воздействия радона на его организм». В данном определении под «объектом» понимается здание и его грунтовое основание, представляющие собой единую природно-техногенную систему [Гулабянц, 2013]. Оценка радоноопасности здания должна проводиться в процессе строительного

проектирования с целью определения необходимости защиты от радона и, в случае необходимости, разработки проекта радонозащитных мероприятий, расчета параметров защиты. В данном случае решается задача количественного прогноза среднегодовой ЭРОА изотопов радона в воздухе жилых помещений здания с учетом как скорости выделения радона из грунтов основания, так и характеристик самого здания, прежде всего, радоновыделения из строительных материалов, радонозащитных свойств подземных ограждающих конструкций (сопротивление радонопроницанию), а также режима вентиляции (кратности воздухообмена) помещений [Гулабянц и др., 2014]. Прогноз должен осуществляться на основании проектных данных для единой системы «основание – сооружение». Критерием оценки потенциальной радоноопасности здания является превышение прогнозируемой среднегодовой величины ЭРОА изотопов радона в помещениях нормативов, установленных НРБ-99/2009. На основе прогноза, в случае необходимости, проектируется оптимальная конструкция, предотвращающая поступление и накопление радона в здании. Как за рубежом, так и в России в настоящее время разрабатываются математические методы такого прогноза, а также специальное программное обеспечение [Гулабянц и др. 2014], введен в действие Свод правил «Здания жилые и общественные. Правила проектирования противорадоновой защиты» [СП 321.1325800.2017]. Отметим, что подходы, принятые в указанном Своде правил, основаны на допущении исключительно диффузионного механизма переноса радона в грунтах и в строительных конструкциях, что считается возможным при отсутствии каких-либо дефектов при строительстве. Это позволяет упростить расчеты. Однако, следует учитывать, что в практике преобладает именно конвективный перенос радона из грунтов в помещения через технологические отверстия, лифтовые шахты, трещины, стыки плит и др. полости [Источники ..., 1992], количество и размеры которых заранее неизвестны, и связаны зачастую с таким непредсказуемым параметром, как качество строительных работ, что вносит существенную неопределенность в

результаты расчета. Кроме того, если составление радонового баланса односемейных малоэтажных домов является относительно сложной, но решаемой задачей, то задача построения модели переноса радона в многоэтажных зданиях со сложной системой воздухообмена и значительным заглублением подземной части пока далека от своего окончательного решения. Перечисленные проблемы делают оценку потенциальной радоноопасности зданий (если не подходить к ней формально) нетривиальным и относительно дорогостоящим видом исследований.

В этой связи актуальным может быть ранжирование по степени *потенциальной радоноопасности территорий* без привязки к конкретной конструкции зданий. Очевидно, что сама по себе территория не может представлять угрозы для жизни и здоровья людей с точки зрения облучения радоном, т.к. накопление радона до опасных уровней может происходить только в замкнутых пространствах. Однако территория может быть опасной при сочетании следующих условий:

- 1) существование в геологической среде условий для повышенного радоновыделения из грунтов;
- 2) присутствие на территории зданий, не защищенных от поступления в них радона.

Таким образом, *потенциальная радоноопасность территорий*, это состояние компонентов геологической среды, способствующее накоплению радона в расположенных на данной территории зданиях в количествах, представляющих угрозу для жизни и здоровья людей. Или, учитывая что допустимые значения ЭРОА изотопов радона в помещениях установлены санитарными правилами, *потенциальную радоноопасность территории* можно определить как ситуацию (сочетание геологических, геодинамических, гидрогеологических условий, геофизических, радиационно-физических характеристик грунтов, способствующее повышенному выделению радона из грунтов) при которой среднегодовая ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений зданий, расположенных на

данной территории и никак не защищенных от поступления радона из грунта, может превышать санитарно-гигиенические нормативы.

Если здание проектируется на территории с заведомо низким уровнем выделения радона из грунтов, то есть основание предполагать, что среднегодовое значение ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений будущего здания не превысит нормативных значений (при условии выполнения обычных строительных и санитарных требований по вентиляции помещений, эффективной удельной активности природных радионуклидов в строительных материалах и т.п.). Очевидно, что при проектировании зданий на таких участках мероприятия по защите от радона не требуются. Сконцентрировать же усилия по оценке радоноопасности проектируемых зданий с целью предотвращения повышенного поступления радона из геологической среды следует на участках, где существует вероятность повышенного радоновыделения из грунтов, то есть, на потенциально радоноопасных территориях.

Оценка потенциальной радоноопасности территорий заключается в ранжировании территорий по интенсивности выделения радона из геологической среды. Цель такого ранжирования – идентификация территорий, характеризующихся низким поступлением радона из грунтов, являющихся радонобезопасными, и потенциально радоноопасных территорий, на которых существуют условия для формирования повышенных (превышающих нормативные уровни) концентраций радона в помещениях зданий и/или наблюдается повышенное выделение радона из геологической среды.

Оценка потенциальной радоноопасности территорий не преследует цели количественного прогноза ЭРОА изотопов радона в каждом здании, а основана на анализе некоторого набора *признаков* (сочетания геологических, геодинамических, гидрогеологических условий, геофизических, радиационно-физических характеристик грунтов), свидетельствующих о возможном повышенном поступлении радона в здания.

Признаками радоноопасности являются различного рода показатели, косвенно свидетельствующие о вероятности повышенной объемной активности радона в здании с низким уровнем противорадоновой защиты. К признакам потенциальной радоноопасности относятся (по [Гулабянц, 2013a]):

- повышенные концентрации радона в эксплуатируемых зданиях, расположенных в пределах и/или в непосредственной близости от исследуемой территории;
- повышенная концентрация радона в почвенном газе;
- повышенная плотность потока радона из грунта на территории застройки;
- присутствие в геологическом разрезе территории необводненных грунтов, представленных трещиноватыми высокопроницаемыми породами и/или породами, для которых характерны высокие значения и/или вариабельность удельной активности ^{226}Ra ;
- наличие активных разломов и/или геодинамически активных зон;
- повышенный уровень гамма-фона на открытой территории застройки;
- использование в зданиях подземных конструкций, которым свойственен низкий уровень радонозащитной способности.

В качестве *критериев* оценки потенциальной радоноопасности выступают признаки, которые могут быть четко регламентированы количественно (в виде некоторых допустимых уровней), либо качественно (например, присутствуют – отсутствуют). Кроме того, эти признаки должны поддаваться достаточно оперативному и точному определению (измерению, выявлению) и привязке к карте в выбранном масштабе. Как показывает отечественный и зарубежный опыт, выбор таких признаков – непростая задача.

Методологические и технологические особенности процедуры оценки потенциальной радоноопасности территорий, в том числе выбор признаков и критериев оценки, зависят от целей и масштабов исследований. В мировой и

отечественной практике развивается два основных направления – это региональные мелкомасштабные и среднемасштабные исследования, проводимые в целях идентификации относительно крупных областей, где можно ожидать повышенные концентрации радона в помещениях, ввиду чего при строительстве новых зданий на таких территориях могут понадобиться особые радонозащитные мероприятия. Кроме того, региональные исследования необходимы для определения радоноопасных районов (зон), приоритетных с точки зрения проведения гигиенических оценок дозовой нагрузки на население. Другое направление исследований – детальное изучение условий, определяющих потенциальную радоноопасность территории на отдельных участках строительства, для целей строительного проектирования, т.е. для проведения оценки радоноопасности отдельных зданий. В последнем случае, речь идет об оценке возможности повышенного поступления радона из грунтов в здание на конкретном земельном участке, ограниченном габаритами проектируемого здания, площадью 0,1–1,0 га, в масштабах 1:500 – 1:5000, с целью определения необходимости и характера радонозащитных мероприятий, что существенно отличается от оценки потенциальной радоноопасности крупных территорий. В этой связи принципы выбора признаков и критериев оценки потенциальной радоноопасности крупных территорий и отдельных участков строительства необходимо рассмотреть отдельно.

Как видно, потенциальная радоноопасность территорий – величина, определяющаяся только некоторыми геологическими свойствами территории, обуславливающими степень выделения радона из грунтов и не зависящая от количества проживающих на территории людей, а также от того насколько защищены построенные на данной территории здания от поступления в них радона. То есть, при одинаковых параметрах геологической среды, потенциальная радоноопасность, например, незаселенной территории в степи или в тайге и в пределах крупного мегаполиса будет одинаковой. Плотность населения и тип застройки

территории учитывается при оценках риска. Риск повышенного облучения населения радоном в помещениях определяется произведением радоноопасности, подверженности, отражающей количество населения, проживающего на опасной территории, и уязвимости, определяющейся конструкцией зданий, привычками жителей и т.д. [Petermann et al., 2022]. Под радоновым риском часто понимается риск заболеванием раком легкого или смерти от радон-индуцированного рака легкого [Источники..., 1992]. Следует учитывать, что риск повышенного облучения радоном (т.е. риск получения повышенных доз за счет радона), риск заболевания раком и риск смерти от рака за счет облучения радоном — это разные показатели, хоть и связанные между собой.

При исследованиях радона в России, как и во всем мире, как правило, рассматривают потенциальную радоноопасность территорий, а не риск. Хотя часто термины «риск» и «опасность» применительно к радону используются достаточно вольно. В иностранной литературе под термином «радоновый риск» часто понимается как собственно риск – вероятность возникновения дополнительных заболеваний или преждевременной смерти в связи с облучением радоном (в рамках более широкого понятия «радиационный риск»), так и вероятность повышенного содержания радона в помещениях и даже вероятность повышенной объемной активности радона в геологической среде, которые относятся к опасностям. В качестве примера можно привести публикацию, посвященную оценке уровней подпочвенного радона на площадках строительства в Чешской республике «The new method for assessing the *radon risk* of building sites» («Новый метод оценки *радонового риска* в местах застройки») [Neznal et al., 2004].

Вообще в англоязычной литературе, посвященной проблеме радона, понятия «*risk*» и «*hazard*» («риск» и «опасность») часто используются практически как синонимы, или, по крайней мере, как весьма близкие по значению слова. До недавнего времени в англоязычной литературе было наиболее распространено словосочетание «*radon risk*», в то время как «*radon*

hazard» использовалось редко. Лишь в последние годы в европейских исследованиях было обращено внимание на различие понятий «риск» и «опасность». Так в работе [Petermann et al., 2022] указано, что в европейском законодательстве приоритетными по радону областями считаются территории, где «концентрация радона (в среднем за год) в значительном количестве зданий, как ожидается, превысит соответствующий национальный референтный уровень». Однако эта интерпретация «значительного числа» основана на концепции геогенной опасности, но не на риске. Следовательно, принятое в Европе определение приоритетных радоновых зон, основанное на опасности, не зависит от количества пострадавших людей. Такой подход был выбран специально для того, чтобы уделять приоритетное внимание индивидуальной защите людей, проживающих в зонах наибольшей опасности [Petermann et al., 2022]. Был введен количественный критерий – *индекс опасности геогенного радона* (geogenic radon hazard index – GRHI), разработанный для оценок и картирования крупных площадей [Bossew et al., 2020].

В отечественной литературе оценку вероятности повышенных среднегодовых значений содержания радона в зданиях, основанную на анализе косвенных признаков (повышенных концентраций радона в существующих зданиях, в подпочвенном воздухе, плотности потока радона из грунтов) традиционно называют оценкой *радоновой опасности*, или *радоноопасности*. Ниже будут подробно рассмотрены основные принципы оценки потенциальной радоноопасности.

2.3.2. Основные принципы оценки и картирования потенциальной радоноопасности крупных территорий

Картирование территорий по потенциальной радоноопасности необходимо в качестве инструмента для принятия решений и обоснования целесообразности реализации комплекса первоочередных радонозащитных мероприятий и, а также мониторинговых программ и надзорных

мероприятий в данной сфере. Картирование заключается в выявлении и оконтуривании областей, в которых, как ожидается, концентрация радона в значительном количестве зданий превысит соответствующие национальные референтные уровни. В России нет четкого термина, обозначающего такие области. Чаще всего их называют *радоноопасные территории, области, зоны*.

Пагубное воздействие радона на здоровье признано Всемирной организацией здравоохранения [WHO, 2009] и законодательством целого ряда стран, например, Директивой Совета ЕС № 2013/59/Euratom [Council Directive..., 2013]. В статье 103/3 данного документа от государств-членов требуется определять районы (здесь называемые «приоритетными районами по радону», radon priority areas – RPA), где концентрация радона (в среднем за год) в значительном количестве зданий, как ожидается, превысит национальный референтный уровень. В пределах областей, определенных как RPA, необходима разработка конкретных для этой территории строительных норм и правил для новых зданий, обязательные измерения для общественных зданий или рабочих мест, поддержка мер по радонозащите и кампании по повышению осведомленности общественности. Определение радоноопасных территорий (областей, зон) является очень важной задачей, поскольку от этого зависят конкретные (обязательные) меры стратегии по снижению уровней облучения населения радоном (измерения уровня радона в жилых домах и на рабочих местах, профилактические меры и программы информирования населения).

Прямым критерием, непосредственно свидетельствующем о радоноопасности территории, является измеренная концентрация радона в помещениях. Однако построение карт радоноопасности, базирующихся только на концентрации радона в домах, сопряжено с рядом трудностей. Прежде всего, это недостаток данных, связанных с трудностями проведения измерений и неопределенностью получаемых результатов. Результаты измерения содержания радона в жилых домах очень сильно зависят от таких

трудно предсказуемых факторов, зависящих от особенностей конструкции домов и привычек жильцов, как частота проветривания помещений, герметичность дверей и оконных рам, наличие подвала, герметичность вводов подземных коммуникаций и т.п. Проблемы связаны как с допуском в частные дома и учреждения, так и с сохранностью детекторов радона в жилье в течение длительного времени экспозиции. В настоящее время в России и в Израиле прилагаются усилия по вовлечению населения в проведение массовых измерений путем создания системы мотивированного сбора информации о содержании радона в помещениях [Маренный и др., 2022; Tsapalov et al., 2020], что позволит в будущем расширить «географию» исследований. Однако, даже при условии достаточной информированности и заинтересованности определенной части граждан в измерениях радона, очевидно, что провести измерения в каждом доме и в каждом помещении не представляется возможным и целесообразным с экономической точки зрения. Принимая во внимание неоднородность расположения жилой застройки и различия зданий по году постройки, этажности, применяемым материалам, даже в пределах населенных пунктов плотность точек измерения радона оказывается весьма неравномерной и в разной степени охватывает, как здания разного типа и назначения. Вне населенных пунктов данные о концентрации радона в помещениях по понятным причинам вообще отсутствуют, что не позволяет предварительно оценить пригодность этих территорий для нового строительства.

В этой связи в практике картирования радоноопасности территорий появилась необходимость использования дополнительных более надежных и более однородно распределенных параметров, характеризующих потенциальную радоноопасность территорий. Известно, что поступление радона в помещения, главным образом, связано с геологическими характеристиками территорий, т.к. основным источником радона являются грунты основания зданий. Поэтому в качестве дополнительных используются параметры, характеризующие поступление радона из геологической среды.

Таковыми параметрами является, прежде всего, концентрация природного урана ^{238}U в горных породах и почвах, концентрация радона в почвенных газах и проницаемость почв, плотность потока радона с поверхности почв и т.п. Эти параметры не зависят от антропогенных факторов, таких как поведение жителей, не требуют разрешения собственников жилья, могут быть измерены в любом месте, в том числе там, где отсутствует застройка.

В европейских странах широко используется так называемый геогенный радоновый потенциал (*GRP*), представляющий собой функцию содержания радона в почвенном газе на глубине 0,5–1,0 м [Gruber et al., 2013a]. Глубина измерения почвенного радона является компромиссом между необходимостью минимизировать временные колебания объемной активности радона в приповерхностном слое почвы за счет газообмена с атмосферой, которые затухают с глубиной, и технической возможностью погружения зонда в почву без применения тяжелой техники и вращательных механизмов, нарушающих естественное сложение грунта. За последние три десятилетия было предложено несколько определений *GRP*, но наиболее широко применяемое определение было предложено в работе. [Nezmal et al., 2004], где *GRP* (безразмерный) выражается как функция ОА радона в почвенном газе на глубине 0,8 м и проницаемости почвенного газа (см. уравнение (2.3.1)). Эта формула *GRP* была разработана полуэмпирически, чтобы обеспечить оптимальное прогнозирование ОА радона в помещении.

$$GRP = \frac{A_{Rn,s}}{-\lg k - 10}, \quad (2.3.1)$$

где $A_{Rn,s}$ – ОА радона в почвенном газе на глубине 0,8 м, Бк/м³;
 k – проницаемость грунта, м².

Значения *GRP* изменяются пространственно и во времени вследствие неоднородного пространственного распределения и временной изменчивости факторов, контролирующих накопление, миграцию и эксхалацию радона, таких как химические и физические свойства почвы (пространственная изменчивость) и влажность почвы (временная изменчивость). Подробная

методика измерения объемной активности радона в почвенном воздухе на глубине 0,8 м, проницаемости почв (прямых измерений и приблизительных оценок), а также оценки *GRP* на основании результатов измерений, приведена в работе [Neznal et al., 2004].

Однако, метод *GRP* имеет ряд недостатков, прежде всего, они связаны с проблематичностью погружения зонда для измерений объемной активности радона на требуемую глубину в твердые, скальные и крупнообломочные почвы (грунты) без прохождения специальных шпуров и существенного нарушения структуры грунта. Нарушение структуры грунтов вокруг зонда происходит в разной степени в зависимости от свойств грунта, что приводит к непрогнозируемым смещениям результатов измерений. В некоторых случаях погружение зонда в почву на глубину 0,8 м вообще не представляется возможным. Кроме того, проблему представляет и отсутствие стандартизованных методик измерения газопроницаемости поверхностных слоев.

В этой связи *GRP* используется достаточно ограничено, преимущественно в Чехии и Германии. В других же странах Европы оценку потенциальной радоноопасности проводят на основе других величин, таких, например, как концентрация ^{238}U в почвах и горных породах, объемная активность радона в почвенном газе на глубине 0,5–1,0 и т.п. Поэтому для того чтобы построить общую европейскую карту потенциальной радоноопасности (геогенного радона) был предложен более универсальный критерий – геогенный индекс радоновой опасности (*GRHI*) [Petermann et al., 2021]. Идея применения *GRHI* состоит в том, что это должен быть некий универсальный критерий, не зависящий от того, какие именно входные величины используются, т.к. в разных странах Европы используются разные величины для оценки потенциальной радоноопасности. Для построения общей карты геогенного радона в качестве такого универсального критерия и был предложен *GRHI*, использующий предварительно логарифмически преобразованные с помощью регрессионной модели величины измеряемых

параметров, характеризующих геогенный радон, масштабированный в пределах от 0 до 1:

$$GRHI = \frac{\ln(GRP) - \min(\ln(GRP))}{\max(\ln(GRP)) - \min(\ln(GRP))} \quad (2.3.2)$$

В данное уравнение вместо *GRP* могут быть подставлены значения любых других параметров, характеризующих выделение радона из грунта.

Для характеристики радоноопасности территорий и радонового риска в Европе, где накоплен наибольший опыт подобных исследований, в настоящее время применяют комплекты из следующих карт:

- карты ОА радона в помещениях, дополненные картами распределения в пространстве количества зданий, в которых проводились измерения ОА радона;
- карты геогенной радоноопасности (геогенного радонового потенциала или геогенного индекса радоноопасности или аналогичных показателей).

В рамках изданного в 2019 г. «Европейского атласа природной радиации» созданы карты концентрации радона и распределения зданий, в которых проводились измерения, для территории Европы. Ведутся работы по разработке подходов к построению карты геогенного радонового потенциала и/или геогенного индекса радоноопасности. Результаты этой работы, а также возникающие проблемы, рассмотрены в разделе 3.4.3.

Карты радона существовали во многих странах ЕС в течение многих лет как часть национальных стратегий по радону. В последнее десятилетие в странах Евросоюза вступили в силу новые Основные стандарты безопасности (Директива Совета ЕС № 2013/59/Euratom, т.н. EU-BSS [Council Directive..., 2013]), которые предъявляют унифицированные требования к картам радоноопасности государств-членов ЕС. Применяемые методы картографирования и визуализация сильно отличаются в разных странах, в зависимости от назначения карты и доступных данных. Эти

методы основаны на различных разработках, стратегиях и идеях в области защиты от радона, которые применялись в течение многих лет в разных странах, и в большинстве случаев основные стратегии и методы картографирования, применяемые в стране, остаются неизменными, даже при пересмотре или принятии новых законодательных требований.

Согласованная оценка, классификация и отображение потенциальной радоноопасности важны для лучшей сопоставимости и совместимости между регионами или странами и должны служить основой для принятия надлежащих и последовательных мер по защите населения от радона. Так, в настоящее время в Европе в рамках европейского исследовательского проекта «Метрология для мониторинга радона» (MetroRADON) разрабатываются надежные методы и методики, позволяющие соблюдать единство подходов к измерениям и калибровке средств измерений содержания радона, включая также задачу согласования собираемых данных и общих подходов к выделению и картированию радоноопасных зон. Эти же проблемы не менее актуальны и для России, где до сих пор нет единой государственной стратегии по картированию радона в зданиях и методам картирования радоноопасных территорий.

В России картирование потенциальной радоноопасности с выделением радоноопасных или приоритетных зон в настоящее время не развито в должной мере. В середине 1990-х гг. была построена Карта радоноопасности территории России в масштабе 1:10 000 000, кроме того известны отдельные карты радоноопасности некоторых регионов – Москвы, Ленинградской области и Санкт-Петербурга, Иркутской области [Микляев, 2015].

При картировании радоноопасности учитываются основные геологические факторы и условия, способствующие повышенному выделению радона из геологической среды:

- геохимические – повышенные концентрации радионуклидов уранового ряда в горных породах и рыхлых отложениях (особое

внимание уделяется грунтам, являющимся основанием зданий и сооружений);

- гидрогеохимические – повышенные удельные активности радона в подземных водах (особое внимание уделяется водам, используемым для водоснабжения);
- геодинамические – наличие в геологической среде высокопроницаемых зон различной природы, включая тектонические (разломы, зоны трещиноватости, геодинамически активные зоны), экзогенные (карстовые полости, пещеры, высокопроницаемые отложения, оползневые трещины и т.п.) или техногенные (горные выработки, рудники), обеспечивающих возможность конвективного переноса радона в геологической среде с высокой скоростью.

Для картирования радоноопасных зон применяется самый различный набор данных, включая результаты прямых измерений следующих параметров:

- концентрация радона в помещениях с применением интегральных методов (время экспонирования более месяца), квазиинтегральных методов (время экспонирования 3–6 суток), мгновенных (экспрессных) инспекционных методов;
- плотность потока радона с поверхности грунта;
- удельная активность радионуклидов уранового ряда (^{238}U , ^{226}Ra , ^{210}Pb) в грунтах;
- мощность дозы гамма-излучения на открытой местности;
- концентрация радона в почвенных газах.

В качестве косвенных данных, характеризующих потенциальную радоноопасность, может привлекаться дополнительная геологическая информация:

- присутствие месторождений урановых руд и/или урановой минерализации;

- выходы на поверхность или неглубокое залегание горных пород с повышенным содержанием ^{238}U и ^{226}Ra ;
- присутствие в геологическом разрезе и разгрузка радоновых вод или подземных вод с повышенным содержанием радона.
- наличие и современная активность разрывных нарушений (разломов);
- современная вулканическая активность территории, наличие близких к поверхности магматических очагов, выбросы вулканических газов, гидротермальная активность;
- развитие активных экзогенных геологических процессов (оползни, карст, суффозия, выветривание).

Различное сочетание перечисленных выше признаков дает возможность выделения радоноопасных зон для принятия первоочередных мероприятий по снижению облучения населения радоном в домах.

Следует иметь в виду, что, как упоминалось выше, повышенное поступление радона из геологической среды является важным, но не единственным фактором, обуславливающим формирование повышенных концентраций радона в зданиях. В этой связи даже на территориях с кларковым содержанием ^{226}Ra в геологической среде, потенциально безопасных с точки зрения геогенного радона, где в большинстве зданий содержание радона не превышает норматива, могут быть обнаружены здания с повышенной концентрацией радона. Это связано, прежде всего, с конструктивными особенностями зданий: излишней герметичностью помещений, наличием контакта подвалов здания с открытым грунтом основания (в том числе, через негерметичные врезки коммуникаций), или формированием в здании «стек-эффекта» («эффекта дымовой трубы»), благодаря которому здание является своеобразным «насосом», перекачивающим воздух из грунтов основания в помещения, расположенные выше. В то же время в областях повышенного радонового риска лишь определенный процент зданий характеризуется повышенными концентрациями радона, в остальных концентрации радона не превышают

установленных норм. Например, в современных зданиях, где грунты основания в должной мере изолированы от подвальных и/или жилых помещений, концентрации радона, как правило, не превышают нормативных значений даже в радоноопасных зонах. Этот факт иллюстрируется на рис. 2.3.1. Площадь радоноопасных зон, как правило, значительно меньше площади безопасных территорий, следовательно, количество домов, расположенных в радоноопасных зонах (и количество людей в них проживающих) существенно меньше, чем в неопасных. В результате в неопасных областях количество зданий, в которых концентрация радона превышает допустимые уровни, может оказаться больше, чем в радоноопасных областях приоритетных по радону (рис. 2.3.1). Это связано, как говорилось ранее, с тем, что в основе определения радоноопасных областей лежит понятие не риска, а опасности, которое не учитывает количество домов (людей), подвергающихся негативному воздействию.

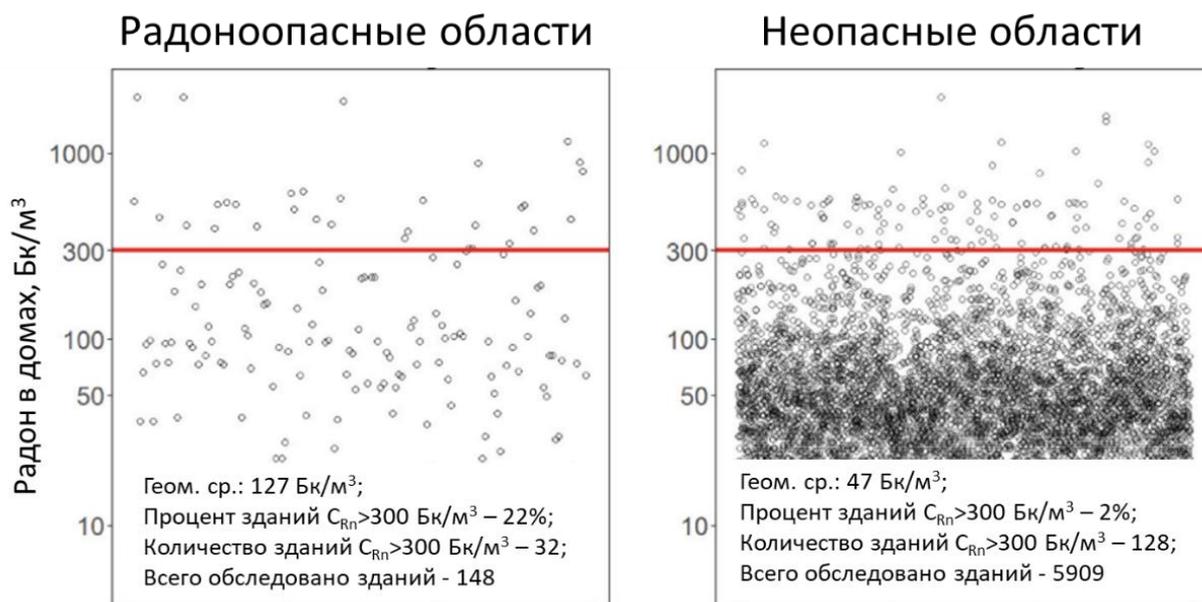


Рис. 2.3.1 – Сравнение распределения радона внутри помещений внутри и за пределами официально объявленных приоритетных зон по радону в Германии [Petermann et al., 2022]. Данные относятся к 12-месячным измерениям в 2020–2021 гг. на первом этаже в жилых зданиях. Референтный уровень ОА радона в воздухе зданий в Европе, согласно EU-BSS, составляет 300 Бк/м³

2.3.3. Оценка потенциальной радоноопасности участков строительства

2.3.3.1. Существующая система нормирования показателей потенциальной радоноопасности участков строительства

Оценка потенциальной радоноопасности отдельных участков под строительство является более узкой задачей по сравнению с картированием потенциальной радоноопасности территорий. Данный вид исследований выполняется в рамках инженерно-экологических изысканий на стадии разработки проекта в масштабе 1:500 – 1:5000. Цель такой оценки – на основе комплекса оперативных измерений ответить на вопрос, присутствуют ли на данном конкретном участке признаки потенциальной радоноопасности или нет. В случае, если на участке признаки потенциальной радоноопасности гарантированно отсутствуют, то его можно считать безопасным по радону (радонобезопасным), следовательно, при проектировании на таких участках, никаких мер по оценке поступления радона в здания (оценке радоноопасности зданий) и, тем более, по защите проектируемых зданий от радона не требуется. В случае, если на участке присутствуют признаки потенциальной радоноопасности, участок считается потенциально радоноопасным, т.е. на нем необходима оценка возможного поступления радона в проектируемые здания с последующим расчетом (в случае необходимости) противорадоновой защиты.

Проведение оценки потенциальной радоноопасности участков строительства регламентируется не только строительными, но также и санитарными нормативно-методическими документами. Оценка потенциальной радоноопасности территорий, по сути, имеет непосредственное отношение к оценке воздействия окружающей среды на здоровье человека, что естественно регламентируется санитарными правилами и нормами. При этом строительные нормы и правила не должны противоречить НРБ-99/2009 [СанПиН 2.6.1.2523-09] и ОСПОРБ 99/2010 [СП 2.6.1.2612-10]. Если в НРБ-99/2009 регламентируется только среднегодовое

значение ЭРОА изотопов радона в помещениях, что не относится напрямую к оценке потенциальной радоноопасности территорий, то, согласно ОСПОРБ 99/2010 (п. 5.1.6), «При выборе участков территорий под строительство зданий жилищного и общественного назначения выбираются участки с мощностью эквивалентной дозы гамма-излучения менее 0,3 мкЗв/ч и плотностью потока радона с поверхности грунта не более 80 мБк/м²·с. При проектировании здания на участке с плотностью потока радона с поверхности грунта более 80 мБк/м²·с в проекте должна быть предусмотрена система защиты здания от радона». Для зданий производственного назначения такой уровень ППР составляет 250 мБк/м²·с.

Допустимый уровень ППР для участков под строительство жилых и общественных зданий (80 мБк/м²·с) был получен путем решения обратной задачи радонового баланса для так называемого «модельного» или «эталонного» дома НКДАР ООН [Маренный, 2006; Источники ..., 1992]. При подстановке в решение задачи среднемировых усредненных значений параметров радонового баланса было получено, что среднегодовое значение ЭРОА изотопов радона в воздухе «эталонного» дома может превышать допустимый уровень для вновь построенных зданий жилого и общественного назначения – 100 Бк/м³ (НРБ-99/2009), в случае, если среднегодовое значение ППР из грунтов основания здания превышает значение 80 мБк/м²·с. Результат получен при условии отсутствия какой-либо противорадовой защиты (весь радон, выделяющийся из грунтов, поступает в помещение), с учетом 10% вклада торона, которым, вообще говоря, можно пренебречь. Таким образом, установленное в ОСПОРБ 99/2010 допустимое значение ППР из грунтов на участке строительства – это, что очень важно, – *среднегодовое* значение ППР из грунтов основания в помещения здания.

Стадии проектирования, на которой необходимо проводить оценку радоноопасности, конкретные размеры участка, для которого необходимо проводить оценку, методы измерения (определения) ППР, общий алгоритм оценки потенциальной радоноопасности участков изложен в строительном

Своде правил [СП 502.1325800.2021], а также в методических указаниях [МУ 2.6.1.2398-08] и [МУ 2.6.1.038–2015], уточняющие и дополняющие положения [МУ 2.6.1.2398-08].

Согласно п. 6.1 МУ 2.6.1.2398-08, «Основным признаком потенциальной радоноопасности земельных участков, значение которого подлежит определению при радиационном контроле, является плотность потока радона (ППР) с поверхности грунта на участке планируемой застройки в пределах контура проектируемых объектов строительства». Измерения ППР проводятся в контрольных точках, расположенных в узлах сети 10×10 м, но не менее чем в 10 точках в пределах каждого контура застройки. Когда точное положение габаритов проектируемых сооружений неизвестно (например, на предпроектных этапах), предусмотрены измерения ППР по разреженной регулярной сети на всей территории, отведенной под строительство. То есть, оценка потенциальной радоноопасности участков строительства проводится на основе результатов однократных измерений ППР с поверхности грунта в пределах контура проектируемого объекта до начала строительных работ. Среднее по участку значение ППР (с учетом неопределенности оценки), полученное по результатам однократных (практически «мгновенных») измерений сравнивается с действующими нормативами, установленными ОСПОРБ 99/2010.

Однако оценка радоноопасности только на основе однократных измерений ППР с поверхности грунта перед строительством может приводить к некорректным результатам, как в связи с существенной временной изменчивостью ППР с поверхности грунта, так и ввиду возможной изменчивости радоновыделения грунтов по глубине. ППР формируется в слое, толщиной около 1,5 м, то есть измеренное значение ППР характеризует радоновыделение грунта, залегающего до глубины 1,5 м. В случае если глубина заложения фундамента проектируемого здания превышает эту отметку, а геологический разрез участка характеризуется слоистым строением с неоднородным распределением по глубине

параметров радоновыделения – концентрации ^{226}Ra , коэффициента эманирования и проницаемости грунтов, оценка потенциальной радоноопасности путем измерения ППР на поверхности может привести к некорректным результатам. Временная же изменчивость ППР может приводить к тому, что один и тот же участок в разное время может быть признан как опасным, так и безопасным, в зависимости от случайного сочетания факторов и условий на участке в момент проведения измерений ППР. Причем результаты многочисленных исследований показывают, что какого-либо основного, ведущего фактора или группы факторов, определяющих временную изменчивость потока радона, не существует [Маренный и др., 2016]. Учет поправки на временные колебания ППР, например, путем ввода каких-либо корректирующих коэффициентов (например, на влажность грунта, на атмосферное давление, на температуру и т.п.), приводящих измеренное значение к среднегодовому, невозможен.

Эти обстоятельства были учтены в методических указаниях [МУ 2.6.1.038–2015] «Оценка потенциальной радоноопасности земельных участков под строительство жилых, общественных и производственных зданий». Основные положения этого документа будут подробнее рассмотрены ниже.

2.3.3.2. Определение расчетной плотности потока радона из грунта

На основе многочисленных исследований, можно сделать вывод, что повышенное выделение радона из геологической среды может быть обусловлено, в основном, двумя причинами (двумя типами эманлирующих объектов):

- присутствием в приповерхностной части геологического разреза пород, характеризующихся повышенным радоновыделением, т.е. сочетанием повышенного содержания ^{226}Ra , высокой эманлирующей способности и проницаемости;
- наличием на территории зон повышенной проницаемости и

трещиноватости различного масштаба и генезиса (активные разломы, зоны изгибных деформаций, планетарная сеть линеаментов, подвижки крупных оползневых масс, карстовые системы и т.п.) в пределах которых формируются крупные трещины и пустоты, где создаются условия для конвективного переноса газов вблизи поверхности земли, и формирования аномалий радонового поля.

Основная задача оценки потенциальной радоноопасности отдельных участков строительства, как и более крупных территорий (см. предыдущий раздел), должна заключаться в выявлении этих основных признаков радоноопасности – повышенного содержания ^{226}Ra в грунтах и аномальных радоновых полей, связанных с конвективным переносом газов в зонах повышенной проницаемости. Присутствие на участке одного из перечисленных признаков является основанием для отнесения участка к потенциально радоноопасной категории.

В ходе инженерно-экологических изысканий для строительства необходимо определять параметры радоновыделения горных пород – удельную активность ^{226}Ra и коэффициент эманирования до глубины не менее 1,5–2,0 м ниже отметки проектируемого заложения подземной части здания, а также параметры радонового поля территории – плотность потока радона с поверхности грунта. Подчеркнем, однако, что непосредственные измерения ППП с поверхности грунта необходимо проводить исключительно с целью выявления аномальных радоновых полей, связанных с зонами проницаемости, а не для сравнения полученных измеренных значений с нормативами, т.к. сравнивать результаты однократных «мгновенных» измерении с допустимыми среднегодовыми значениями, регламентируемыми ОСПОРБ 99/2010 некорректно.

Вместе с тем, как упоминалось выше, согласно действующим нормативно-методическим документам, оценка радоноопасности может быть проведена только по среднегодовым значениям плотности потока радона с поверхности грунта, т.к. именно этот параметр нормируется в

ОСПОРБ 99/2010. Очевидно, что среднегодовое значение ППР из грунтов основания в помещения проектируемого здания нельзя получить по результатам «мгновенных» однократных измерений ППР с поверхности земли в случайный момент времени (как нельзя, например, определить среднегодовую температуру грунта проводя однократные измерения температуры на поверхности почвы). Оценить среднегодовое значение ППР с поверхности почвы можно только двумя путями: а) с помощью круглогодичного мониторинга ППР на участке строительства, что вряд ли приемлемо с практической точки зрения; б) расчетным методом на основе решения уравнения переноса радона в пористой среде.

Как показано в исследованиях [Микляев, 2015; Маренный и др., 2016], в условиях фоновых радоновых полей вне зон повышенной трещиноватости и проницаемости, перенос радона в геологической среде может быть удовлетворительно описан с помощью диффузионной модели. В этом случае усредненное (среднегодовое) значение ППР из грунтов детерминировано определяется четырьмя параметрами: удельной активностью ^{226}Ra в грунтах, плотностью, коэффициентом эманирования грунтов и длиной диффузии радона в грунтах. Таким образом, используя диффузионную модель переноса радона, исключая конвективные потоки радона в массиве, можно рассчитать значение ППР из грунтов в зависимости от удельной активности ^{226}Ra в грунтах, коэффициента эманирования, плотности и других свойств грунта.

Уравнение для расчета среднегодового значения ППР из грунта ($ППР_P$), имеет вид [Микляев, 2015; Маренный и др., 2016; UNSCEAR, 2000]:

$$ППР_P = 1000 \cdot C_{Ra} \cdot K_{эм} \cdot \rho \cdot \lambda_{Rn} \cdot L \quad , \quad (2.3.3)$$

где $ППР_P$ – расчетная величина ППР из грунта, мБк/м²·с;

C_{Ra} – удельная активность ^{226}Ra в грунтах активного слоя, Бк/кг;

$K_{эм}$ – коэффициент эманирования, отн. ед.;

ρ – плотность грунтов, кг/м³;

λ_{Rn} – постоянная распада ^{222}Rn , равная $2,1 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$;

L – длина диффузии радона в грунте (изменяется от 0,4 м в плотных неветрелых глинах до 2 м в высоко проницаемых крупнообломочных грунтах).

В основу данной формулы положены следующие допущения:

1) перенос радона осуществляется только диффузионным механизмом;

2) на верхней границе слоя грунта, для которого проводится расчет, концентрация радона стремится к таковой в атмосферном воздухе или равна нулю.

3) поступление радона из грунтов, залегающих ниже рассматриваемого слоя, отсутствует, т.е. на нижней границе слоя поток радона равен 0.

После подстановки в уравнение (2.3.3) константы распада радона – λ_{Rn} и эмпирически полученного усредненного значения длины диффузии L для рыхлых грунтов, равного 1,4 м, с учетом того, что удельная активность ^{226}Ra в грунтах определяется в дезманированном состоянии по дочерним продуктам распада в условиях отсутствия радиоактивного равновесия ($C_{Ra\text{ДПР}}$), получаем рабочую полуэмпирическую формулу для расчета ППР_P из каждого i -го слоя грунта:

$$(\text{ППР}_P)_i = 0,003 \cdot (C_{\text{РаДПР}})_i \cdot \frac{(K_{\text{эм}})_i}{1 - (K_{\text{эм}})_i} \cdot \rho_i, \quad (2.3.4)$$

где ППР_P – расчетная величина ППР из грунта, мБк/м²·с;

$C_{\text{РаДПР}}$ – удельная активность ^{226}Ra в грунтах, определенная по дочерним продуктам распада в условиях отсутствия радиоактивного равновесия Бк/кг;

$K_{\text{эм}}$ – коэффициент эманирования, отн. ед.;

ρ – плотность грунтов, кг/м³;

0,003 – коэффициент, имеющий размерность скорости, м/с.

Результаты расчета ППР по формуле (2.3.4) показывают хорошую сходимость как со среднегодовыми значениями ППР, определенными на экспериментальных площадках [Маренный и др., 2016], так и с усредненными данными, полученными по результатам обобщения измерений ППР на территории Москвы [Микляев, 2015].

Таким образом, на основании расчетов по формулам (2.3.3) или (2.3.4) может быть получена величина расчетного среднегодового значения ППР с поверхности любого слоя грунта, слагающего геологический разрез на участке строительства. Для проведения расчетов необходимо определить удельную активность ^{226}Ra , коэффициент эманирования и плотность грунтов в каждом литологическом слое (инженерно-геологическом элементе) на исследуемом участке. Определение перечисленных выше параметров проводится в образцах, отобранных из инженерно-геологических скважин, из каждого литологического слоя грунта (инженерно-геологического элемента), слагающего разрез участка. Глубина опробования определяется проектной глубиной заложения подземной части здания, а также расстоянием, на которое переносится радон в грунтовом массиве (мощностью активного слоя). В общем случае пробы следует отбирать до глубины 1,5–2,0 м ниже проектируемой отметки заглубления подземной части здания.

Все параметры, входящие в расчетную формулу (2.3.4), могут быть с достаточной точностью определены в лабораторных условиях. Удельная активность ^{226}Ra ($C_{\text{RaДППР}}$) может быть легко и оперативно определена на сцинтилляционных гамма-спектрометрических комплексах, входящих в комплект измерительной аппаратуры любой лаборатории радиационного контроля. Плотность грунтов следует брать по результатам инженерно-геологических изысканий, или определять по соответствующим методикам. Определение коэффициентов эманирования – нетривиальная задача, требующая специального оборудования и определенных навыков персонала. Однако, учитывая относительное постоянство коэффициентов эманирования грунтов, обладающих однородным составом и генезисом, и независимость

этого показателя от внешних условий (температуры, влажности), при расчетах величины $ППР_P$ целесообразно использовать усредненные (репрезентативные) значения коэффициентов эманации грунтов различного состава, определенные по ограниченным выборкам. Результаты исследований в самых разных регионах территории России (Московская, Тверская, Ленинградская, Новгородская, Курская, Нижегородская, Рязанская, Иркутская обл., Республика Карелия, Средний и Южный Урал, Северный Кавказ), позволили получить уточненные репрезентативные значения коэффициентов эманации различных типов грунтов [Маренный и др., 2016], которые целесообразно использовать при расчетах величины $ППР_P$. Эти значения приведены в табл. 2.3.1.

Таблица 2.3.1 – Значения коэффициента эманации для различных типов грунтов [Микляев, 2015, Маренный и др., 2016]

Тип грунта	Коэффициент эманации $K_{эм}$, отн. ед.
Пески, супеси	0,25
Суглинки	0,35
Глины	0,40
Грунты с высоким содержанием органического вещества	0,55
Рыхлая кора выветривания скальных пород (дресва, мука, суглинок)	0,35
Обломочная кора выветривания скальных пород (глыбы, щебень, гравий)	0,20
Скальные и полускальные породы	0,10

По результатам определения перечисленных выше параметров для каждого литологического слоя проводится расчет величины $ППР_P$ по формуле (2.3.4) и сравнение полученных значений с допустимым согласно ОСПОРБ 99/2010 уровнем ППР. В случае, если в разрезе участка до глубины 1,5–2,0 м ниже проектируемой отметки заглубления подземной части здания присутствуют грунты со значением $ППР_P$, превышающим допустимый уровень, установленный ОСПОРБ 99/2010, на участке присутствуют признаки потенциальной радоноопасности, а, следовательно, при разработке

проекта необходимо провести оценку поступления радона в проектируемые здания, и, в случае необходимости, предусмотреть меры по защите от радона. При отсутствии в разрезе грунтов с величиной $ППР_p$, превышающей допустимые уровни, участок может быть отнесен к радонобезопасным при условии, что территория характеризуется фоновым радоновым полем (на участке отсутствуют аномально высокие значения ППР с поверхности грунта). На таких участках никаких дополнительных мер по оценке поступления радона в здания не требуется.

Процедура расчетов может быть упрощена, т.к. допустимо проводить расчет $ППР_p$ только для максимального значения удельной активности ^{226}Ra в грунте, полученного по результатам анализа проб. Если значение $ППР_p$ для пробы с максимальной удельной активностью ^{226}Ra будет меньше установленного предела, то очевидно, что участок в целом по этому показателю относится к безопасной категории, и в дальнейших расчетах $ППР_p$ для остальных слоев грунта нет необходимости. Таким образом, в качестве расчетной плотности потока радона ($ППР_p$), которую необходимо сравнивать с уровнями, установленными действующими санитарными правилами, следует принимать значение ППР, рассчитанное по формуле (2.3.4) для грунтов с максимальной удельной активностью ^{226}Ra на участке.

Предлагаемый алгоритм позволяет учитывать удельную активность ^{226}Ra и коэффициент эманирования грунтов в ходе оценки радоноопасности, следуя при этом всем требованиям санитарно-гигиенических нормативных документов.

2.3.3.3. Выявление аномальных радоновых полей по результатам полевых измерений ППР

Оценка потенциальной радоноопасности территорий по расчетной величине $ППР_P$ может быть выполнена только в условиях фоновых радоновых полей, при преобладающем диффузионном механизме переноса радона, когда ППР определяется исключительно интенсивностью радоновыделения грунтов. В случае, если на участке по тем или иным причинам формируются аномальные радоновые поля, обусловленные конвективным переносом, поток радона из грунтов в здания практически не зависит от удельной активности ^{226}Ra в грунтах и коэффициента эманирования. В таких случаях оценить потенциальную радоноопасность территории можно только по результатам непосредственных измерений параметров радонового поля. Параметрами, косвенно или напрямую свидетельствующими о состоянии радонового поля, являются:

- ППР с поверхности грунтов;
- объемная активность радона в подпочвенном воздухе на глубине 0,5–1,0 м;
- ОА или ЭРОА радона в воздухе зданий, расположенных на территории;
- удельная активность радона в подземных водах.

В принципе аномальные значения любого из перечисленных параметров могут свидетельствовать об аномальном радоновом поле территории, однако далеко не все из них могут быть использованы в практике в рамках инженерно-экологических изысканий. Так, например, опробование водоносных горизонтов на содержание радона в рамках отдельных строительных площадок не может быть выполнено, т.к. стандартные инженерно-геологические и инженерно-экологические исследования не предполагают опробование водоносных горизонтов на участке. Содержание радона в воздухе помещений существующих зданий, как было указано в предыдущих разделах, существенно зависит от условий

измерений, конкретной конструкции зданий и отдельных помещений, кроме того, этот параметр может быть использован только при наличии существующих зданий на участке или в непосредственной близости от него.

Как было указано выше, во многих странах в качестве параметра, характеризующего радоновое поле территории, используется ОА радона в подпочвенном воздухе. Однако этот параметр, во-первых, подвержен весьма существенным и незакономерным пространственно-временным колебаниям, причем в слабопроницаемых грунтах колебания ОА радона в подпочвенном воздухе могут превышать по амплитуде колебания ППР с поверхности грунта. Во-вторых, и это главное, для измерений ОА радона в подпочвенном воздухе необходимо вмешательство в грунтовый массив, а именно, нарушение его естественной структуры (бурение шпуров) и условий переноса подпочвенного воздуха в массиве (принудительная откачка проб воздуха). По этой причине результаты измерений крайне чувствительны к особенностям применяемых методик пробоотбора, прежде всего, таким как способ и глубина погружения пробоотборника и скорость прокачки воздуха. Очевидно также, что особенности пробоотбора сильно зависят от характеристик грунтов, в которых этот пробоотбор проводится, прежде всего, от плотности, проницаемости и состава грунта (рыхлый, скальный, полускальный, трещиноватый, массивный и т.п.). Например, как указано в работе [Gruber et al., 2013], два различных способа погружения зонда, применяющиеся в Чехии (глубина шпура 0,8 м, зонд плотно притерт к стенкам шпура) и в Германии (глубина шпура 1,0 м, изоляция области пробоотбора от атмосферного воздуха проводится с помощью надувной груши), дают разные результаты при объективно одинаковых условиях на площадке. Кроме того, способы пробоотбора почвенного воздуха, успешно применяющиеся в рыхлых грунтах средней Европы (Чехия, Германия), совершенно неприменимы, например, для плотных скальных подпочв Средиземноморья, где заглубление зонда даже на 0,2–0,3 м представляет собой нелегкую задачу. Опыт показывает, что в ряде случаев проходка шпура

в достаточной мере изолированного от атмосферного воздуха (для гарантии отсутствия подсоса атмосферного воздуха в пробоотборник), в принципе невозможна.

В качестве оптимального параметра для выявления аномальных радоновых полей может выступать ППР с поверхности грунтов. Единственным недостатком данного параметра является указанная выше временная изменчивость ППР. Однако временная нестабильность является, если можно так выразиться, фундаментальным свойством радонового поля, и практически в одинаковой мере характерна как для ППР, так и для ОА радона в подпочвенном воздухе, и для любых других параметров. Задачей исследователя должны быть не попытки полностью избавиться от этой нестабильности, что в принципе невозможно, а выбор условий и методов измерений, позволяющих минимизировать неопределенности, а также правильная интерпретация полученных результатов. Несомненным преимуществом измерений ППР является минимальное нарушение структуры грунтового массива и условий переноса радона в массиве в процессе пробоотбора, что обеспечивается унифицированным пассивным методом пробоотбора, независящим от состава и проницаемости грунтов (процедура установки накопительных камер на любых грунтах одинакова). Это делает использование измерений ППР с поверхности грунтов, несомненно, более предпочтительным, по сравнению с ОА радона в подпочвенном воздухе (см. раздел 2.1.3). Кроме того, в России подобные измерения уже более двух десятилетий проводятся в массовом порядке. Существуют простые, опробованные на практике и хорошо себя зарекомендовавшие методики измерений и оборудование, доступное для любой аккредитованной лаборатории. Таким образом, для оценки потенциальной радоноопасности участков строительства, кроме определения величины $ППР_p$, необходимо проведение измерений ППР с целью выявления возможных аномалий радонового поля.

Методические аспекты измерения ППР с поверхности грунта подробно изложены в упомянутых выше МУ 2.6.1.2398-08, МУ 2.6.1.038–2015, а также в литературе [Методика ... № 40090.6К816; ВМУ Р1-97; Кузнецов, 1998; Зуевич и др., 2001; Яковлева, 2011]. Важно, что результаты измерений могут быть существенно искажены воздействием различных факторов, влияющих на поток радона, точный учет которых невозможен. В этой связи необходимо строго соблюдать требования к условиям, при которых допустимо проводить измерения. Наиболее полный перечень ограничений по условиям измерений ППР приведен в [МУ 2.6.1.038–2015], согласно которому полевые измерения ППР с поверхности грунта недопустимо проводить при следующих неблагоприятных условиях:

а) на поверхности искусственных или естественных (ледяных и т.п.) покрытий; в этом случае рекомендуется пробивка покрытий и выдерживание лунок открытыми для установления диффузионного равновесия,

б) в период зимних оттепелей и весеннего снеготаяния при появлении воды на подошве снежного покрова;

в) в период затяжных дождей (сутки и более перед началом измерений);

г) при избыточном увлажнении почв и грунтов на участке, когда почвенная масса обнаруживает текучесть (при сжимании в руке из нее выделяется вода, которая сочится между пальцами);

д) при временном затоплении участка, когда в понижениях микрорельефа застаивается вода;

е) при временном подтоплении участка, когда глубина уровня грунтовых вод и/или верховодки менее 0,5 м;

ж) при резком (в течение суток) изменении погодных условий (похолодание, потепление, и т.п.).

При наличии на участке хотя бы одного из неблагоприятных условий, перечисленных выше, следует либо изменить условия измерений (например, удалить слой льда или иное покрытие), либо перенести измерения ППР на

период с более благоприятными условиями для выполнения измерений. Кроме того, из перечисленных ограничений следует, что полевые измерения ППР нецелесообразно проводить на заболоченных и постоянно переувлажненных участках. Очевидно, что в таких условиях плотность потока радона будет заведомо низкой, и оценку радоноопасности следует проводить по результатам определения расчетного значения $ППР_p$, привлекая по возможности результаты измерения концентраций радона в существующих зданиях, расположенных либо непосредственно на участке, либо в непосредственной близости от него (при наличии таковых).

Выявление аномальных радоновых полей может выполняться по результатам измерения ППР с поверхности грунта только при благоприятных условиях, т.е. при отсутствии на участке перечисленных выше ограничений.

Радоновое поле на участке считается аномальным, если среднее значение плотности потока радона, полученное по результатам измерений ($ППР_{II}$) с учетом погрешности измерения более чем в 3 раза превышает расчетное значения $ППР_p$, полученное для участка по формуле (2.3.4), так как измеренные потоки радона в данном случае явно не обеспечиваются запасом ^{226}Ra в грунтах. Основное условие отнесения радонового поля на участке к аномальному типу может быть представлено в виде неравенства:

$$ППР_{II} + \Delta > 3 \cdot ППР_p, \quad (2.3.5)$$

где $ППР_{II}$ – среднее измеренное среднее значение ППР на участке, мБк/м²·с;

Δ – неопределенность оценки измеренного среднего значения ППР на участке, мБк/м²·с;

$ППР_p$ – расчетное значение ППР на участке (для слоя с максимальным содержанием ^{226}Ra), мБк/м²·с.

Дополнительным критерием отнесения участка к аномальному типу является превышение максимальных частных измеренных значений ППР в контрольных точках значения 1000 мБк/м²·с:

$$ППР_{max} + \Delta > 1000 \quad \text{мБк/м}^2 \cdot \text{с}, \quad (2.3.6)$$

где $ППР_{max}$ – максимальное частное значение ППР на участке, мБк/м²·с;

Δ – неопределенность оценки максимального значения ППР на участке, мБк/м²·с.

На участках, где выполняется неравенство (2.3.5) и/или (2.3.6) радоновое поле является аномальным, при невыполнении данного неравенства, радоновое поле на участке следует считать фоновым. Участки с аномальным радоновым полем относятся к потенциально радоноопасной категории, независимо от конкретных значений параметров $ППР_P$ и $ППР_{II}$, т.к. считается, что среднегодовое значение ППР на таких участках заведомо выше допустимых уровней, установленных ОСПОРБ 99/2010. При проектировании и строительстве на таких участках необходимо проведение оценки поступления радона в подвальные помещения проектируемых зданий (оценка потенциальной радоноопасности проектируемого здания), и, в случае необходимости, устройство противорадоновой защиты.

2.3.3.4. Общий алгоритм оценки потенциальной радоноопасности участков строительства

Алгоритм организации оценки потенциальной радоноопасности участка и принятия решений показан на рис. 2.3.2. Алгоритм состоит из трех основных блоков: полевого, лабораторного и камерального, за которыми следует уже непосредственно оценочная часть. Полевые исследования включают в себя экспонирование накопительных камер для определения ППР с поверхности грунта, а также отбор проб грунта из инженерно-геологических скважин для последующего определения удельной активности ²²⁶Ra и других свойств грунтов. Проведение измерений ППР возможно только при благоприятных условиях, т.е. в случае отсутствия на участке ограничений по условиям измерений, перечисленных выше. Если условия на участке не удовлетворяют указанным требованиям, то выясняется возможность изменить условия на участке, например, провести инженерную

подготовку территории, или перенести измерения на период с более благоприятными условиями.

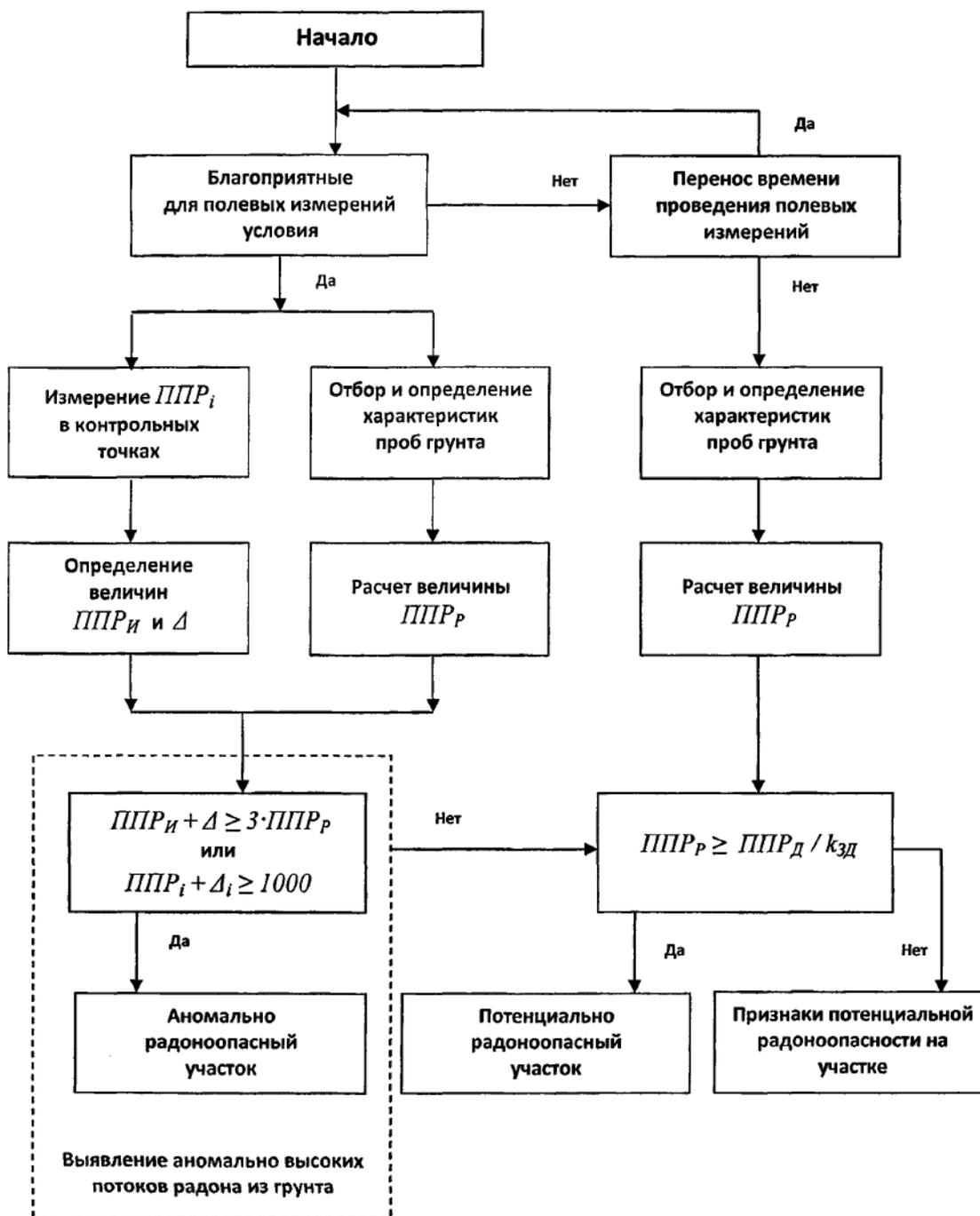


Рисунок 2.3.2 – Алгоритм оценки потенциальной радоноопасности участка по [МУ 2.6.1.038–2015]. Обозначения: $ППР_{И}$ – измеренное значение ППР; $ППР_{Р}$ – расчетное значение ППР; $ППР_{Д}$ – допустимый уровень ППР согласно ОСПОРБ 99/2010

Если по архивным данным на участке и прилегающей территории отсутствуют аномальные значения плотности потока радона (более 1000

мБк/м²·с), то на таких территориях, при невозможности в период изысканий проведения инженерной подготовки участка или переноса измерений, оценка потенциальной радоноопасности участка может быть осуществлена без полевых измерений только на основе расчета ППР с использованием данных о радиационно-физических характеристиках грунтов в соответствии с уравнением (2.3.4).

Если на участке и прилегающей территории отсутствуют архивные данные, либо ранее были зафиксированы аномальные значения плотности потока радона, превышающие 1000 мБк/м²·с, а также при неглубоком залегании (менее 1,5 м) скальных (полускальных) грунтов, перекрытых хорошо проницаемыми отложениями, полевые измерения ППР с поверхности грунта должны быть выполнены в обязательном порядке. При невозможности проведения измерений непосредственно в период изысканий, их необходимо провести на последующих стадиях до утверждения окончательного проекта здания.

Измерения ППР на участке также рекомендуется проводить в случае, если на данной территории по результатам тех или иных предыдущих исследований известно наличие горных пород с урановой минерализацией, активных тектонических разломов с повышенным выделением радона, выходов радоновых вод, а также наличия большого количества зданий с повышенными значениями ОА и ЭРОА радона.

На заключительном этапе проводится оценка потенциальной радоноопасности участка строительства. В случае, если на участке зафиксировано аномальное радоновое поле, то есть выполняется условие (2.3.5) и/или (2.3.6), он считается потенциально радоноопасным (на участке присутствуют признаки потенциальной радоноопасности). В случае, если условия (2.3.5) и/или (2.3.6) не выполняются, т.е. радоновое поле на участке является фоновым, оценка потенциальной радоноопасности проводится на основе расчетного значения плотности потока радона $ППР_p$. Если величина $ППР_p$ превышает уровни, установленные действующими санитарными

правилами ($ППР_d$), то на участке также присутствуют признаки потенциальной радоноопасности, т.е. он может быть отнесен к потенциально радоноопасной категории. В противном случае следует считать, что на участке отсутствуют признаки потенциальной радоноопасности, т.е. участок относится к безопасной категории.

При строительстве зданий на участках, характеризующихся присутствием признаков потенциальной радоноопасности, принятие решения о необходимости радонозащиты и ее проектирование (при наличии необходимости) проводится в соответствии со Сводом правил [СП 321.1325800.2017]. При этом на участках с **аномальным** радоновым полем величину радонового потенциала грунта целесообразно принимать исходя из измеренного среднего значения ППР.

Предложенный алгоритм позволяет провести оценку потенциальной радоноопасности участков строительства с учетом распределения источников радоновыделения в разрезе, а также возможного формирования аномальных радоновых полей. Применение ограничений на условия измерений ППР на участке в совокупности с новым подходом к интерпретации полученных результатов позволяет существенно снизить неопределенность оценки, связанную с временными колебаниями радонового поля. Использование в качестве основного параметра для оценки радоноопасности **вне зон радоновых аномалий** расчетного значения $ППР_p$, основанного на стабильных во времени и пространстве значениях удельной активности ^{226}Ra и коэффициента эманирования в грунтах, позволяет существенно повысить достоверность оценки потенциальной радоноопасности.

Картирование потенциальной радоноопасности крупных территорий тесно связано с оценкой потенциальной радоноопасности отдельных участков строительства. Карты потенциальной радоноопасности территорий необходимы для принятия решений на предпроектных стадиях инженерно-экологических изысканий, когда конкретное положение проектируемых зданий еще не определено, на стадии выбора посадки зданий, а также на

проектной стадии изысканий при оценке радоноопасности отдельных участков строительства для определения необходимости прямых измерений ППР.

Взаимосвязь между картированием крупных территорий и оценкой радоноопасности отдельных участков строительства заключается, прежде всего, в том, что, с одной стороны, оценка потенциальной радоноопасности на отдельных участках строительства представляет исходную информацию для картирования радоноопасности территорий. С другой стороны, при оценке потенциальной радоноопасности отдельных участков строительства необходимо максимально использовать данные карт потенциальной радоноопасности. По сути, задача оценки потенциальной радоноопасности на отдельных участках строительства (на стадии проекта) – это уточнение положения эманерирующих объектов (выявленных по результатам картирования) непосредственно в пределах габарита проектируемого здания, а также определение численных значений показателей, необходимых для разработки проекта радонозащитных мероприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ВМУ Р1-97. Определение плотности потока радона на участках застройки : временные методические указания //АНРИ. – 1996/97. – №5. – С. 8–14.
- Гулабянц Л.А. Пособие по проектированию противорадоновой защиты жилых и общественных зданий. – М.: НО «ФЭН-НАУКА», 2013а. – 52 с.
- Гулабянц Л.А. Радоноопасность. Термины, критерии, признаки // АНРИ. – 2013. – № 1 (72). – С. 12–14.
- Гулабянц Л.А., Л.И. Лившиц. Математическое моделирование поля концентрации радона в окрестности подземной части здания // АНРИ. – 2014. – № 1 (76). – С. 22–28.
- Зуевич Ф.И., Шкрабо И.В., Лазарев А.В., Воронин Л.А. Методика определения потока радона с поверхности земли // АНРИ. – 2001. – № 4. – С. 41–43.
- Источники, эффекты и опасность ионизирующей радиации: Доклад научного комитета ООН по действию атомной радиации Генеральной Ассамблее за 1988 г., с приложениями: в 2-х томах / пер. с англ. – М.: Мир, 1992. – Т. 1. – 552 с.
- Кузнецов Ю.В. К вопросу о методиках измерения плотности потока радона // АНРИ. – 1998. – № 4 (15). – С. 8–18.
- Маренный, А.М. Система мотивированного сбора информации о содержании радона в помещениях с участием населения / А.М. Маренный, С.Ю. Антропов, Л.Э. Карл, Д.В. Щитов, П.А. Сидякин, М.А. Мурзабеков // Радиационная гигиена. – 2022. – Т. 15, № 1. – С. 96–103. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2022-15-1-96-103>
- Маренный А.М., Охрименко С.Е., Павлов И.В. Задачи и методы оценки потенциальной радоноопасности селитебных территорий // АНРИ. – 2006. – № 2 (45). – С. 25–30.
- Маренный А.М., Цапалов А.А., Микляев П.С., Петрова Т.Б. Закономерности формирования радонового поля в геологической среде. – М.: Перо, 2016. – 394 с. – ISBN 978-5-906883-94-0.
- Методика измерения плотности потока радона с поверхности земли и строительных конструкций. Разработана ЗАО НТЦ «НИТОН». Аттестована ФГУП ВНИИФТРИ, свидетельство № 40090.6К816 от 02.06.2006.
- Микляев П.С. Научные основы оценки потенциальной радоноопасности платформенных территорий : дисс. ... докт. геол.-мин. наук. – Москва, 2015. – 307 с.

- МУ 2.6.1.038–2015. Оценка потенциальной радоноопасности земельных участков под строительство жилых, общественных и производственных зданий : методические указания. – М.: ФМБА России, 2016. – 36 стр.
- МУ 2.6.1.2398-08. Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка земельных участков под строительство жилых домов, зданий, сооружений общественного и производственного назначения в части обеспечения радиационной безопасности : методические указания. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. – 27 с.
- СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009) : санитарные правила и нормативы. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. – 100 с.
- СП 2.6.1.2612-10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010) : санитарные правила и нормативы. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. – 83 с.
- СП 321.1325800.2017. Здания жилые и общественные. Правила проектирования противорадоновой защиты : свод правил. – М.: Стандартинформ, 2017. – 35 с.
- СП 502.1325800.2021. Инженерно-экологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ : свод правил. – М.: Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, 2021. – 141 с.
- Яковлева В.С. Методы измерения плотности потока радона и торона с поверхности пористых материалов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 174 с.
- Bossew P., Cinelli G., Ciotoli G., Crowley Q.G., De Cort M., Elío Medina J., Gruber V., Petermann E., Tollefsen T. Development of a Geogenic Radon Hazard Index-Concept, History, Experiences // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2020. – Vol. 17, nr 11. – 4134. <https://doi.org/10.3390/ijerph17114134>
- Council Directive 2013/59/Euratom of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation, and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom // Official Journal of the European Union. – Vol. 57, L 13, 7.11.2013. – 73 p.
- Gruber V., Tollefsen, T. De Cort M. The European indoor radon map – questionnaire results and evaluation for quality assurance. JRC Scientific and Policy Reports. JRC87017. – 2013.

- Gruber V., Bossew P., De Cort M., Tollefsen T. The European map of the geogenic radon potential // *Journal of Radiological Protection*. – 2013a. – Vol. 33, nr 1. – P. 51–60. <https://doi.org/10.1088/0952-4746/33/1/51>
- Nezmal M., Nezmal M., Matolin M., Barnet I., Miksova J. The New Method for Assessing the Radon Risk of Building Sites // *Czech Geological Survey Special Papers*, Vol. 16. – Prague: Czech Geological Survey, 2004. – 94 p. – URL: www.radon-vos.cz/pdf/metodika.pdf
- Petermann E., Bossew P. Mapping indoor radon hazard in Germany: The geogenic component // *Science of the Total Environment*. – 2021. – Vol. 780. – 146601. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146601>
- Petermann E., Bossew P., Hoffmann B. Radon hazard vs. radon risk – On the effectiveness of radon priority areas // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2022. – Vol. 244-245. – 106833. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2022.106833>
- UNSCEAR. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Volume I: Sources. Annex B: Exposures from natural radiation sources. – New York: United Nations, 2000. – 76 p. – ISBN 92-1-142238-8.
- Tsapalov A., Kovler K., Shpak M., Shafir E., Golumbic Y., Peri A., Ben-Zvi D., Baram-Tsabari A., Maslov T., Schrire O. Involving schoolchildren in radon surveys by means of the “RadonTest” online system // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2020. – Vol. 217. – 106215. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106215>
- WHO handbook on indoor radon: a public health perspective. – Geneva: WHO Press, 2009. – 110 p. – ISBN 978-92-4-154767-3.