

2.1 МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАДОНОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Одно из основных направлений действий по снижению облучения населения природными источниками ионизирующего излучения (ПИИИ) касается эксплуатируемых и вводимых в эксплуатацию зданий: это приводит к постоянному уменьшению доли «неблагополучных» зданий. Естественно, должны рассматриваться все виды зданий, поскольку:

- в наибольшей степени облучение населения радоном происходит обычно в жилых домах;
- для некоторых категорий населения значительное, а иногда и основное облучение связано с нахождением в производственных зданиях;
- дополнительное воздействие ПИИИ происходит в общественных зданиях (учреждения образования, здравоохранения, культуры, спорта и т.д.), где население может находиться в течение достаточно длительного времени.

Содержание радона и его короткоживущих дочерних продуктов распада (ДПР) в воздухе помещений существенно (в разы) варьируется, как в течение суток, так и от сезона к сезону. Для целей нормирования в российском санитарном законодательстве используется понятие среднегодовой эквивалентной равновесной активности (ЭРОА) изотопов радона.

Однако в измерительной практике обеспечить непрерывный контроль в течение года, как правило, не представляется возможным. Поэтому результаты измерений по продолжительности измерений классифицируют как мгновенные (экспрессные, краткосрочные) или средние за некоторый период. К мгновенным результатам относят те, которые получены за период времени менее или порядка суток, к средним – за период от нескольких суток и более. Применительно к методу измерений (и самому измерению), в

результате которого получают мгновенное значение, применяют термин «инспекционный». Метод, в результате которого получают среднее за некоторый период значение, называют «интегральным». Для методов, продолжительность измерения которыми превышает сутки, но не превышает 6 суток, применяют термин «квазиинтегральные».

Переход от измеряемых мгновенных или средних за период значений объемной активности (ОА) радона или ЭРОА изотопов радона к нормируемому среднегодовому значению производится согласно действующим нормативно-методическим документам (НМД).

Отечественная нормативная база, определяющая порядок контроля облучения населения радоном, выделяет следующий перечень контролируемых объектов:

- воздух жилых, общественных и производственных помещений (пп. 5.3.2 и 5.3.5 НРБ-99/2009 [СанПиН 2.6.1.2523-09]);
- участки, выделяемые под строительство жилых, общественных и производственных помещений (п. 5.1.6 ОСПОРБ 99/2010 [СП 2.6.1.2612-10]);
- питьевая вода (п. 5.3.5 НРБ-99/2009 [СанПиН 2.6.1.2523-09]).

Термин «радоновые измерения» включает измерения ряда параметров (ОА радона, ЭРОА радона и торона, плотности потока радона (ППР), удельной активности (УА) радона) во всех объектах окружающей среды и среды обитания человека при решении различных задач по радиационному контролю территорий и зданий. Многообразие конкретных задач порождает широкий спектр методов и средств измерений для их решения.

2.1.1. Методы измерения содержания радона в воздухе

Контроль содержания радона в воздухе производится по ЭРОА радона, которое определяется непосредственно существующими СИ, либо на основе расчета на основании измеренного значения ОА радона.

Для определения значений ОА и ЭРОА радона в воздухе помещений используют различные методы, отличающиеся длительностью и процедурой измерения, а также используемыми средствами измерений [Маренный, 2002; Киселев и др., 2016]:

- мгновенные (экспрессные, инспекционные) измерения ОА и/или ЭРОА радона – длительность измерения от минут до часа (отбор проб воздуха и анализ его на месте отбора или в лаборатории с помощью аппаратуры, регистрирующей ионизацию или сцинтилляцию, обусловленную альфа- и бета-частицами при распаде радона);
- квазиинтегральные измерения – методы, длительность непрерывного измерения которых составляет от 2 до 6 суток, основанные, как правило, на сорбции радона пробоотборниками с активированным углем с последующим измерением активности угля на радиометре и расчетом ОА радона, или радиометрами ОА радона;
- интегральные методы – методы, обеспечивающие длительность непрерывного измерения ОА радона от нескольких суток до полугода-года, представленные пассивными диэлектрическими трековыми или электретыными детекторами, помещенными в пробоотборную камеру, устроенную таким образом, что во внутренний объем проникает радон, но не попадают имеющиеся в воздухе ДПР, а также мониторами радона.

Отметим, что разработаны также методы ретроспективного определения средней ЭРОА (ОА) радона в помещении за последние 10-40 лет. Методы основаны на измерении активности ДПР радона, осевших на предметах, находящихся в течение известного периода времени в данном помещении. В качестве таковых используются стекла окон, зеркал и др. В этом случае трековый детектор (или детектирующая сборка) герметично накладывается на соответствующую поверхность, выдерживается определенное время и затем подвергается обработке. Как вариант, вместо этого могут использоваться долго находившиеся в данном помещении

предметы, сами потенциально являющиеся трековыми детекторами (например, компакт-дисков и их упаковок). Однако отсутствие гарантий о неизменности условий экспозиции исследуемых материалов является основной причиной того, что данные методы не представлены в структуре метрологического обеспечения и рассматриваются скорее как оценочные исследования.

Эти методы и, соответственно, типы средств измерений, как правило, весьма четко ориентированы на конкретную цель, которая преследуется в ходе измерений. Выбор конкретного прибора и метода измерения осуществляется в зависимости от цели и условий проведения измерения, получаемой информации, допустимой продолжительности взятия проб, чувствительности прибора и стоимостных показателей [Маренный, 2012].

Например, для определения среднегодовых значений ОА радона в воздухе в рамках выборочных обследований населенных пунктов на содержание радона в помещениях, наиболее целесообразно проводить одно- или двухсезонные измерения ОА радона продолжительностью несколько месяцев с помощью интегральных радоновых экспозиметров на основе трековых детекторов [МУ 2.6.1.037–2015]. В тоже время рекогносцировочные выборочные измерения с большей неопределенностью могут быть выполнены квазиинтегральным методом с использованием пассивных угольных пробоотборников в течение 3-6 суток [МУ 2.6.1.037–2015]. Однако для выполнения углубленных обследований зданий с целью выяснения источников поступления радона в здание и путей его переноса по зданию, очевидно, предпочтительно применение СИ для экспрессных (мгновенных, инспекционных) и интервальных измерений [МУ 2.6.5.062–2017].

Для измерения ОА ДПР радона (или ЭРОА радона) используется несколько разновидностей приборов с прокачкой воздуха в течение заданных интервалов времени через фильтр, на котором осаждаются аэрозоли с ДПР, альфа- или бета-излучение которых регистрируется и/или

спектрометрируется с помощью полупроводниковых или сцинтилляционных детекторов [Крисюк, 1989].

2.1.1.1. Мгновенные методы измерений ОА и ЭРОА радона

Мгновенными (инспекционными, экспрессными) принято считать измерения, которые обычно реализованы на основе активного метода отбора проб воздуха за промежуток времени от нескольких минут до нескольких часов.

Мгновенные измерения проводятся с применением как радиометров радона (определение ОА радона в воздухе), так и радиометров аэрозоль ДПР радона и торона (определение ЭРОА изотопов радона в воздухе и/или ОА отдельных ДПР радона и торона) [Крисюк, 1989; МУ 2.6.5.062–2017].

В этих СИ при измерениях ОА радона реализуются методы, включающие в себя предварительную фильтрацию воздуха от аэрозолей ДПР, в результате чего в измерительное устройство (камеру) поступает только воздух, содержащий радон-газ. После этого измерительное устройство с анализируемым воздухом выдерживается в течение некоторого времени в зависимости от условий измерений (обычно от 5-20 до 150-180 мин) для установления равновесия между радоном и его ДПР в рабочей камере, после чего производится определение ОА радона (по излучению радона и/или ДПР).

Измерения в воздухе помещений в контрольной точке выполняются в соответствии с инструкциями по эксплуатации к используемым приборам. Расчеты и анализ результатов измерений в помещениях проводятся по [МУ 2.6.1.2838-11] и [МУ 2.6.1.037–2015].

Мгновенные измерения проводятся обычно и при приемке зданий в эксплуатацию, когда требуется оперативно оценить соответствие содержания радона в атмосфере здания нормативным уровням.

Они позволяют лишь приближенно судить о радоновой опасности, так как характеризуют лишь текущее состояние атмосферы. Следует иметь в

виду, что результаты мгновенных измерений не могут быть основой для принятия решений о превышении санитарно-гигиенических нормативов, регламентирующих среднегодовые значения объемной активности.

Однако именно эти измерения позволяют быстро оценить актуальность радоновой проблемы в данной ситуации, определить ЭРОА торона, необходимы для оценки коэффициентов равновесия в реальных условиях и определения источников и путей переноса радона в здании.

Заметим, что по результатам одновременных мгновенных измерений ОА и ЭРОА радона можно определить значение коэффициента равновесия между радоном и его ДПР, а используя полученное значение – оценить кратность воздухообмена в помещении [МУ 2.6.5.062–2017]. Некоторая неопределенность в расчете фактора равновесия по кратности воздухообмена связана с отсутствием практического контроля степени осаждения ДПР радона ^{218}Po и ^{214}Pb на поверхностях в помещении.

2.1.1.2. Квазиинтегральные методы

Квазиинтегральными принято считать измерения с длительностью отбора проб или экспонирования средств измерений в контролируемой атмосфере свыше 1 до 6 суток. Средства квазиинтегральных измерений сочетают в себе специфику аппаратуры для инспекционных с возможностью усреднения значений ОА радона за период до 6 суток, что является достаточным в ряде ситуаций.

Метод основан на адсорбции радона из воздуха на активированном угле и последующем анализе с помощью гамма-спектрометра (или альфа-радиометра) излучения ДПР, образовавшихся из адсорбированного радона. Суть метода измерений достаточно хорошо изучена и описана, а технология его реализации достаточно проста. Из основных тонкостей этого метода следует особо выделить те из них, которые связаны с метрологическими аспектами [Яковлева, 2010].

Среди отечественных средств для квазиинтегральных измерений известны приборы и методика на основе угольно-адсорбционного метода.

Границы диапазона измерений ОА радона в воздухе примерно такие же, как и для инспекционных средств измерений – от 20 Бк/м³ при сроках экспонирования измерительных камер не менее 3 суток до 20 кБк/м³, что также позволяет применять их для измерений ОА радона практически во всех типах объектов жилищного, общественного и производственного назначения. При необходимости диапазон измерений квазиинтегральных средств измерений, как и для радиометров радона инспекционного типа, может быть расширен в обе стороны за счет изменения времени экспонирования измерительных камер в контролируемой среде.

Относительная погрешность измерений ОА радона в воздухе с применением современных средств квазиинтегральных средств измерений составляет около 30%, что вполне достаточно для выполнения измерений в соответствии с их назначением.

Оценку значения ЭРОА радона можно получить умножением измеренного значения ОА радона на коэффициент равновесия для радона в жилых домах, который обычно меняется в пределах 0,3–0,7. В соответствии с рекомендацией [МУ 2.6.1.2838-11] среднее значение коэффициента равновесия принимают равным 0,5.

Квазиинтегральные измерения ОА радона в воздухе помещений в контрольной точке выполняются в соответствии с инструкциями по эксплуатации к используемым приборам. Расчеты и анализ результатов измерений в помещениях проводятся по [МУ 2.6.1.2838-11] и [МУ 2.6.1.037–2015].

2.1.1.3. Интегральные методы

Интегральными принято считать измерения с длительностью отбора проб или экспонирования средств измерений от 10 суток до 1 года.

В настоящее время при проведении практически всех радоновых обследований при определении среднегодовых значений ОА радона в воздухе помещений интегральные измерения ОА радона в воздухе выполняются с использованием трекового метода, основанного на способности альфа-частиц при прохождении через полимерные пленки образовывать в них треки, количество которых пропорционально количеству альфа-частиц. Наибольшее распространение для проведения измерений ОА радона в помещениях получили пассивные пробоотборные камеры (экспозиметры) специально подобранной геометрии, внутри которых находятся трековый детектор [Маренный, 2012; Николаев, 2012].

Этому способствует то, что отклик трековых детекторов (количество накопленных латентных треков), сглаживает влияние различных факторов, в том числе суточных и даже сезонных изменений ОА радона в воздухе помещений, на результат измерений, который получается как «среднее за период измерений значение ОА радона в воздухе». Очевидно, что наилучший результат определения среднегодового значения ОА радона в помещении будет получен при интегральном измерении в течение года. Однако это в большинстве ситуаций трудно выполнимо. В практике измерений оптимальным приближением к оценке среднегодовой ОА радона в воздухе помещений считается среднее значение ОА радона по результатам двух измерений (по одному в теплый и отопительный периоды года) длительностью не менее трех месяцев каждое, Сроки измерений могут быть сокращены вплоть до 10 суток, однако неопределенность оценки среднегодовой ОА радона при этом, естественно, возрастает.

Оценку значения ЭРОА радона, как и в случае квазиинтегральных измерений, можно получить умножением измеренного значения ОА радона на коэффициент равновесия для радона в жилых домах, среднее значение которого, в соответствии с рекомендацией [МУ 2.6.1.2838-11], принимают равным 0,5.

Отметим основные преимущества интегрального трекового метода определения ОА радона в воздухе помещений:

- средства интегральных трековых измерений имеют небольшие размеры, не требуют энергопитания, не выделяют вредные вещества, не генерируют электромагнитные, радиационные, шумовые и прочие воздействия [Маренный, 2012];
- обращение с устройством может осуществляться в соответствии с прилагаемой инструкцией самим заказчиком обследования помещения, в том числе в рамках разработанной системы мотивированного сбора (СМС) [Маренный и др., 2022];
- совокупность особенностей метода и соответствующих средств измерений позволяют проводить, например, силами одной лаборатории, оптимальные с практической и экономической точек зрения широкомасштабные обследования населенных пунктов на содержание радона в помещениях.

2.1.1.4. Интервальные измерения

В отдельный вид измерений можно выделить т.н. интервальные (непрерывные) измерения. С этой целью, как правило, применяют радон-мониторы, которые по характеру получаемой информации относятся к средствам измерений любой длительности – инспекционным, квазинтегральным и интегральным [Киселев и др., 2016]. Это достигается возможностью задания интервалов измерения ОА радона выбранной длительности, которые непрерывно следуют друг за другом. Таким образом, можно получить последовательность результатов необходимой общей длительности, имитирующих в целом любые измерения – от инспекционных до интегральных. Однако интервальные измерения имеют существенное отличие, являющееся их важнейшим преимуществом в отличие от «чистых» инспекционных, квазиинтегральных и интегральных измерений, они позволяют не только усреднить результаты за соответствующие периоды

времени, но получить качественную и количественную картину временных изменений ОА радона за любой промежуток времени в период измерения. Радоновые мониторы представляют собой средства измерений, в которых реализован принцип непрерывной регистрации и измерений ОА радона в воздухе в течение заданных длительных интервалов времени. Принцип их действия не отличается от приборов для инспекционных измерений, основные отличия заключаются в алгоритме обработки получаемой информации.

На практике интервальные измерения используются преимущественно ОА радона в воздухе применяются, в основном, для исследовательских целей либо, например, при проведении углубленных радоновых обследований зданий [МУ 2.6.5.062–2017], применяются также мониторы радона для непрерывных (интервальных) измерений.

2.1.2. Измерение содержания радона в воде

Одним из значимых источников радона может являться вода, поступающая в здание из подземных источников (скважин) и содержащая радон в повышенных концентрациях.

Процесс перехода радона из воздуха в воду обратим. После отбора пробы воды для анализа ее необходимо перемещать и хранить в закупоренных бутылках, чтобы избежать потерь радона [Методические рекомендации ..., 1980].

Измерения удельной активности радона в воде выполняются в соответствии с инструкциями по эксплуатации к используемым приборам и приложенной методике измерений. Определение содержания радона в воде может определяться путем спектрометрического определения содержания радона в воде [Методические рекомендации ..., 1980], либо путем пропускания заданного объема воды через барботер с последующим измерением ОА радона в воздухе, например, угольно-сорбционным методом [Методика ... № 40090.6K818].

Уровень вмешательства, установленный санитарными правилами в РФ (п. 5.3.5 НРБ-99/2009 [СанПиН 2.6.1.2523-09], п. 4.3.5 [СанПиН 2.6.1.2800-10]), для радона в воде составляет 60 Бк/кг. В европейской практике (Приложение I к Директиве Совета ЕС № 2013/51/Euratom) в отношении содержания радона в воде подземных источников водоснабжения установлено «параметрическое значение» удельной активности радона в воде (термин «референтный уровень» в данной Директиве не используется) в диапазоне от 100 до 1000 Бк/л, при этом в случае превышения значения 1000 Бк/л защитные мероприятия считаются безусловно обоснованными [Кормановская, 2022].

2.1.3. Измерение плотности потока радона из грунта

Поток радона из грунта непосредственно влияет на объемную активность радона в воздухе подвальных помещений и первых этажей, а поток радона через поверхность строительных конструкций – на его поступление во все помещения. Также поток радона может являться маркером геологических процессов, так как сейсмическая активность может приводить к существенным вариациям выхода геогазов на поверхность, в состав которых входит радон, образующийся за счет распада ^{226}Ra под землей.

Известны три метода измерения плотности потока радона (ППР) с поверхности грунта [Маренный и др., 2016], основанные на оценке скорости выделения радона с площади грунта, ограниченной пробоотборным контейнером (камерой). Отличительные признаки принципов измерений ППР обусловлены применением разных способов пробоотбора (пассивного или активного), а также особенностью конструкции и состава пробоотборного контейнера (открытый или закрытый). Соответственно они получили названия:

- метод закрытого контейнера (пассивное накопление радона в замкнутом контейнере);

- метод активного контейнера (непрерывная прокачка воздуха через открытый контейнер);
- метод открытой камеры с углем (пассивное накопление радона в открытой камере с активированным углем);

Метод закрытого контейнера положен в основу международного стандарта ISO как метод измерения ППР, поэтому популярен за рубежом. В отечественной практике используется редко, так как имеет недостаток принципиального характера – оборудование для его реализации значительно влияет на объект исследования. По этой причине существенно ограничивается продолжительность измерения ППР (не более 1 часа), а также отсутствует надежная метрология метода, т.е. невозможно оценить неопределенность результатов измерений ППР.

Метод активного контейнера пока не получил широкого практического применения, т.к. сложен в реализации. В то же время тенденции совершенствования этого метода, позволят проводить измерения ППР в режиме монитора, что, вероятно, может привлечь повышенное внимание к рассматриваемому методу в дальнейшем [Маренный и др., 2016].

Метод открытой камеры основан на адсорбции активированным углем радона из воздуха, свободно проходящего через камеру из грунта, который реализуется следующим образом открытая (проходная) накопительной камеры «герметично» устанавливается в точке измерения на поверхность грунта [Методика ... № 40090.6К816]. Минимально-измеряемое значение ППР составляет 5–10 мБк/м²·с при длительности пробоотбора 4 часа. При такой продолжительности суммарная неопределенность измерения ППР составляет не более 30%.

Измерения ППР радона с поверхности грунта выполняются в соответствии с инструкциями по эксплуатации к используемым приборам. Расчеты и анализ результатов проводятся по [МУ 2.6.1.038–2015].

Анализ представленных выше методов измерений ППР с поверхности грунта показывает, что метод открытой камеры с углем имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами:

- реализован на основе стандартизованных средств измерений и простых дешевых пробоотборных камер; не требует присутствия оператора в контрольной точке в процессе пробоотбора.
- обладает высокой производительностью при минимальных затратах, что позволяет проводить одновременные измерения в большом количестве контрольных точек на участках с большой площадью;
- метрологически обоснован и позволяет получать представительные результаты с известной точностью;
- длительно применяется в условиях России в составе инженерных изысканий для строительства, хорошо знаком специалистам и отличается высокой надежностью.

В силу указанных преимуществ метод открытой камеры с углем на базе отечественного измерительного комплекса «КАМЕРА-01» используется российскими специалистами уже более 25 лет в качестве основного метода для оценки потенциальной радоноопасности участков строительства [ВМУ 1Р1-97; Методика ... № 40090.6К816; МУ 2.6.1.038–2015; Маренный и др., 2016].

2.1.4. Средства радоновых измерений

2.1.4.1. Классификация средств радоновых измерений

В настоящее время существует значительное количество средств радоновых измерений, отличающихся по назначению, методу отбора проб, типу детектора и т.д. Общая классификация вариантов способов и методов радоновых измерений представлена в табл. 2.1.1.

Таблица 2.1.1 – Классификация способов и методов измерения ОА и ЭРОА радона в воздухе

Измеряемый параметр	<ul style="list-style-type: none"> – Объемная активность газа радона, торона – Объемная активность дочерних продуктов распада радона, торона – Плотность потока радона
Детектируемое излучение	<ul style="list-style-type: none"> – Альфа-частицы – Бета-частицы – Гамма-кванты
Способ отбора проб анализируемого воздуха	<ul style="list-style-type: none"> – Пассивный – Активный
Виды пробоотбора	<ul style="list-style-type: none"> – Интегральные – Квазиинтегральные – Мгновенные


Типы детекторов	<ul style="list-style-type: none"> – Сцинтилляционные – Полупроводниковые – Ионизационный камеры – Трековые – Сорбенты
Методы регистрации	<ul style="list-style-type: none"> – Дозиметрические – Спектрометрические




Все разнообразие имеющихся средств радоновых измерений в воздухе отличается, по существу, комбинацией признаков, представленных в табл. 2.1.1. Измерения содержания радона в воде или плотности потока радона из грунта или с поверхности грунта и различных поверхностей сводится к измерению ОА радона в воздухе, отбираемом с помощью специального вспомогательного оборудования, конструктивные особенности и параметры которых определяются назначением измерений. Этим объясняется тенденция к созданию универсальных комплексов радоновых измерений.



2.1.4.2. Средства радоновых измерений, зарегистрированные в Государственном реестре средств измерений



Отечественные и зарубежные средства радоновых измерений, зарегистрированные в Государственном реестре средств измерений (ГРСИ) [ФГИС «АРШИН»] представлены в табл. 2.1.2. Здесь же приведены краткие сведения о каждом из них. Более детальные сведения содержатся в подразделе 2.1.4.3, прилагаемых к СИ комплектах методической и технической документации (МТД) и в описаниях типа средств измерений.


Таблица 2.1.2 – Сведения о средствах измерения ОА и ЭРОА изотопов радона, зарегистрированных в ГРСИ [ФГИС «АРШИН»]


Наименование СИ, номер в ГРСИ	Назначение	Принцип действия	Метрологические характеристики	Внешний вид
Интегральные измерения ОА радона				
Комплект аппаратуры для измерения средней объемной активности радона в воздухе трековым методом «ТРЕК-РЭИ-1М» (рег. № 59297-14)	Измерение: - средней ОА радона-222 в воздухе жилых домов и зданий различного назначения (время экспонирования 10–90 суток); - средней ОА радона-222 в почвенном воздухе (время экспонирования 2–10 суток).	При распаде радона и его короткоживущих дочерних продуктов (RaA и RaC') образуются альфа-частицы, которые, попадая на ТД, помещенный в пробоотборное устройство, приводят к образованию в его объеме треков, поверхностная плотность которых в чувствительном слое ТД пропорциональна произведению объемной активности радона на длительность экспонирования пробоотборного устройства в данных условиях.	- диапазон измерений средней ОА радона при экспозиции в течение 90 суток: от 20 до 2000 Бк/м ³ ; - пределы допускаемой относительной погрешности измерений средней ОА радона в диапазоне от 20 до 2000 Бк/м ³ : ± 40%; - чувствительность ТД в пробоотборной камере РЭИ-4: $(3,5 \pm 1,0) \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-2} \cdot \text{Бк}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$; - уровень собственного фона ТД: не более 15 см ⁻² .	 <p>Имеются модификации</p>


Наименование СИ, номер в ГРСИ	Назначение	Принцип действия	Метрологические характеристики	Внешний вид
Квазиинтегральные измерения ОА радона				
<p>Комплекс измерительный для мониторинга радона «КАМЕРА-01»</p> <p>(рег. № 26748-04)</p>	<p>Измерение:</p> <ul style="list-style-type: none"> - средней за 1-6 суток объемной активности радона-222 в воздухе помещений; - объемной активности радона-222 в пробах воздуха; - средней за 1-10 часов плотности потока радона-222 с поверхности земли и строительных конструкций; - объемной активности радона-222 и радия-226 в пробах воды. 	<p>Используется метод сорбции радона на активированном угле. Процедура измерения активности радона, сорбированного в активированном угле, не зависит от метода и типа отбора пробы на уголь и одинакова для всех МВИ: измерение активности радона в угле выполняется по гамма- или бета-излучению ДПП радона – ^{214}Pb и ^{214}Bi, находящихся в состоянии равновесия с радонам.</p> <p>Регенерация угля для очистки от сорбированных молекул воды и радона осуществляется с помощью специального устройства – регенератора активированного угля, входящего в состав Комплекса.</p>	<p>С блоком детектирования БДБ-13:</p> <ul style="list-style-type: none"> - средняя за 1–6 суток ОА радона в воздухе помещений (пассивный пробоотбор): $20\text{--}10^5$ Бк/м³; - ОА радона в пробах воздуха (активный пробоотбор): $30\text{--}2\cdot 10^5$ Бк/м³; - средняя за 1–10 часов ППР с поверхности земли и строительных конструкций: $3\text{--}10^5$ мБк/м²·с; - ОА радона и радия в пробах воды: $0,3\text{--}10^3$ Бк/л; - пределы допускаемой основной относительной погрешности измерений: $\pm 30\%$. 	 <p>Имеются модификации</p>
Непрерывные (интервальные) измерения ОА радона				
<p>Радиометры радона интегральные Radon Scout (РГА-1100) и Radon Scout PLUS (РГА-1100 Плюс)</p> <p>(рег. № 50383-12)</p>	<p>Измерение объемной активности радона (Rn-222) в воздухе (долговременный мониторинг).</p>	<p>Регистрация ДПП радона альфа-спектрометрическим методом в высоковольтной измерительной камере с полупроводниковым детектором при поступлении радона в камеру путем диффузии. Радиометры обладают высокой чувствительностью, поэтому любые изменения содержания радона точно регистрируются даже при низких ОА. Радиометры сконструированы таким образом, чтобы исключить влияние торона на результаты измерений. Радиометры оснащены датчиками температуры и влажности, а также датчиком перемещения, который распознает, менялось ли положение прибора во время измерений. Модификация PLUS (Плюс) также оснащена датчиком давления, имеет большую емкость встроенной памяти (до 16383 результатов измерений против 672), возможность питания</p>	<ul style="list-style-type: none"> - диапазон измерений ОА радона: $2\text{--}2\cdot 10^6$ Бк/м³; - пределы допускаемой относительной погрешности измерений: $\pm 30\%$; - измерительный интервал: 1 ч, 3 ч или заданный пользователем в интервале 1–255 мин. 	 <p>РГА-1100</p>  <p>РГА-1100 Плюс</p>

Наименование СИ, номер в ГРСИ	Назначение	Принцип действия	Метрологические характеристики	Внешний вид
		от сети (помимо встроенного аккумулятора) и дисплей для индикации результатов измерений.		
<p>Радиометры радона и торона RTM-1688/2200 (PPA-1688/2200)</p> <p>(рег. № 50382-12)</p>	<p>Измерение и непрерывный мониторинг ОА радона (^{222}Rn) и торона (^{220}Rn) в воздухе.</p>	<p>Регистрация ДПР радона и торона альфа-спектрометрическим методом в высоковольтной измерительной камере полупроводниковым детектором. Возможны два режима использования насоса: продолжительный и периодический. В продолжительном режиме насос работает в течение всего времени проведения измерений, тогда как в периодическом режиме насос включается на 5 минут в начале каждого интервала измерений. Конструкция радиометров исключает загрязнение измерительной камеры долгоживущими продуктами распада радона и торона. Радиометры оснащены датчиками температуры, влажности, давления и перемещения. Радиометры RTM-1688 и RTM-2200 (PPA-1688 и PPA-2200) отличаются размерами дисплея, а также возможностью подключения к PPA-2200 различных внешних вспомогательных датчиков. Питание осуществляется от сети или встроенного аккумулятора.</p>	<p>- диапазон измерений ОА: $3\text{--}2\cdot 10^6$ Бк/м³; - пределы допускаемой относительной погрешности измерений: $\pm 10\%$.</p>	 <p>PPA-1688</p> <p>PPA-2200</p>
<p>Радиометр объемной активности радона-222 AlphaGUARD PQ2000 / PQ2000PRO</p> <p>(рег. № 14157-09)</p>	<p>Непрерывные автоматические измерения ОА радона в воздухе с одновременной регистрацией условий измерения ОА – температуры, давления и относительной влажности контролируемого воздуха.</p>	<p>Ионизационная камера радиометра работает в режиме альфа-спектрометрии с отбором пробы контролируемого воздуха как за счет диффузии через специальный фильтр, так и с помощью принудительной прокачки. Два независимых измерительных тракта обеспечивают работу ионизационной камеры в импульсном режиме при низких значениях ОА радона и в токовом режиме при высоких значениях ОА радона. Радиометр оснащен датчиками температуры, влажности, давления и перемещения. При сопряжении с Радиометром эквивалентной равновесной объемной активности радона-222 аэрозольным AlphaPM возможно синхронное измерение ОА и ЭРОА радона с расчетом коэффициента радиоактивного равновесия. Питание осуществляется от сети или встроенного аккумулятора.</p>	<p>- диапазон измерений ОА радона: $3\text{--}2\cdot 10^6$ Бк/м³; - пределы допускаемой относительной погрешности измерений: $\pm 20\%$; - уровень собственного фона радиометра: не более 1 Бк/м³; - измерительный интервал: 10 или 60 мин в режиме диффузии, 1 или 10 мин в режиме принудительной прокачки.</p>	

Наименование СИ, номер в ГРСИ	Назначение	Принцип действия	Метрологические характеристики	Внешний вид
<p>Радиометр эквивалентной равновесной объемной активности радона-222 аэрозольный AlphaPM</p> <p>(рег. № 42003-09)</p>	<p>Непрерывные автоматические измерения ЭРОА радона в воздухе.</p>	<p>Измерение ЭРОА радона основано на отборе аэрозолей ДПР радона на специальный стекловолоконный фильтр и дальнейшей регистрации полупроводниковым детектором альфа-частиц при распаде ДПР (RaA, RaC). Расход воздуха может быть установлен равным 0,1; 0,5; 1,0; 1,5 или 2,0 л/мин. Питание осуществляется от сети или встроенного аккумулятора.</p>	<p>- диапазон измерений ЭРОА радона: $2-2 \cdot 10^6$ Бк/м³; - пределы допускаемой относительной погрешности измерений: $\pm 30\%$; - длительность измерения: 10 мин (при 60-минутном измерительном интервале AlphaGUARD накапливает результаты 10-минутных измерений, полученных от AlphaPM, и сохраняет среднее значение).</p>	
Мгновенные измерения ОА радона и ЭРОА радона и торона				
<p>Комплекс измерительный для мониторинга радона, торона и их дочерних продуктов «Альфарад плюс»</p> <p>(рег. № 49013-12)</p>	<p>Измерения: - ОА радона в воздухе; - ЭРОА радона и торона в воздухе; - ОА радона-222 в пробах воды и почвенного воздуха; - ППР с поверхности грунта.</p>	<p>Принцип действия блока измерения ЭРОА основан на осаждении дисперсной фазы радиоактивных аэрозолей на фильтр АФА-РСП-3 с последующим измерением количества ДПР радона и торона на фильтре по числу зарегистрированных детектором альфа-частиц. Принцип действия блока измерения ОА радона основан на электростатическом осаждении заряженных ионов ²¹⁸Po (RaA) из отобранной пробы воздуха на поверхность полупроводникового детектора, расположенного в измерительной камере. ОА определяется по количеству зарегистрированных альфа-частиц при распаде RaA, осевших на детектор. Наличие специальных пробоотборных устройств и автономной воздуходувки позволяет проводить отбор проб и измерять содержание радона-222 в воде, почвенном воздухе, определять ППР с поверхности грунта. Радиометры оснащены датчиками температуры, влажности и давления.</p>	<p>- диапазон измерения ЭРОА радона: $1-10^6$ Бк/м³; - диапазон измерения ЭРОА торона: $0,5-10^4$ Бк/м³; - диапазон измерения ОА радона-222 в воздухе: $1-2 \cdot 10^6$ Бк/м³; - уровень собственного фона блока измерения ОА: не более 0,3 Бк/м³; - диапазон измерения ОА радона-222 в пробах воды: 6–800 Бк/л; - диапазон измерения ППР с поверхности грунта: $20-10^3$ мБк/м²·с; - диапазон измерения ОА радона-222 с предварительным отбором проб воздуха в пробоотборники: $20-10^7$ Бк/м³; - диапазон измерения ОА радона-222 в пробах почвенного воздуха: 10^3-10^6 Бк/м³; - пределы допускаемой</p>	 <p>Имеется 3 модификации и 5 вариантов комплекта поставки</p>

Наименование СИ, номер в ГРСИ	Назначение	Принцип действия	Метрологические характеристики				Внешний вид	
			относительной погрешности измерений: $\pm 30\%$ ($\pm 20\%$ для ОА радона-222 в воздухе).					
<p>Ранее выпускавшиеся РРА-01М-01, РРА-01М-03 и РАА-10 сняты с производства с 01.11.2012 г. В качестве замены выпускается Комплекс измерительный для мониторинга радона, торона и их дочерних продуктов «Альфарад плюс» различных модификаций и комплектаций.</p>	Таблица соответствия							
	Модификация «Альфарад плюс»	ОА	ЭРОА	ППР, вода, воздух	Климат	Автоматизированная работа	ПО	Аналоги (предыдущие модели радиометров)
	Альфарад плюс АРП	+	+	+	+	+	+	нет
	Альфарад плюс АР	+	+		+	+	+	нет
	Альфарад плюс РП	+		+	+	+	+	РРА-01М-01 или РРА-01М-03 в комплекте с ПОУ-04
	Альфарад плюс Р	+			+	+	+	РРА-01М-01 или РРА-01М-03
Альфарад плюс А		+		+	+	+	РАА-10	
<p>Радиометр радона и его дочерних продуктов распада «РАМОН-02» (рег. № 35111-20)</p>	<p>Измерения: - ЭРОА радона и торона в воздухе помещений, а также в атмосферном воздухе; - величины «скрытой» энергии ДПР радона и торона; - ОА радона в воздухе помещений, почвенном воздухе, в воде, ППР (модификация «РАМОН-02Р»).</p>	<p>Осаждение дисперсной фазы аэрозолей ДПР из воздуха на фильтры (АФА-РСП-10 или АФА-РСП-20) с последующим спектрометрическим измерением альфа-, бета-активности аэрозольной пробы. ОА короткоживущих ДПР рассчитываются по формулам, учитывающим накопление и распад ДПР, как на стадии отбора проб, так и при измерении активности пробы. Определение ОА радона производится методом электростатического осаждения ДПР радона на фильтр в накопительной камере и последующего измерения активности альфа-излучения с поверхности фильтра альфа-детектором.</p>	<p>- диапазон измерения ЭРОА радона: $1-2 \cdot 10^6$ Бк/м³; - диапазон измерения ЭРОА торона: $0,5-10^6$ Бк/м³; - диапазон измерения ОА радона в воздухе помещений: $1-3 \cdot 10^6$ Бк/м³; - диапазон измерения ОА радона в почвенном воздухе: $10^3-1,5 \cdot 10^7$ Бк/м³; - диапазон измерения ОА радона в воде: $1-1,5 \cdot 10^4$ Бк/л; - диапазон измерения ППР: $10-5 \cdot 10^5$ мБк/(м²·с); - пределы допускаемой основной</p>					

Наименование СИ, номер в ГРСИ	Назначение	Принцип действия	Метрологические характеристики	Внешний вид
<p>Альфа-радиометр РАА-20П2 «Поиск» (рег. 22176-01)</p>	<p>Измерения ЭРОА радона и торона в воздухе. Оценка ОА радона в воздухе, фактора равновесия, кратности воздухообмена в помещениях, мощности амбиентного эквивалента дозы внешнего гамма-излучения.</p>	<p>Измерение ЭРОА радона и торона проводится аспирационным способом путем осаждения ДПР радона и торона из воздуха на тонковолокнистом фильтре АФА-РСП-3 с одновременным или последующим измерением его альфа-активности в режимах «Поиск» и «Суммарный альфа-счет», соответственно. В режиме «Поиск» путем отбора пробы воздуха на фильтр с одновременной селективной регистрацией альфа-излучения ^{218}Po (RaA) и ^{214}Po (RaC') производится измерение ЭРОА радона, а также оценка значения фактора равновесия, ОА радона и кратности воздухообмена в помещении с одновременной оценкой необходимой продолжительности отбора для достижения требуемой точности измерения. Продолжение измерения активности фильтра после окончания отбора пробы в режиме «Суммарный альфа-счет» позволяет уточнить значения ЭРОА радона, а также провести измерение ЭРОА торона по альфа-излучению ^{212}Bi и ^{212}Po. Измерение ЭРОА торона выполняется не ранее, чем через 5 часов после окончания пробоотбора в состоянии радиоактивного равновесия дочерних продуктов распада торона ^{212}Pb и ^{212}Bi на фильтре. Возможен также непрерывный автоматический мониторинг ОА радона и ЭРОА радона в воздухе, а также кратности воздухообмена и фактора равновесия в воздухе помещений с периодом регистрации результатов измерений 1, 2 или 3 часа.</p>	<p>относительной погрешности измерения: $\pm 30\%$ ($\pm 20\%$ для ОА радона в воздухе). - диапазон измерений ЭРОА радона и торона в воздухе: $1-10^5$ Бк/м³; - продолжительность экспрессной оценки ЭРОА радона на уровне 100 Бк/м³: не более 8 мин; - пределы допускаемой относительной погрешности измерения: $\pm 30\%$.</p>	<p>Имеется 9 модификаций</p> 

Наименование СИ, номер в ГРСИ	Назначение	Принцип действия	Метрологические характеристики	Внешний вид
<p>Альфа-радиометр радона аэрозольный РАА-3-01 «АльфаАЭРО» (рег. 37973-08)</p>	<p>Измерение ЭРОА радона и торона в воздухе жилых, рабочих помещений и на открытом воздухе.</p>	<p>Принцип действия основан на измерении спектрометрическим методом с помощью полупроводникового детектора активности осажденных на аналитическом аэрозольном фильтре АФА-РСП-3 альфа-излучающих короткоживущих ДПР радона и торона при прокачке через фильтр воздуха с заданной постоянной скоростью. Расчет ЭРОА радона и торона в воздухе, а также оценка ОА радона выполняется непрерывно в течение пробоотбора. Расчет среднегодовой ЭРОА изотопов радона с учетом температурного влияния, коэффициента равновесия и кратности воздухообмена в помещении производится после окончания пробоотбора. Измерение могут выполняться в экспрессном (кратковременном) режиме или в режиме монитора (до 14 суток с периодом регистрации 1, 2 или 3 часа). Радиометр оснащен датчиком температуры.</p>	<p>- диапазон измерений ЭРОА: $1-10^6$ Бк/м³; - пределы допускаемой относительной погрешности измерений: $\pm 30\%$.</p>	 <p>The image shows a portable radon detector, model RAA-3-01. It is a rectangular, orange-colored device with a white top panel featuring a small LCD screen and several control buttons. A circular air inlet is visible on the front. The device is shown with its carrying strap and a circular component, possibly a filter or a cap, placed next to it.</p>

2.1.4.3. Особенности типов аппаратуры для радоновых измерений

Ниже рассмотрены общие характерные черты и некоторые особенности типов средств радоновых измерений, зарегистрированных в ГРСИ (см. табл. 2.1.2). При этом в качестве основных признаков приняты:

- предназначение СИ для измерений содержания радона в воздухе, воде или плотности потока радона из грунта или с различных поверхностей;
- продолжительность пробоотбора для измерения содержания радона в воздухе.

Мгновенные (экспрессные) измерения

Реализация мгновенных методов измерения ЭРОА изотопов радона включает в качестве обязательных следующие операции:

1) отбор проб воздуха на аэрозольные фильтры;

2) регистрация альфа- и/или бета-активности фильтров в течение одного или нескольких промежутков времени (метод Кузнецца, метод Маркова, Томаса и т.д. [Крисюк, 1989; Павлов и др., 1994]). При этом во всех из них реализован принцип суммарной регистрации альфа-излучения ДПР с временной дискриминацией активности различных ДПР, основанный на различиях их периодов полураспада. Известен также ряд спектрометрических методов, в которых для дискриминации ДПР используются различия в энергии их альфа-излучения.

Применяемые в настоящее время типы средств измерений ЭРОА изотопов радона в воздухе, реализующие мгновенные методы, позволяют определять ЭРОА радона в воздухе в диапазоне от 1–10 до 10^5 – 10^6 Бк/м³, а ЭРОА торона в диапазоне от 0,5–1,0 до 10^4 – 10^6 Бк/м³ [ФГИС «АРШИН»]. Столь широкий диапазон измерений обеспечивается за счет изменения объема прокачки анализируемого воздуха: увеличением объема отбираемой пробы воздуха достигается расширение диапазона измерений в сторону более низких значений ЭРОА изотопов радона, а уменьшением объема пробы

воздуха – в сторону бóльших значений, чем при стандартных условиях измерений. Относительная погрешность измерений ЭРОА изотопов радона в воздухе с применением современных средств экспрессных измерений составляет около 30%, что вполне достаточно для выполнения измерений в соответствии с их назначением.

Мгновенные (экспрессные) измерения представлены наибольшим разнообразием типов используемых детекторов и регистрируемых ими излучений. В последние годы в России для массовых мониторинговых измерений мгновенным методом наибольшей популярностью в аккредитованных лабораториях пользуются альфа-радиометры аэрозоль:

- Комплекс измерительный для мониторинга радона, торона и их дочерних продуктов «Альфарад плюс» (модификации А и АР);
- Альфа-радиометр РАА-20П2 «Поиск»;
- Альфа-радиометр радона аэрозольный РАА-3-01 «АльфаАЭРО»;
- Радиометр радиоактивных аэрозолей «РАМОН-02».

Внешний вид приборов показан на рис. 2.1.1–2.1.5.



а)



б)

Рисунок 2.1.1 – Комплекс измерительный для мониторинга радона, торона и их дочерних продуктов «Альфарад плюс»: а) модификация А; б) модификация АР

[Фото с сайта ООО «НТМ-Защита», <https://ntm.ru>]

Принцип действия блока измерения ЭРОА Комплекса измерительного для мониторинга радона, торона и их дочерних продуктов «Альфарад плюс» (в модификациях А, АР) основан на осаждении дисперсной фазы радиоактивных аэрозолей ДПР радона и торона на аналитический фильтр типа АФА-РСР-3 при прокачке воздуха с последующим измерением ОА ДПР радона и торона на фильтре по числу зарегистрированных детектором альфа-частиц. Принцип действия блока измерения ОА радона (в модификация Р и АР) основан на электростатическом осаждении заряженных ионов ^{218}Po (RaA) из отобранной пробы воздуха на поверхность полупроводникового детектора, расположенного в измерительной камере. ОА определяется по количеству зарегистрированных альфа-частиц при распаде RaA, осевших на детектор.

Основное назначение прибора – экспрессные измерения ОА радона и ЭРОА радона и торона в воздухе с одновременной регистрацией условий измерения (температуры, давления и относительной влажности контролируемого воздуха). Для расширения перечня возможных измерений (измерения УА радона в воде, ОА радона в грунтовой атмосфере, ППР с поверхности грунта) прибор может поставляться в комплектации с различным вспомогательным оборудованием. На рис. 2.1.2 показано семейство модификаций комплекса (А, Р, АР).



Рисунок 2.1.2 – Комплекс измерительный для мониторинга радона, торона и их дочерних продуктов «Альфарад плюс» (семейство модификаций)

[Фото с сайта ООО НПП «Доза», [https:// doza.ru](https://doza.ru)]



Рисунок 2.1.3 – Альфа-радиометр РАА-20П2 «Поиск» (исходная и модернизированная версии) [Фото с сайта НТЦ «Нитон», <https://niton.su>]



Рисунок 2.1.4 – Альфа-радиометр радона аэрозольный РАА-3-01 «АльфаАЭРО» [Фото с сайта ООО «НТЦ Амплитуда», <https://amplituda.ru>]



Рисунок 2.1.5 – Радиометр радиоактивных аэрозолей «РАМОН-02» с площадью ППД 10 см² (в пластиковом корпусе) [Фото с сайта ТОО «СОЛО ЛЛП (SOLO LLP)», <https://solo.kz>]

Принцип действия радиометров РАА-20П2 «Поиск», РАА-3-01 «АльфаАЭРО» и «РАМОН-02» основан на принудительном осаждении ДПР радона и торона из воздуха на аналитическом фильтре типа АФА-РСП при прокачке воздуха с одновременным спектрометрическим измерением его альфа-активности для оценки ОА и ЭРОА радона в воздухе, а также значения коэффициента равновесия радона и его ДПР.

Описание приборов и методики проведения измерений приведены в комплектах прилагаемой к ним технической и эксплуатационной документации, обработка и интерпретация результатов измерений осуществляется согласно соответствующим методическим документам [МУ 2.6.1.2838-11; МУ 2.6.1.037–2015; МУ 2.6.5.062–2017].

Квазиинтегральные измерения

Наиболее распространенный метод проведения квазиинтегральных измерений ОА радона в воздухе основан на использовании устройств, содержащих активированный уголь, обладающий способностью сорбировать на поверхности пор радон из воздуха. Это упрощает процедуру отбора проб воздуха для измерений, т.к. достаточно в контрольной точке сосуд с активированным углем, и за счет диффузии в нем начнет собираться радон. Интенсивность этого процесса зависит от марки угля, формы сосуда и влажности воздуха [Яковлева, 2010].

Сорбированный углем радон распадается с периодом полураспада 3,8 суток. То есть, представительность отобранной таким образом пробы не превышает недели (двух периодов полураспада). Дальнейшее увеличение времени экспонирования угля (более недели) с целью получения среднего за более длительный интервал времени не имеет смысла: радон, отобранный в начале периода экспонирования, распадется.

В России квазиинтегральный метод реализован в Комплексе измерительном для мониторинга радона «КАМЕРА-01» [НТИЦ «Нитон»], выпускаемого в нескольких вариантах комплектации.

Основной вариант включает в себя сорбционные колонки с активированным углем для измерения ОА радона в воздухе (рис. 2.1.6) и радиометрическую установку для измерения накопленной углем активности (рис. 2.1.7). Также, в зависимости от варианта, в комплект могут входить различные устройства для пробоотбора и барботаж (рис. 2.1.8). Кроме того, существуют варианты, которые поставляются НПП «Доза» для спектрометров «Прогресс» и НТЦ «Амплитуда» для спектрометров «МУЛЬТИРАД», в состав которых входят колонки, накопительные камеры, уголь, различные пробоотборники (рис. 2.1.9).

Квазиинтегральные измерения ОА радона в воздухе помещений в контрольной точке выполняются в соответствии с инструкциями по эксплуатации к используемым приборам. Расчеты и анализ результатов измерений в помещениях проводятся по методике в комплекте [Методика ... № 40090.6К817]. Предел допускаемой основной относительной погрешности измерений ОА радона данным методом в диапазоне значений ОА радона от 20 до 10^5 Бк/м³ составляет 30%.



Рисунок 2.1.6 – Сорбционные колонки СК-13 с активированным углем
[Фото с сайта НТЦ «Нитон», <https://niton.su>]



Рисунок 2.1.7 – Радиометрическая установка для измерений активности ДПР радона в активированном угле по бета-излучению (коммутатор МК-4 и четыре блока детектирования БДБ-13) [Фото с сайта НТЦ «Нитон», <https://niton.su>]



a)



б)

Рисунок 2.1.8 – Вспомогательное оборудование комплекса «КАМЕРА-01»: *a)* воздухоотборное устройство для мгновенного измерения ОА радона в ВОЗДУХЕ [Фото с сайта НТЦ «Нитон», <https://niton.su>];
б) накопительная камера для измерения ППР



Рисунок 2.1.9 – Комплект оборудования для определения содержания радона [НПП «Доза»] или Комплект оборудования для мониторинга радона [НТЦ «Амплитуда»]

Помимо измерений средней за 1–6 суток ОА радона в воздухе помещений квазиинтегральным методом с помощью комплекса

«КАМЕРА-01» реализована в виде соответствующих методик выполнения измерений и вспомогательного оборудования возможность проведения дополнительных видов измерений, также основанных на сорбции радона активированным углем [Методика ... № 40090.6K816; Методика ... № 40090.6K818; Методика ... № 40090.6K815]:

- измерение средней за 1–10 ч плотности потока радона (ППР) с поверхности земли и строительных конструкций;
- измерение ОА радона и ^{226}Ra в пробах воды;
- измерение (мгновенной) ОА радона в помещении продолжительность отбора пробы воздуха – от 1 до 60 мин.

Описание приборов, входящих в состав вариантов комплексов «КАМЕРА-01» и методики проведения измерений приведены комплектах прилагаемой к ним технической и эксплуатационной документации, обработка и интерпретация результатов измерений осуществляется согласно соответствующим методическим документам [МУ 2.6.1.2398-08; МУ 2.6.1.038–2015; МУ 2.6.1.2838-11; МУ 2.6.1.037–2015; МУ 2.6.5.062–2017].

Основное достоинство аппаратуры на основе угольно-адсорбционного метода заключается в том, что в ней сочетаются возможности проведения квазиинтегральных (при пассивном пробоотборе воздуха в течение 2–6 суток) и мгновенных измерений (при принудительном пробоотборе). Это позволяет успешно использовать такие камеры приемки в эксплуатацию вновь построенных зданий, а также, для получения оценочного среднегодового значения ЭРОА радона при обследовании помещений в существующих (эксплуатируемых) зданиях. Правда, на практике это трудно реализуемо, т.к. требуется многократное экспонирование пробоотборного устройства (пассивного или активного в одном и том же помещении [МУ 2.6.1.037–2015].

Данный метод на основе адсорбции радона в активирован угле используется и в ряде других стран для проведения массовых оценочных или предварительных измерений ОА радона в зданиях [Маренный и др., 2016].

Для этого применяется пробоотборное оборудование, принципиально не отличающееся от показанного выше.

Интегральные измерения

Наибольшее распространение для проведения широкомасштабных обследований содержания радона в жилых и производственных помещениях получили пассивные пробоотборные камеры (экспозиметры) с диэлектрическими трековыми детекторами (ТД) [Маренный, 2012; Николаев, 2012].

Начиная с 1990 г. и до настоящего времени несколько организаций в России и за рубежом разрабатывали и выпускали свои модели трековых камер для измерения ОА радона с пассивным пробоотбором, функционирующие по способу отбора радона, рассмотренному выше. В них использовались ТД на основе нитроцеллюлозной пленки LR-115 Type II (Франция) и К-6 (Переяславский филиал ГосНИИхимфотопроект, Россия)¹.

Основные типы камер, выпускаемые в разные годы в России, показаны на рис. 2.1.10. В настоящее время в измерительных лабораториях применяется, преимущественно, одна модель пробоотборной камеры – РЭИ-4.

¹ По известным причинам выпуск НЦ-пленок К-6 был прекращен в конце 90-х гг. прошлого века. Выпуск НЦ пленок LR-115 Type II по неизвестным нам причинам был прекращен в 2021 г. В России в 2021 г. был разработан аналог НЦ пленок LR-115 Type II с возможностью варьирования регистрационных характеристик [Патент на изобретение № 2769336], однако до настоящего времени не налажен ее выпуск.



Рисунок 2.1.10 – Основные типы трековых пробоотборных камер, использовавшиеся в России. Разработаны: 1 – Санкт-Петербургским научно-исследовательским институтом радиационной гигиены им. П.В. Рамзаева; 2 – Радиевым институтом им. В.Г. Хлопина, Санкт-Петербург; 3 и 4 – АОЗТ «Радиационные и экологические исследования», Москва (в настоящее время – ООО «ГК РЭИ»)

За рубежом все лаборатории, занимающиеся радоновыми измерениями, используют пробоотборные камеры, выпускаемые на протяжении многих лет рядом компаний в нескольких странах (рис. 2.1.11). Ранее в качестве детектора применялись нитроцеллюлозные пленки LR-115 Туре II, но в последние годы основной тип детекторов – полиаллилдиггиколькарбонат CR-39, производимый рядом фирм в нескольких странах (см., например, [TASL]).



Radonova – Radtrak² (Швеция)



Radosys – RADUET (Венгрия)



Radonova – Rapidos (Швеция)



Radosys – RSKS (Венгрия)



Radonova – Radtrak³ (Швеция)



TASL – RADOSURE (Великобритания)



AccuStar – AT-100 (Канада)



RSSI – AT-102 (США)

Рисунок 2.1.11 – Варианты пробоотборных камер, выпускаемых и используемых в зарубежных странах [Фото с сайтов производителей]

Для реализации трекового метода требуются, помимо пробоотборных камер, также устройства для травления и обсчета детекторов. В России в ГРСИ в настоящее время зарегистрирован и допущен к применению в Российской Федерации только один тип рассматриваемого вида аппаратуры – Комплект аппаратуры для измерения средней объемной активности радона

в воздухе трековым методом ТРЕК-РЭИ-1М, выпускаемый в нескольких вариантах комплектации. Комплект предназначен для измерения средних за период экспонирования значений ОА радона в воздухе жилых домов и зданий социально-бытового, медицинского и производственного назначения [ГК РЭИ].

В состав комплекта (рис. 2.1.12) входит вспомогательное оборудование, необходимое для обработки экспонированных ТД: термостат для химической обработки (травления) детекторов, приборы и приспособления для приготовления травящего раствора, искровой автоматический счетчик треков, набор контрольных детекторов, программный продукт «База данных «Радон» для хранения и обработки результатов измерений, набор расходных материалов. Возможны несколько вариантов поставки Комплекта, отличающиеся количеством пробоотборных камер, расходных материалов и экземпляров вспомогательного оборудования, устройство которого, его технические характеристики и порядок проведения обработки ТД представлены в МТД, прилагаемом к комплекту.

Входящая в комплект пробоотборная камера РЭИ-4 конструктивно состоит из цилиндрического корпуса, одно основание которого скруглено, а второе закрывается навинчивающейся крышкой (см. рис. 2.1.13 и 2.1.14). Внутри корпуса крепится держатель, на котором фиксируются пальцы с ТД. Для улучшения газообмена между объемами, на которые камера делится держателем, в нем имеются специальные отверстия. Резьбовой лабиринт между корпусом и крышкой, выполняет следующие функции: а) не пропускает в камеру аэрозольный компонент, благодаря чему ДПР регистрируются только от того радона, который попал в камеру; б) отсекает торон; в) препятствует конденсации влаги на внутренних поверхностях камеры; г) обеспечивает стабильную атмосферу внутри камеры.



Рисунок 2.1.12 – Комплект аппаратуры для измерения средней объемной активности радона в воздухе трековым методом ТРЕК-РЭИ-1М [ГК РЭИ]



Рисунок 2.1.13 – Пробоотборная камера РЭИ-4 (в разобранном виде) [ГК РЭИ]

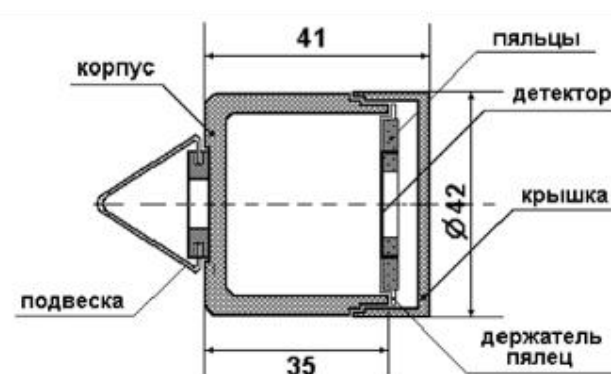


Рисунок 2.1.14 – Схематическое изображение пробоотборной камеры РЭИ-4 [Методика ... № 40090.2ИЗ85]

Образовавшиеся в камере ДПР частично осаждаются на стенках камеры, диаметр которой подобран таким образом, чтобы обеспечить эффективную регистрацию альфа- частиц от ДПР в трековом детекторе.

Интегральные измерения ОА радона в воздухе помещений в контрольной точке выполняются в соответствии с [МВИ 2.6.1.003-99; Методика ... № 40090.2ИЗ85] и инструкциями по эксплуатации к

используемым приборам. Расчеты и анализ результатов измерений в помещениях проводятся согласно [МУ 2.6.1.2838-11; МУ 2.6.1.037–2015].

Пробоотборная камера РЭИ-4 при обработке детекторов с помощью комплекта ТРЕК-РЭИ-1М имеет следующие основные регистрационные характеристики:

- диапазон измеряемых значений эквивалентной равновесной экспозиции в воздухе помещений: 200–60000 Бк·сут/м³;
- диапазон измеряемых значений объемной активности радона при экспозиции в течение 90 суток: 20–2000 Бк/м³;
- пределы основной относительной погрешности измерения средних значений ОА радона, не более:
 - в поддиапазоне от 20 до 50 Бк/м³: ±50%;
 - в поддиапазоне от 50 до 2000 Бк/м³: ±30%;
- чувствительности ПК, трек·см⁻²·Бк⁻¹·м³·сутки⁻¹: $(2,8 \pm 1,0) \cdot 10^{-2}$,
- линейный диапазон поверхностной плотности треков, трек/см²: 10–4500;
- уровень собственного фона ТД не превышает, трек/см²: 15.

Комплект ТРЕК-РЭИ-1М позволяет проводить интегральные измерения за большой интервал времени (до 90 суток, согласно приложению к свидетельству об утверждении типа СИ, но по факту, с учетом невыраженного эффекта фединга, до года). Пробоотборные камеры просты, дешевы, не требуют энергопитания и обслуживания, их показания документальны. Количество одновременно обследуемых помещений зависит только от количества имеющихся в распоряжении измерительной лаборатории камер.

Нормативно-методические документы не ограничивают методы измерений, которые могут быть использованы для получения среднегодовых значений ЭРОА радона в помещениях, на основании которых может быть принято решение о превышении установленных санитарными нормами допустимых уровней. Однако на практике только использование

интегральных пробоотборных камер позволяет существенно уменьшить неопределенности результатов измерений, обусловленные временными вариациями ОА радона [МУ 2.6.1.037–2015].

Использование электретного метода для интегральных измерений ОА радона стало возможным благодаря созданию электретов с большой плотностью заряда и высокой устойчивостью во времени [Rad Elec Inc.]. Электреты представляют собой поляризованные пластиковые диэлектрики (например, из политетрафторэтилена), создающие относительно стабильное электрическое поле, достаточное для сбора ионов ДПР радона из окружающего воздуха. Принцип электретной камеры основан на определении снижения за время экспозиции (от нескольких дней до нескольких месяцев) поверхностного электростатического заряда специальной тефлоновой пластины, экспонируемой в пассивной пробоотборной камере. Перед экспонированием определяется начальный заряд пластины, которая затем помещается в камеру, куда радон попадает в результате диффузии. Радон и образовавшиеся ДПР в результате альфа-распада ионизируют воздух внутри камеры. Возникающие электрические заряды рекомбинируют с зарядами на поверхности пластины, уменьшая ее электростатический потенциал. После экспонирования определяют конечный заряд пластины. Таким образом, величина снижения заряда пластины пропорциональна ОА радона в камере. Главный недостаток электретов – зависимость результатов измерений от мощности внешнего гамма-излучения и метеопараметров (температура, влажность). Электретные камеры (см. рис. 2.1.15) ранее были популярны за рубежом для обследования небольшого количества помещений, однако к настоящему времени, они практически вытеснены трековыми детекторами и угольными адсорберами².

² Отечественные электретные камеры не приобрели достаточной популярности из-за низкого качества применяемых в электретах материалов и, соответственно, низкой надежности получаемых результатов.



Рисунок 2.1.15 – Электретный комплект «E-PERM» [Rad Elec Inc.]

Применение разных типов детекторов и конструкций пробоотборных камер пассивных средств измерений в практике радонового мониторинга определяет необходимость оценки достоверности получаемых результатов. Эта задача решается в рамках сличительных испытаний. В 2019 г. в Италии были проведены международные сличительные испытания пассивных средств измерения радона в воздухе помещений, в которых приняли участие 49 лабораторий из 15 стран мира (Италии, Венгрии, Франции, Великобритании, Литвы, России, Швеции и др.) Тестируемые средства измерения включали пробоотборные камеры с трековыми (CR-39 и LR-115 Туре II) и электретные (E-PERM) детекторы [Киселев, и др., 2020].

Испытания проводились в реальных условиях эксплуатируемых помещений с различными климатическими характеристиками. Их основной целью являлась оценка качества результатов определения объемной активности радона испытуемыми средствами измерений в условиях, максимально приближенных к реальным.

Показано, что трековые детекторы характеризуются в целом лучшими показателями качества измерений по сравнению с электретными. В условиях длительного экспонирования трековые детекторы позволяют получать

надежные результаты измерения объемной активности радона в воздухе помещений без существенной потери чувствительности.

По результатам сличительных испытаний, на которых были представлены практически все типы трековых экспозиметров радона, используемые в большинстве европейских и американских лабораторий, показано, что экспозиметр типа РЭИ-4 относится к группе экспозиметров с наилучшими метрологическими характеристиками. В пользу этого свидетельствует то, что по всем показателям, использованным в МСИ для оценки качества измерений, отличие измеренных экспозиметрами РЭИ-4 значений ОА радона от референсных значений составляет не более 2–6%.

Интервальные (непрерывные) измерения

Средства измерений для проведения интервальных измерений ОА/ЭРОА радона и торона длительностью до нескольких часов представлены в ГПСИ серией приборов фирм SARAD GmbH (Германия) и Genitron Instruments/SAPHYMO GmbH (Германия):

- Радиометр радона интегральный Radon Scout (РГА-1100);
- Радиометр радона интегральный Radon Scout PLUS (РГА-1100 Плюс);
- Радиометр радона и торона RTM-1688 (РРА-1688);
- Радиометр радона и торона RTM-2200 (РРА-2200);
- Радиометр объемной активности радона-222 AlphaGUARD PQ2000/PQ2000PRO;
- Радиометр ЭРОА радона-222 AlphaPM (приставка к AlphaGUARD PQ2000/PQ2000PRO).

Внешний вид радиометров показан на рис. 2.1.16–2.1.18.



a)



б)

Рисунок 2.1.16 – Радиометры радона интегральные производства SARAD GmbH, Германия: *a)* Radon Scout (PGA-1100); *б)* Radon Scout PLUS (PGA-1100 Плюс) [Фото из брошюры производителя]



a)



б)

Рисунок 2.1.17 – Радиометры радона и торона производства SARAD GmbH, Германия: *a)* RTM-1688 (PPA-1688); *б)* RTM-2200 (PPA-2200)

[Фото из брошюр производителя]

Метод измерений первых двух приборов основан на альфа-спектрометрической регистрации полупроводниковым детектором ДПР, образовавшихся в результате распада радона, поступившего вместе с воздухом путем диффузии через фильтр во внутренний объем высоковольтной измерительной камеры. В приборе Radon Scout имеется возможность выбора измерительного интервала 1 или 3 часа, в приборе Radon Scout PLUS – от 1 до 255 минут.



Рисунок 2.1.18 – Радиометры производства Genitron Instruments/SAPHYMO GmbH, Германия (в настоящее время Bertin Instruments): а) Радиометр объемной активности радона-222 AlphaGUARD PQ2000/PQ2000PRO; б) Радиометр ЭРОА радона-222 AlphaPM [Фото из брошюр производителя]

Описание приборов и методики проведения измерений приведены в комплектах прилагаемой к ним технической и эксплуатационной документации, обработка и интерпретация результатов измерений осуществляется согласно соответствующим методическим документам [МУ 2.6.1.2838-11; МУ 2.6.1.037–2015; МУ 2.6.5.062–2017].

В практике измерений ОА радона в воздухе мониторы радона (или радон-мониторы) применяются, в основном, для исследовательских целей. По характеру получаемой информации радон-мониторы могут быть отнесены одновременно к средствам измерений мгновенного, квазиинтегрального и интегрального типов [Киселев и др., 2016].

Мониторинг ОА радона в воздухе с применением радон-мониторов заключается в постоянном измерении ОА радона в течение определенного промежутка времени (выбирается оператором), результаты которого выстраиваются в последовательный временной ряд. Тем самым обеспечивается возможность получения результатов измерений ОА радона за определенный, достаточно короткий промежуток времени (обычно от нескольких минут до 1 часа) в конкретный момент времени (экспрессные

измерения). Усредняя результаты измерений за определенный период времени (от нескольких часов до нескольких суток), можно получить квазиинтегральное значение ОА радона в воздухе за этот период. А если усреднять результаты измерений за длительный период (месяцы и даже годы), то можно получить интегральное значение ОА радона в воздухе. Естественно, что радон-монитор позволяет проследить любые изменения ОА радона в воздухе в течение всего времени мониторинга контролируемой атмосферы. Так что эти квазиинтегральные и интегральные результаты измерений имеют принципиально другой характер, чем результаты измерений, полученные традиционными квазиинтегральными и интегральными методами, поскольку они позволяют проследить еще и временные изменения ОА радона в воздухе помещений.

В современных радон-мониторах для измерений ОА радона используется ионизационный метод регистрации или метод альфа-спектрометрии с использованием полупроводниковых детекторов. Радон-мониторы могут быть основаны на пассивном и/или активном методах отбора проб воздуха. В случае мониторов с пассивным отбором проб воздуха измерительная камера имеет окно, в котором устанавливается мембрана, через которую радон диффундирует из воздуха в измерительную камеру, но ДПР радона, содержащиеся в этом воздухе, не попадают во внутренний объем камеры. Такие мониторы обычно позволяют получать результаты измерений ОА радона в воздухе с некоторым запозданием, которое определяется диффузионными свойствами мембраны и подвижностью воздуха в помещении. В мониторах с активным методом отбора проб воздуха он прокачивается (непрерывно или определенное время в каждом цикле измерений) через измерительную камеру.

Таким образом, рабочим телом камеры является воздух, ионизация которого альфа-частицами радона и образующегося при его распаде полония (^{218}Po и ^{214}Po), регистрируется в импульсном, а при больших активностях, в токовом режиме.

Диапазон измерений ОА радона в воздухе с использованием радон-мониторов составляет от нескольких единиц Бк/м³ до 1–2 МБк/м³. Как и в трековой радиометрии радона, нижняя граница диапазона измерений ОА радона в воздухе радон-мониторов определяется их уровнем собственного фона и продолжительностью измерений. Верхняя граница диапазона измерений ОА радона мониторами является метрологической характеристикой, которая обычно определяется при испытаниях. Чаще всего диапазон измерений делится на два-три поддиапазона, в пределах которых могут даже использоваться различные методы регистрации. Так, при низких значениях ОА радона в воздухе измерительной камеры для определения ОА радона обычно регистрируется распад самого радона и всех его короткоживущих альфа-излучающих дочерних продуктов. Наоборот, когда ОА радона достаточно высока, ведется селективная регистрация только альфа-излучения радона. Поэтому отклик радон-мониторов на высокие уровни ОА радона в воздухе, составляющие 1000 Бк/м³ и выше, редко превышает 1 час, тогда как на уровне около 100 Бк/м³ и ниже корректное измерение ОА радона в воздухе может потребовать многих часов.

Относительная погрешность измерений ОА радона в воздухе радон-мониторов обычно составляет не менее 20–30%, для отдельных типов таких мониторов с исключительно стабильными метрологическими характеристиками погрешность измерений может составлять около 10%.

На рис. 2.1.18 показан прибор с ионизационной камерой, применяемый для решения многих измерительных задач – радиометр объемной активности радона-222 эталонный AlphaGUARD PQ2000.

Ионизационная камера радиометра работает в режиме альфа-спектрометрии с отбором пробы контролируемого воздуха как за счет диффузии через специальный фильтр, так и с помощью принудительной прокачки. Ионизационная камера работает в импульсном режиме при низких значениях ОА радона и в токовом режиме при высоких значениях ОА радона.

Основное назначение прибора – непрерывные автоматические измерения ОА радона в воздухе с одновременной регистрацией условий измерения ОА (температуры, давления и относительной влажности контролируемого воздуха). Для расширения перечня возможных измерений может поставляться в комплектации с различным вспомогательным оборудованием.

Благодаря тому, что допускаемая относительная погрешность AlphaGUARD PQ2000 в поддиапазоне ОА радона от 10^2 до $2 \cdot 10^6$ Бк/м³ равна $\pm 6\%$, он аттестован в Российской Федерации в качестве образцового средства измерений ОА радона в воздухе с относительной погрешностью 6%. Фактически он стал основой метрологического обеспечения средств измерений ОА радона в воздухе.

В отличие от средств измерений интегрального типа, радоновые мониторы обеспечивают не только измерение интегральной ОА радона в воздухе, но и возможность анализировать изменение ОА радона в воздухе в течение длительного (до нескольких месяцев и даже лет) времени, сопоставлять эти изменения со временем суток, года, наружными метеоусловиями и т.д. Однако, радоновые мониторы являются дорогими, достаточно сложными в использовании приборами. В силу этого, они, например, не могут, в отличие от простых и дешевых трековых пробоотборных камер, использоваться для проведения широкомасштабных выборочных обследований населенных пунктов. И хотя радоновые мониторы могут применяться для обследования зданий, все же основное их применение – это решение исследовательских задач.

Поэтому основная область применения радон-мониторов – экспертные измерения и научные исследования процессов формирования радоновой атмосферы помещений, изучение влияния различных факторов на баланс радона в воздухе помещений разного типа, определение эманлирующей способности различных изделий и материалов и коэффициента диффузии радона в различных средах, метрологическое обеспечение.

Измерение УА радона в воде

Одним из значимых источников радона может являться вода, поступающая в здание из подземных источников (скважин) и содержащая радон в повышенных концентрациях. Существует несколько способов и соответствующих средств измерений содержания радона в воде.

Наиболее простым способом измерений активности радона в воде является прямое измерение пробы воды посредством регистрации гамма-излучения сцинтилляционным или полупроводниковым детектором [Методические рекомендации ..., 1980]. Природные воды, как правило, не содержат других гамма-излучающих радионуклидов в количествах, соизмеримых с активностью радона, поэтому измерения могут производиться как в спектрометрическом, так и в счетном режимах.

Т.к. при измерении регистрируется излучение ДПР радона, необходимо обеспечить состояние радиоактивного равновесия между радоном и его ДПР. Оно достигается менее чем через 3 часа – периоды полураспада ^{214}Bi и ^{214}Pb составляют соответственно 19,71 и 27,06 минут. Как правило, это время не превышает время доставки пробы в лабораторию.

Измерения удельной активности радона в воде методом регистрации гамма-излучения сцинтилляционным или полупроводниковым детектором, выполняются в соответствии с инструкциями по эксплуатации к используемым приборам и приложенной методике измерений.

Однако достаточно распространенным методом измерения содержания радона в воде является барботирование контролируемого объема воздуха через пробу воды, отобранную из исследуемого источника водоснабжения с последующим измерением ОА радона в воздухе средствами для инспекционных или квазиинтегральных средств измерения ОА радона в воздухе.

Примерами такого подхода являются измерения УА радона в воде при помощи Комплекса измерительного для мониторинга радона «КАМЕРА-01» с комплектом для отбора проб воды и барботажа (рис. 2.1.19) [Методика ...

№ 40090.6K818], или при помощи Комплекса измерительного для мониторинга радона, торона и их дочерних продуктов «Альфарад плюс» (модификаций Р или АР) с автономной воздуходувкой АВ-07 и комплектом пробоотборных устройств (рис. 2.1.20) [ООО «НТМ-Защита»], или при помощи радиометра AlphaGUARD PQ2000/PQ2000PRO с воздуходувкой AlphaPUMP и комплектом вспомогательного оборудования AquaKIT (рис. 2.1.21) [SAPHYMO].

Метод измерения УА радона и ^{226}Ra в пробах воды основан на переводе радона, растворенного в пробе воды, в активированный уголь, находящийся в колонке СК-13, путем барботажа. Барботаж пробы выполняется в течение 7–10 минут с использованием специально предназначенного комплекта для отбора проб воды и барботажа, в состав которого входят сосуд, емкостью 1,5 л, переходники, распылитель для эффективного барботажа и микрокомпрессор. Технические характеристики метода:

- диапазон измерений УА радона и ^{226}Ra – от 0,3 до 1000 Бк/л;
- температура окружающей среды при отборе пробы воды и барботаже – от 0 до плюс 40°C.



Рисунок 2.1.19 – Измерение УА радона в воде при помощи комплекса «КАМЕРА-01» с комплектом для отбора проб воды и барботаж

[Фото с сайта НТЦ «Нитон», <https://niton.su>]



Рисунок 2.1.20 – Измерение УА радона в воде при помощи комплекса «Альфарад плюс» (модификаций Р или АР) с автономной воздуходувкой АВ-07 и комплектом вспомогательного оборудования

[Фото с сайта ООО «НТМ-Защита», <https://ntm.ru>]

В случае радиометров «Альфарад плюс» (модификаций Р или АР), и AlphaGUARD PQ2000/PQ2000PRO измерения УА радона в пробах воды основаны на использовании циркуляционного способа перевода радона вместе с воздухом из объема пробы в рабочую камеру блока измерения ОА в процессе барботирования. Напомним, что оба радиометра осуществляют регистрацию радона по альфа-излучению, но поглощение альфа-частиц конденсатом воды оказывает существенное влияние на результат измерения. Поэтому, как показано на рис. 2.1.20 и 2.1.21 для исключения влияния

влажности барботируемого воздуха в измерительной схеме с использованием «Альфарад плюс» предусмотрен патрон-осушитель, содержащий силикагель или CaCl_2 , а в случае AlphaGUARD PQ2000/PQ2000PRO – мембранный фильтр Aqua-Stop и мелкоячеистый фильтр для задержки ДПР радона, а для случая прецизионных измерений – картридж с активированным углем объемом 1000 см^3 . Время проведения измерения (барботирования) при использовании обоих радиометров составляет 20 минут.



Рисунок 2.1.21 – Измерение УА радона в воде при помощи радиометра AlphaGUARD PQ2000/PQ2000PRO с воздуходувкой AlphaPUMP и комплектом вспомогательного оборудования AquaKIT [SAPHYMO]

Следует отметить, что перевод радона из пробы воды в активированный уголь посредством барботажа целесообразен в том случае, если в лаборатории имеется только комплекс «КАМЕРА-01» с блоками детектирования БДБ-13 и отсутствует сцинтилляционный гамма-

спектрометр, откалиброванный в геометрии, позволяющей измерять непосредственно пробу воды. В противном случае пробу воды проще поместить в измерительный контейнер и сразу произвести измерение активности ДПР радона без барботажа и ожидания наступления равновесия между радоном и его ДПР в активированном угле.

Измерение плотности потока радона

Полевые измерения ППР с поверхности грунта проводятся на территориях перспективной застройки для оценки потенциальной радоноопасности, при проведении научных исследований и т.д.

Известно несколько отличающихся метода измерения ППР, в основе каждого из которых лежит анализ скорости выделения радона с поверхности грунта, ограниченной площадью пробоотборного контейнера (камеры). Отличительные признаки принципов измерений ППР обусловлены применением разных способов пробоотбора (пассивного или активного), а также особенностью конструкции и состава пробоотборного контейнера (открытый или закрытый). По своим отличительным признакам они получили следующие названия: а) метод закрытого контейнера; б) метод активного контейнера (непрерывная прокачка воздуха через открытый контейнер); и в) метод открытой камеры с углем (пассивное накопление радона в открытой камере с активированным углем) (см. раздел 2.1.3).

Наибольшее распространение в нашей стране получил метод открытой накопительной камеры, установленной «герметично» на поверхности грунта. На рис. 2.1.22, а показана схема открытой накопительной камеры НК-32 комплекса «КАМЕРА-01», а на рис. 2.1.22, б – накопительная камера НК-32, установленная на грунте для измерения плотности потока радона.

В качестве пассивного пробоотборника применяется накопительная камера НК-32 (площадь сбора $32,0 \pm 0,5$ см², высота рабочего слоя угля $4,0 \pm 0,5$ мм, снаряженная масса не более 70 г), содержащая внутри рабочий

(сорбирующий) слой активированного угля, который пересыпается из СК-13 перед установкой камеры. Продолжительность проботбора в контрольной точке (в зависимости от приемлемой погрешности) может быть от 1 до 10 часов.



а) схема сборки накопительной камеры НК-32 и сорбционной колонки СК-13



б) накопительная камера НК-32 в сборе с сорбционной колонкой СК-13, установленная на грунте

Рисунок 2.1.22 – Накопительная камера НК-32 комплекса «КАМЕРА-01»
[Фото с сайта НТЦ «Нитон», <https://niton.su>]

Накопительная камера устанавливается на грунт в точке измерения таким образом, чтобы острые края камеры были погружены (вдавлены) в грунт. Между входным отверстием камеры, обращенным к грунту, и выходным, обращенным в сторону открытой атмосферы, в камере находится слой активированного угля. При прохождении воздуха через этот слой содержащийся в нем радон адсорбируется активированным углем. Активность угля, измеряемая в лабораторных условиях по его гамма- или бета - излучению, определенным образом связана с плотностью потока радона, поступающего в камеру с площади грунта, ограниченной площадью ее входного отверстия.

Сверху на накопительную камеру устанавливается сорбционная колонка СК-13, выполняющая роль защитного адсорбера, задачей которого является выравнивание давления внутри накопительной камеры с атмосферой при одновременном поглощении радона, поступающего в накопительную камеру из атмосферного воздуха. Над защитным адсорбером устанавливается защитная крышка, пропускающая газ, но предохраняющая уголь от атмосферных осадков.

По окончании экспозиции (рекомендуемая продолжительность пробоотбора – 4 часа) активированный уголь адсорбирующая колонка отсоединяется от НК-32, уголь из нее пересыпается в пустую сорбционную колонку, которая герметично закрывается с двух торцов герметичными крышками. В таком виде эта колонка доставляется в лабораторию сорбционную колонку СК-13, где определяется активность радона, сорбированная за время нахождения его в накопительной камере.

На рис. 2.1.23 и 2.1.24 показаны варианты использования Комплекса измерительного для мониторинга радона, торона и их дочерних продуктов «Альфарад плюс» (модификаций Р или АР) с автономной воздуходувкой АВ-07 и комплектом вспомогательного оборудования для измерения ППР методом закрытого контейнера [ООО «НТМ-Защита»].

Опыт показал, что сам метод и, соответственно, аппаратура на его основе, имеют ряд ограничений принципиального, метрологического, эксплуатационного характера. Поэтому она может быть рекомендована для ограниченного применения в некоторых исследовательских и учебных работ [Маренный и др., 2016; Кузнецов и др., 2001], например, при отслеживании временных вариаций ППР с исследуемой поверхности грунта. Одним из важнейших недостатков является существенно меньшая производительность, чем при использовании комплекса «КАМЕРА-01», что особенно существенно при проведении крупно-площадных территорий [Маренный и др., 2016].

Таким образом, методы открытого и закрытого контейнера и, соответственно, средства измерений для их реализации по ряду причин метрологического и эксплуатационного характера не получили распространения в России [Маренный и др., 2016]. Поэтому в данном справочном пособии не рассматриваются более детально.

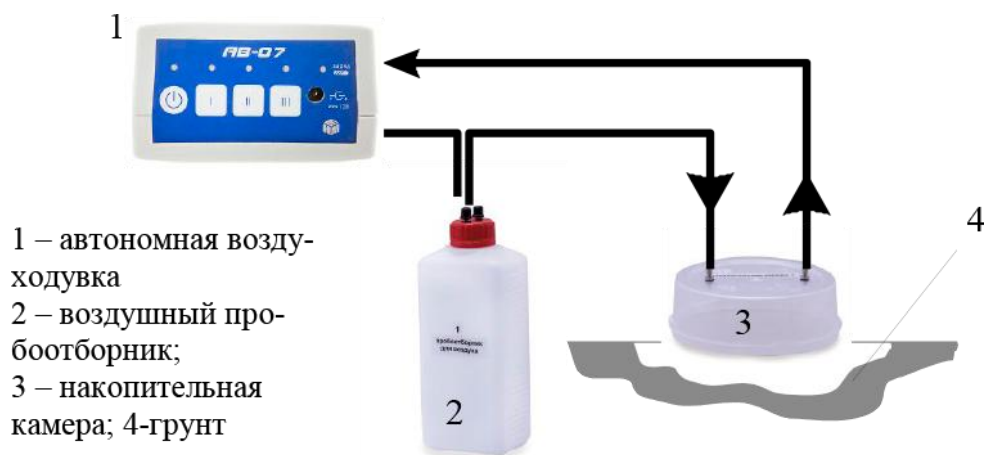


Рисунок 2.1.23 – Схема отбора пробы воздуха с использованием автономной воздуходувки АВ-07 и комплекта вспомогательного оборудования для определения ППР при помощи комплекса «Альфарад плюс» (модификаций Р или АР) [ООО «НТМ-Защита»]

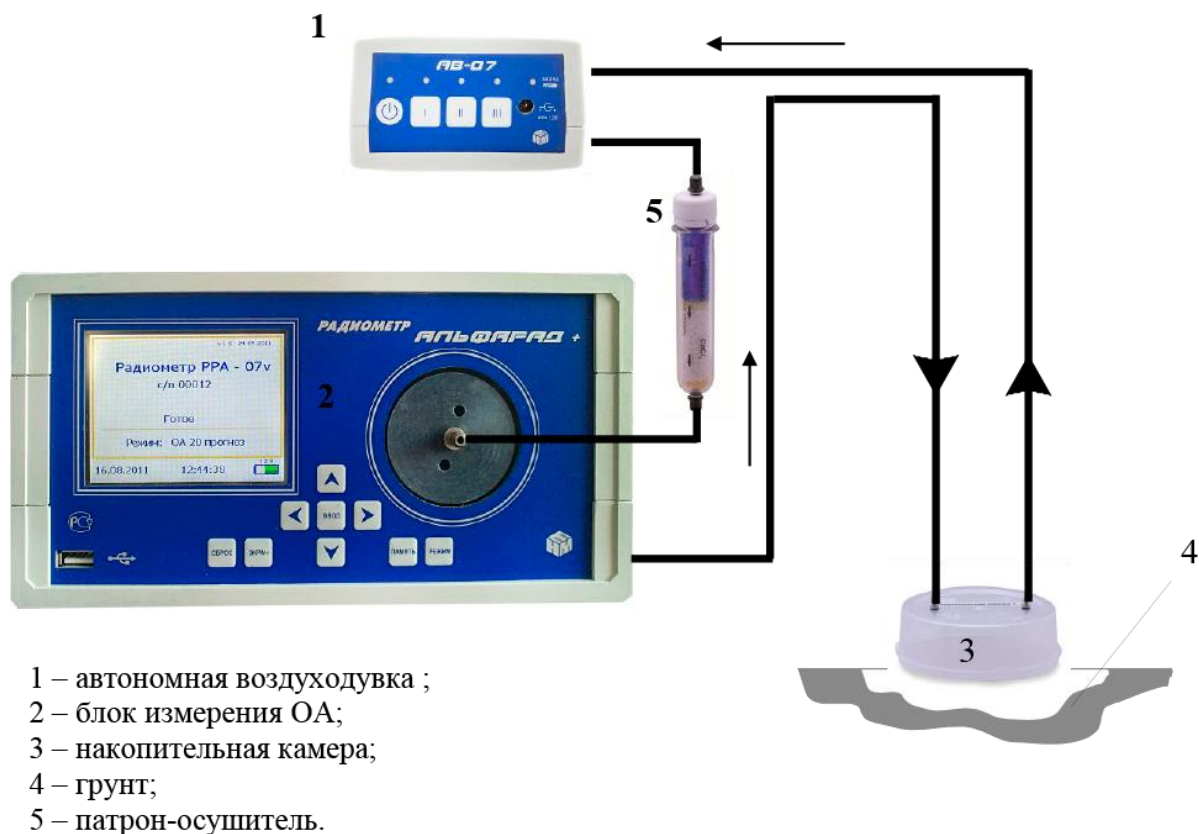


Рисунок 2.1.24 – Схема непосредственного измерения ППР при помощи комплекса «Альфарад плюс» (модификаций Р или АР) с использованием автономной воздуходувки АВ-07 и комплекта вспомогательного оборудования [ООО «НТМ-Защита»]

2.1.5. Характеристики точности результатов измерений и средств измерений

При разработке программ обследований, методик выполнения измерений, а также при оформлении результатов измерений следует пользоваться понятиями, определенными в метрологических документах. ГОСТ Р 8.820–2013 «Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение. Основные положения» вводит понятия “измерительной информации” и “полноты измерительной информации”, определенные следующим образом:

измерительная информация – информация о количественных значениях измеряемой величины, обладающая свойствами, необходимыми для принятия управляющих решений;

полнота измерительной информации – свойство измерительной информации, определяющее ее достаточность для понимания состояния наблюдаемого объекта или явления и принятия необходимого управляющего решения.

Из определения измерительной информации следует зависимость ее состава и формы представления от целей выполнения измерений. Так, если целью измерения является подтверждение факта непревышения контрольного уровня в момент измерения, то форма представления информации в виде «менее контрольного уровня» уже является достаточной для принятия управляющего решения. Здесь следует сразу отметить отличительную особенность радоновых измерений: значительную вариабельность во времени самой измеряемой величины, связанную с изменениями различных внешних факторов. Как правило, принятие управляющих решений относительно того или иного источника облучения радоном производится по результатам длительных наблюдений, включающих в себя серию измерений в различные периоды времени, характеризующиеся различными значениями влияющих факторов, проводимых разными методами и средствами измерений с различной точностью. Фиксация результата измерений в виде «менее ...» приводит к

потере части измерительной информации и не обеспечивает возможности дальнейшего расчета среднегодовых нормируемых величин, на основании которых, как правило, и производится принятие управляющих решений.

Основной составляющей частью измерительной информации является результат измерения. Понятие “результата измерения” определено в РМГ 29-2013³ «Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения» следующим образом:

результат (измерения величины) – множество значений величины, приписываемых **измеряемой величине** вместе с любой другой доступной и существенной информацией.

Примечания:

1. Определение понятия результата измерения претерпело существенное изменение по сравнению с определением РМГ 29-99 и вобрало в себя выражение **точности измерения**. Информация, приводимая в результате измерения, определяется особенностями конкретного измерения и соответствует требованиям, предъявляемым к этому измерению. В большинстве случаев информация относится к точности измерения и выражается *показателями точности*, в обоснованных случаях содержит указание методики измерений и др.

2. Результат измерения может быть представлен **измеренным значением величины** с указанием соответствующего показателя точности. К показателям точности относятся, например, **среднее квадратическое отклонение, доверительные границы погрешности, стандартная неопределенность измерений, суммарная стандартная и расширенная неопределенности**. VIM3³ предусматривает также представление результата измерений плотностью распределения вероятностей на множестве возможных значений измеряемой величины.

3. Если значение показателя точности измерений можно считать пренебрежимо малым для заданной цели измерения, то результат измерения может выражаться как одно измеренное значение величины. Во многих областях это является обычным способом

³ В рекомендациях РМГ 29-2013, введенных в действие с 01.01.2015 г., учтены термины «Международного словаря по метрологии. Основные и общие понятия и соответствующие термины» (VIM3) [JCGM 200:2012]. В формулировках определений преимущество отдавалось принципам сохранения преемственности и целостности сложившейся в СНГ системы терминов.

выражения результата измерения, с указанием **класса точности** применяемого **средства измерений**.

Приведенное определение результата измерений отличается от интуитивно очевидного понятия, соответствующего цифре, отображаемой на индикаторе средства измерения. Фактически результат измерения является либо распределением возможных значений измеряемой величины, либо характеристиками такого распределения. Помимо характеристик распределения результат измерения может включать в себя и сопутствующую информацию⁴.

Как следует из примечания 2 к определению результата измерения, одним из способов описания распределения возможных значений измеряемой величины является указание измеренного значения величины и неопределенности измерения. Именно использование такого представления результата измерений в области радиационного контроля предполагает ГОСТ 8.638–2013 «Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение радиационного контроля. Основные положения». Понятие «неопределенности измерения» определено в ГОСТ Р 54500.3–2011/Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008 «Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения» следующим образом:

неопределенность (измерения) [uncertainty (of measurement)] – параметр, относящийся к результату измерения и характеризующий разброс значений, которые могли бы быть обоснованно приписаны измеряемой величине.

В примечаниях к определению указывается, что «неопределенность измерения, как правило, включает в себя много составляющих. Некоторые из них могут быть оценены из статистического распределения результатов ряда измерений и описаны выборочными стандартными отклонениями. Другие

⁴ Сопутствующая информация необходима для обеспечения полноты измерительной информации. Так, для целей обеспечения метрологической прослеживаемости приводят информацию о СИ и методе измерения; для дозиметрических целей – информацию об исследуемом объекте и его вовлеченности в жизнь или производственную деятельность человека.

составляющие, которые также могут быть описаны стандартными отклонениями, оценивают, исходя из основанных на опыте предположений или иной информации о виде закона распределения». Результаты оценки различных составляющих неопределенности измерения представляют собой “бюджет неопределенности”.

Оценка бюджета неопределенности начинается с построения модели измерения, которая определяет связь всех входных параметров и влияющих величин X_i с измеряемой величиной Y :

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (2.1.1)$$

Вклад неопределенности каждого из входных параметров X_i в неопределенность результата измерений величины Y определяется как

$$u_i(Y) = \frac{\partial f}{\partial X_i} \cdot u(X_i) \quad , \quad (2.1.2)$$

где $u(X_i)$ – неопределенность входного параметра X_i .

Перечень оцененных значений $u_i(Y)$, ассоциированных с соответствующим входным параметром, и является бюджетом неопределенности. В случае, когда все входные (влияющие) величины независимы, суммарная неопределенность результата измерений величины Y рассчитывается как

$$u(Y) = \sqrt{\sum_i u_i(Y)^2} \quad (2.1.3)$$

В ряде случаев выразить связь измеряемой величины с одной или несколькими влияющими величинами в виде аналитической функции или численной процедуры не представляется возможным. В таких случаях соответствующая составляющая неопределенности измерения может быть определена по результатам серии измерений величины Y , распределенных случайным образом относительно влияющей величины. Например, при измерении плотности потока радона с поверхности участка застройки в числе прочих влияющих факторов могут быть выделены случайные вариации

количества событий (импульсов), фиксируемых детектором, и неравномерность распределения измеряемой величины по участку застройки. Обе составляющие неопределенности могут быть оценены суммарно по результатам серии из N результатов измерений величины Y в различных точках участка Y_n :

$$u_i(Y) = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n - 1)} \sum_{n=1}^N (Y_n - \bar{Y})^2}, \quad (2.1.4)$$

где $\bar{Y} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N Y_n$ – среднее арифметическое значение Y_n , принимаемое в качестве значения результата серии из N измерений.

При указании ассоциативного источника оцененной таким образом составляющей неопределенности i следует указать, что это «суммарная неопределенность, обусловленная статистическими вариациями количества взаимодействий квантов ионизирующего излучения с детектором и неравномерностью распределения выхода радона в пределах площадки».

В том случае, если составляющая неопределенности измерений оценивалась по результатам ряда измерений значений Y_n , как это было сделано в формуле (2.1.4), говорят, что соответствующая составляющая неопределенности получена (оценена) по типу А. Если же расчет неопределенности производился на основании данных о неопределенности (или других характеристик распределения) влияющей величины согласно (2.1.2) – говорят, что соответствующая составляющая неопределенности получена (оценена) по типу В.

В радиационных измерениях одной из строк бюджета неопределенности является составляющая неопределенности, обусловленная статистическими вариациями количества взаимодействий квантов ионизирующего излучения с детектором. При измерениях малых значений активности вклад этой составляющей обычно является определяющим. Оценка этой составляющей может быть проведена как по типу А (2.1.4), так и по типу В на основании данных о количестве актов взаимодействия квантов излучения с детектором (см. раздел 1.1.1, формула (1.1.9)).

Второй всегда учитываемой составляющей неопределенности является точность передачи единицы измерений от соответствующего эталона. В том случае, если методика выполнения измерений предусматривает использование чувствительности СИ (или другого калибровочного коэффициента) P , значение которого определяется в процессе калибровки, и, наряду со значением, оценивается и его неопределенность⁵ $u(P)$, то составляющая неопределенности измерения величины Y , обусловленная неопределенностью калибровочного коэффициента P , оценивается как

$$u_p(Y) = \frac{\partial f}{\partial P} \cdot u(P) \quad , \quad (2.1.5)$$

где f – модель (формула), связывающая измеряемую величину Y и чувствительность P (2.1.1);

$u(P)$ – неопределенность чувствительности P .

В ряде случаев при проведении измерений величины Y отсутствуют данные о неопределенности измерения калибровочного коэффициента (чувствительности) P . Примером такой ситуации являются прямые измерения, когда значение калибровочного коэффициента уже занесено в память или конструкцию СИ, и на индикаторе СИ сразу отображается значение измеряемой величины. Большинство СИ в этом случае выводят на индикатор и значение полной неопределенности измерения, а некоторые формируют данные и о бюджете неопределенности. Если же этого не происходит, или по каким-то причинам⁶ необходимо оценить составляющую неопределенности, связанную с точностью передачи единиц измерения, то сделать это, в какой-то степени, можно на основании данных о пределе допускаемой погрешности СИ – характеристики, общей для всех СИ данного типа.

⁵ Калибровка является измерительной процедурой, производимой с целью определения калибровочного коэффициента (чувствительности, эффективности и т.п.), следовательно, к ее результатам применимы те же требования, что и к результатам любой другой измерительной процедуры, т.е. требование указания неопределенности результата калибровки.

⁶ Например, с целью приведения минимально подробного бюджета неопределенности в том случае, если СИ выводит только полную неопределенность.

Понятие погрешности измерения возникает тогда, когда известно истинное (или опорное) значение измеряемой величины. Такими ситуациями являются, в частности, поверка, калибровка или регулировка СИ [РМГ 29-2013]. За истинное (опорное) значение принимается номинальное значение величины, воспроизводимое эталоном. Погрешность измерения в [РМГ 29-2013] определена следующим образом:

погрешность (результата измерения) – разность между измеренным значением величины и опорным значением величины.

В отличие от неопределенности измерений, погрешность может быть как положительной, так и отрицательной. Различают случайную и систематическую погрешность [РМГ 29-2013]. Знание систематической погрешности измерения (или ее зависимости от значения измеряемой величины и влияющих величин) позволяет впоследствии исключить ее из результатов измерений посредством введения поправочных коэффициентов. В процессе калибровки на основании экспериментально полученных данных о погрешности определяют метрологические характеристики СИ и калибровочные или поправочные коэффициенты. Как правило, калибровочные процедуры проводятся предприятием-изготовителем СИ. Полученные в их результате данные заносятся в память СИ и не всегда доступны конечному пользователю.

Помимо калибровки для каждого СИ предусмотрены процедуры первичной (при вводе в эксплуатацию) и периодической поверки. В числе прочего, при поверке проверяется, что погрешность измерения воспроизводимой эталоном или мерой величины не превышает предельного значения, называемого пределом допускаемой погрешности. Согласно [РМГ 29-2013],

предел допускаемой погрешности (средства измерений) – наибольшее значение погрешности средства измерений (без учета знака), устанавливаемое нормативным документом для данного типа средств измерений, при котором оно еще признается метрологически исправным.

Примечание: обычно устанавливают пределы допускаемой погрешности, т.е. нижнюю и верхнюю границы интервала, за которые не должна выходить погрешность.

Значение предела допускаемой погрешности для каждого типа СИ доступно в ГРСИ и, как правило, указывается в документации производителя СИ. Принято считать, что погрешность всех пригодных к эксплуатации (прошедших поверку) СИ распределена равномерно между нижней и верхней границей интервала, задаваемого пределами допускаемой погрешности. Т.е., для случайным образом выбранного прибора, вероятность получить любую погрешность измерения одинакова в пределах интервала допускаемой погрешности и равна нулю за пределами этого интервала. Стандартное отклонение (а именно стандартное отклонение используется как мера неопределенности) величины Y , равномерно распределенной в пределах интервала $\pm\Delta$, равно $\Delta/\sqrt{3}$. Означает ли это, что в качестве оценки неопределенности можно использовать значение предела допускаемой погрешности СИ, деленное на $\sqrt{3}$? В том случае, если другие способы оценки неопределенности недоступны, – да. Однако большинство методик выполнения измерений предусматривают отдельную оценку составляющих, обусловленных случайными причинами (вариациями количества регистрируемых импульсов, неравномерностью распределения измеряемой величины по характеризуемому объекту и т.п.), и отдельно – составляющую, обусловленную неопределенностью коэффициента преобразования СИ. И в ряде методик [Методика ... № RA.RU.311243-2018/400.154] оценка этой (последней) составляющей действительно проводится как $\Delta_{sys}/\sqrt{3}$, где Δ_{sys} – предел допускаемой систематической погрешности СИ.

Таким образом, предел допускаемой систематической погрешности СИ, если он определен для СИ, может использоваться как одна из характеристик точности СИ при оценке составляющих неопределенности измерения.

Способ оценки отдельных составляющих неопределенности, равно как и перечень этих составляющих, определяется разработчиком методики

выполнения измерений. Перенос ответственности за правильность учета всех составляющих неопределенности с оператора, проводящего измерения, на разработчика методики и метрологические службы, осуществлявшие ее экспертизу, является отличительной особенностью отечественного метрологического обеспечения в области радиационного контроля. Эта особенность задается определением, данным в [ГОСТ 8.638–2013] понятию “метрологической прослеживаемости измерений”, наличия которой требуют регулирующие документы во многих областях человеческой деятельности:

метрологическая прослеживаемость измерений – свойство результата измерений, в соответствии с которым он может быть соотнесен с эталоном соответствующей величины (эталоном величин – при косвенных измерениях) через документированную непрерывную цепь калибровок и применения аттестованных методик измерений, обеспечивающих корректную оценку неопределенности.

Данное определение отличается от приведенного в [РМГ 29-2013] (и соответствующего международному понятию “metrological traceability” в VIM3 [JCGM 200:2012]) определения наличием «аттестованных методик измерений» в составе средств, обеспечивающих связь результата измерений с эталоном и корректную оценку неопределенности. С одной стороны, такая особенность отечественной метрологии увеличивает затраты (в том числе и временные) на введение в измерительную практику новых методов, с другой – обеспечивает единство в подходе к методам оценки неопределенности и упрощает требования к квалификации персонала, проводящего измерения.

2.1.6. Рекомендации по анализу, статистической обработке и представлению результатов радоновых обследований

2.1.6.1. Проверка качества и подготовка данных

В зависимости от метода, применявшегося для измерения содержания радона в воздухе помещений различного назначения (жилых, общественных и производственных), а также от того, какое конкретно средство измерений (СИ) использовалось при проведении измерений, исходный массив результатов может представлять собой набор значений ОА или ЭРОА радона в воздухе. Первой важнейшей процедурой перед началом любой статистической обработки результатов является проверка качества данных, поскольку ошибочные значения могли попасть в массив по целому ряду причин, среди которых технический сбой СИ, неверная интерпретация полученных результатов или банальная ошибка оператора на этапе ручного ввода данных в массив, включая ошибки с разрядностью [Кононенко и др., 2018].

Процедура проверки данных на соответствие метрологическим характеристикам использованных СИ называется *валидация* и призвана отфильтровать как недействительные (невалидные) результаты, значения которых выходят за границы диапазона измерений конкретного типа СИ. При этом возможно обнаружение значений как менее нижней границы диапазона измерений (НГДИ) использованного типа СИ, так и выше верхней границы.

Второй вариант особенно часто встречается при обработке данных, полученных с помощью комплекта аппаратуры для измерения ОА радона в воздухе трековым методом «ТРЕК-РЭИ-1М» [Радон ..., 2012], когда рассчитанная экспозиция (т.е. произведение полученной ОА радона на длительность экспонирования трекового детектора) превышает заявленный производителем аппаратуры предел насыщения в $180 \text{ кБк}\cdot\text{сутки}/\text{м}^3$, указанный в приложении к свидетельству об утверждении данного типа СИ.

Подобные результаты относятся, как правило, к зданиям, где в целом фиксируются наиболее высокие значения ОА радона, т.е. зданиям, потенциально нуждающимся в разработке рекомендаций по проведению

радонозащитных мероприятий. Выход результатов измерений за границы диапазона измерений конкретного типа СИ исключает возможность их использования в процедуре анализа данных, однако такие результаты можно использовать как «индикаторные» при планировании дальнейших детальных обследований отдельных зданий.

Также особое внимание при использовании комплекта аппаратуры «ТРЕК-РЭИ-1М» необходимо уделять трактовке низких результатов измерений (порядка 20 Бк/м³) в случаях, когда длительность экспонирования трекового детектора составляет значительно менее или значительно более 90 суток: в этих случаях значение НГДИ будет отличаться от указанного в приложении к свидетельству об утверждении данного типа СИ, соответственно, в большую или меньшую стороны.

Что касается СИ, реализующих экспрессный (мгновенный, инспекционный), квазиинтегральный и непрерывный методы измерений, то выход результатов за верхнюю границу диапазона измерений (ВГДИ) является довольно редкой ситуацией, поскольку для подавляющего большинства типов СИ, внесенных в ГРСИ [ФГИС «АРШИН»], начиная с середины 1990-х гг. (см. табл. 2.1.3), ее значение составляет от десятков тысяч до миллионов Бк/м³.

Отдельную проблему на этапе валидации представляют массивы данных, составленные из результатов измерений различными типами СИ, в том случае, если конкретный результат не ассоциирован с конкретным типом СИ. В этом случае без определенных допущений невозможно установить, выходит ли конкретный результат за границы диапазона измерений или нет. Подобная проблема характерна для таких баз данных (БД) как Региональный, Ведомственный и Федеральный банки данных доз облучения граждан Российской Федерации за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона (РБДОПИ, ВБДОПИ и ФБДОПИ, соответственно), которые представляют собой смесь результатов измерений различными методами и типами СИ, и будет рассмотрена подробнее в главе 3.2.

Таблица 2.1.3 – Перечень типов средств измерений содержания радона в воздухе и их основные метрологические характеристики

№ в ГРСИ	Наименование типа СИ	Измеряемая величина	НГДИ, Бк/м ³	ВГДИ, Бк/м ³	Предел допускаемой основной относительной погрешности, %
<i>Оборудование для экспрессных измерений</i>					
65117-16	Альфа-спектрометр САТ-03	ЭРОА Rn ЭРОА Tn	2 1	1,0·10 ⁵	30
78127-20	Альфа-спектрометры РАС-А1	ЭРОА Rn, Tn ОА Rn	1 30	1,3·10 ⁵	30
49013-12	Альфарад плюс А, АР	ЭРОА Rn ЭРОА Tn	1 0,5	1,0·10 ⁶ 1,0·10 ⁴	30
49013-12	Альфарад плюс Р, АР	ОА Rn	1	2,0·10 ⁶	20
17107-98	КАМЕРА (РАА-20П1)	ЭРОА Rn, Tn	5	5,0·10 ⁵	30
26748-04	КАМЕРА-01 (БДБ-13, активный пробоотбор) КАМЕРА-01 (БДКА-01Ф, активный пробоотбор)	ОА Rn	30 5	2,0·10 ⁵ 2,0·10 ⁵	30
21730-13	МКГБ-01 «РАДЭК» (активный пробоотбор)	ОА Rn	15	3,0·10 ⁶	30
15235-01	ПРОГРЕСС (активный пробоотбор)	ОА Rn	15–100	–	30
37973-08	РАА-3-01 «АльфаАЭРО»	ЭРОА Rn, Tn	1	1,0·10 ⁶	30
20430-00	РАА-10	ЭРОА Rn ЭРОА Tn	10 0,1	2,0·10 ⁴ 1,0·10 ⁴	30
22176-01	РАА-20П2	ЭРОА Rn, Tn	1	1,0·10 ⁵	30
14856-95	РАМОН-01	ЭРОА Rn	4	5,0·10 ⁵	30
21734-01	РАМОН-01М	ЭРОА Rn, Tn	4	5,0·10 ⁵	30
54118-13	Рамон-01М	ЭРОА Rn	4	5,0·10 ⁵	15
35111-07	РАМОН-02, РАМОН-02А	ЭРОА Rn	4	5,0·10 ⁵	30
35111-20	РАМОН-02	ЭРОА Rn ЭРОА Tn	1 0,5	2,0·10 ⁶ 1,0·10 ⁶	30
18597-99	РГА-02Т	ЭРОА Rn	10	1,0·10 ⁴	20–50
18480-99	РГГ-02Т	ОА Rn	50	1,0·10 ⁴	20–50
14296-94	РРА-01М	ОА Rn	20	2,0·10 ⁴	20–30

№ в ГРСИ	Наименование типа СИ	Измеряемая величина	НГДИ, Бк/м ³	ВГДИ, Бк/м ³	Предел допускаемой основной относительной погрешности, %
16465-97	PPA-01M-01	ОА Rn	20	$2,0 \cdot 10^4$	20–30
21365-01	PPA-01M-03	ОА Rn, Tn	20	$2,0 \cdot 10^4$	30
42003-09	AlphaPM	ЭРОА Rn	2	$1,0 \cdot 10^6$	30
<i>Оборудование для квазиинтегральных измерений (пассивный пробоотбор)</i>					
17107-98	КАМЕРА (РГГ-20П1)	ОА Rn	10	$1,0 \cdot 10^6$	30
	КАМЕРА (РГБ-20П1)		30	$1,0 \cdot 10^5$	
26748-04	КАМЕРА-01 (БДБ-13)	ОА Rn	20	$1,0 \cdot 10^5$	30
	КАМЕРА-01 (БДКА-01Ф)		10	$1,0 \cdot 10^5$	
21730-13	МКГБ-01 «РАДЭК» (5 адсорберов)	ОА Rn	15	$3,0 \cdot 10^6$	30
	МКГБ-01 «РАДЭК» (1 адсорбер)		30	$1,0 \cdot 10^5$	20–30
15235-01	ПРОГРЕСС (пассивный пробоотбор)	ОА Rn	15–70	–	30
<i>Оборудование для интегральных измерений</i>					
15431-96	ТРЕК-РЭИ-1 (при экспозиции 30 суток)	ОА Rn	20	$2,0 \cdot 10^3$	40–50
15431-05	ТРЕК-РЭИ-1М (при экспозиции 30 суток)	ОА Rn	20	$2,0 \cdot 10^3$	40–50
59297-14	ТРЕК-РЭИ-1М (при экспозиции 90 суток)	ОА Rn	20	$2,0 \cdot 10^3$	40
14569-95	КСИРА-2010Z	ОА Rn	10	$2,5 \cdot 10^4$	25–50
<i>Оборудование для непрерывных измерений (мониторы радона)</i>					
21366-01	РГА-04	ОА Rn	2	$6,5 \cdot 10^4$	30
14157-94	AlphaGUARD mod.PQ2000	ОА Rn	10	$2,0 \cdot 10^6$	30
14157-02	AlphaGUARD mod. PQ2000	ОА Rn	3	$2,0 \cdot 10^6$	30
14157-09	AlphaGUARD mod. PQ2000	ОА Rn	3	$2,0 \cdot 10^6$	20
15107-96	AlphaGUARD Mod.PQ2000-M	ОА Rn	500	$5,0 \cdot 10^5$	10
50381-12	DOSEman (РГА-1000)	ОА Rn	3	$4,0 \cdot 10^6$	30
50381-12	DOSEman PRO (РАА-30)	ЭРОА Rn	3	$1,0 \cdot 10^5$	30
50383-12	Radon Scout (РГА-1100)	ОА Rn	2	$2,0 \cdot 10^6$	30
50383-12	Radon Scout Plus (РГА-1100 Плюс)	ОА Rn	2	$2,0 \cdot 10^6$	30
50382-12	RTM-1688 (PPA-1688)	ОА Rn, Tn	3	$2,0 \cdot 10^6$	10
50382-12	RTM-2200 (PPA-2200)	ОА Rn, Tn	3	$2,0 \cdot 10^6$	10

Второй процедурой перед началом статистической обработки результатов является проверка релевантности данных, т.е. их соответствия конкретной задаче исследования. Данная процедура называется *верификация* и призвана отфильтровать как нерелевантные результаты измерений, несоответствующие поставленной задаче. Например, для корректной оценки доз внутреннего облучения населения за счет ингаляционного поступления радона и его ДПР и дальнейшей оценки рисков для здоровья необходимо получить наиболее корректное среднее значение ОА радона в воздухе помещений, где возможно пребывание людей. В этом случае на этапе верификации должны быть отфильтрованы как нерелевантные результаты измерений в технических помещениях. Если же интерес представляет оценка потенциальной радоноопасности территории на основе результатов измерений ОА радона в воздухе зданий, то в данном случае релевантными будут результаты измерений, проведенных в подвалах, подполах, погребах, на цокольных и первых этажах зданий, вне зависимости от предназначения конкретных обследованных помещений.

2.1.6.2. Анализ цензурированных данных

Процедура валидации данных позволяет устранить из массива результаты, которые являются недействительными по причине выхода за границы диапазона измерений использованного типа СИ. Однако, если в массиве данных присутствуют результаты, значения которых указаны как «ниже минимально измеряемого значения», то обращение с ними требует особого подхода. Такие грубые действия как отбрасывание подобных результатов или их замена на значение НГДИ, могут в дальнейшем приводить к существенному смещению оценок параметров распределения (медианы, геометрического стандартного отклонения) и его статистических характеристик (арифметического среднего и квантилей) [Кононенко, 2019б].

Для расчета параметров распределений физических величин, результаты измерений которых часто не превышают НГДИ, существует ряд методов,

объединенных общим термином «анализ цензурированных данных» (см., например, [Hecht et al., 1995; Vlachonikolis et al., 1995]). Методы применяются для физических величин, распределение которых носит, как правило, логнормальный характер, а данные при этом цензурированы слева (т.е. присутствуют результаты, значение которых составляет менее НГДИ). Некоторые методы с успехом применяются даже в том случае, когда распределение является т.н. смешанным [Дубнер, 2002], т.е. составленным из распределений результатов измерений, полученных с использованием разных методов или типов СИ с отличающимися НГДИ. В этом случае в массиве данных могут присутствовать результаты измерений, лежащие между несколькими НГДИ.

Поскольку характеристики и параметры распределений значений содержания радона в воздухе помещений, получаемые после обработки результатов радоновых обследований, в дальнейшем используются при расчете доз внутреннего облучения населения радоном и его ДПР, а также различных показателей риска для здоровья населения, представляется весьма важным, чтобы смещение оценок параметров распределений было минимизировано. И одним из способов решения этой задачи является использование в процессе обработки результатов измерений методов анализа цензурированных данных. В данном случае речь идет исключительно о результатах, полученных в рамках спланированных радоновых обследований, когда точно известна методика измерения, тип применявшегося СИ и его НГДИ. Это кардинально отличает подобные результаты от тех, что содержатся в БД, задействованных в Единой государственной системе контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан (ЕСКИД): БД лабораторий радиационного контроля «ФФ-4» [Кононенко и др., 2018; Кононенко, 2019а], РБДОПИ, ВБДОПИ и ФБДОПИ. Подавляющая часть содержащихся в них данных представляет собой результаты измерений содержания радона в воздухе помещений, проводимых в рамках обследований зданий перед сдачей в эксплуатацию или в рамках контрольно-надзорных мероприятий. Однако ключевым недостатком

программного обеспечения для ведения этих БД, из-за которого применение методов анализа цензурированных данных становится невозможным, является отсутствие возможности указать, что результат измерения не превышает НГДИ конкретного типа СИ, который также невозможно указать в качестве дополнительной характеристики результата измерения [Кононенко, 2019а].

Использование методов анализа цензурированных (CDA – censored data analysis) данных применительно к результатам измерений содержания радона в воздухе или воде ранее описано в некоторых зарубежных [Barry et al., 1998; Burmaster et al., 2000] и отечественных публикациях [Кононенко, 2019б]. Далее представлен один из наиболее точных, но при этом несложных с вычислительной точки зрения методов анализа цензурированных данных – метода бета-подстановки – для анализа массива результатов радонового обследования [Кононенко, 2019б].

Методы анализа цензурированных данных уже не один десяток лет с успехом применяются при анализе результатов измерений содержания различных загрязнителей в воде, пищевых продуктах и других средах. Некоторые методы рекомендованы к применению авторитетными международными организациями, такими как Европейское агентство по безопасности продуктов питания [EFSA, 2010] и Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) [GEMS/Food-EURO, 1995]. Среди наиболее часто применяющихся можно упомянуть метод оценки максимального правдоподобия (MLE) [Hornung et al., 1990; Perkins et al., 1990; Finkelstein et al., 2001; Hewett et al., 2007], метод лог-пробит регрессии (LPR) [Hewett et al., 2007; Sinha et al., 2006], метод Каплана-Мейера (К-М) [Schmoyer et al., 1996; She, 1997], Байесовский метод [Busschaert et al., 2011; Paulo et al., 2005] и наиболее простые методы подстановки $LOD/2$ и $LOD/\sqrt{2}$ [Hornung et al., 1990; Hewett et al., 2007; Glass et al., 2001].

До 2010 г. «золотым стандартом» во многих случаях считался MLE-метод, поскольку он давал минимальные смещение оценки и среднеквадратичную ошибку, являющуюся показателем общей точности

оценки [Hewett et al., 2007; Ganser et al., 2010]. Однако данный метод является и наиболее сложным с вычислительной точки зрения. Поиск компромиссного варианта, сочетающего в себе точность и простоту реализации, привел к разработке в 2010 г. метода бета-подстановки [Ganser et al., 2010]. Ряд тестов, проведенных как разработчиками, так и группой независимых специалистов [Huynh et al., 2014; Huynh et al., 2016], в ходе которых из логнормальных распределений со средним геометрическим равным единице и различными геометрическими стандартными отклонениями было сгенерировано от 1000 до 100000 случайных выборок, показал, что метод бета-подстановки не только превосходит по точности методы подстановки $LOD/2$ и $LOD/\sqrt{2}$, метод Каплана-Мейера и Байесовский метод, но и ничем не уступает MLE-методу при гораздо более простой вычислительной процедуре.

Метод бета-подстановки

При анализе методов подстановки $LOD/2$ и $LOD/\sqrt{2}$, в которых каждое значение ниже НГДИ заменяется произведением НГДИ на $1/2$ и $1/\sqrt{2}$ соответственно, авторы публикации [Hornung et al., 1990] пришли к выводу, что оба этих метода дают несмещенные оценки истинного геометрического среднего и геометрического стандартного отклонения (GSD) только для определенных сочетаний GSD и доли цензурированных значений в массиве данных. Это послужило авторам публикации [Ganser et al., 2010] отправной точкой в поисках некоторого коэффициента β (рассчитываемого на основе нецензурированных данных в массиве), который заменит множители $1/2$ и $1/\sqrt{2}$, что в итоге даст практически нулевое смещение оценок искомых параметров распределения и минимальную среднеквадратичную ошибку.

В зависимости от того, какой параметр распределения оценивается – геометрическое или арифметическое среднее – значение коэффициента β определяется по-разному. После оценки геометрического и арифметического средних метод позволяет оценить GSD и далее квантили распределения.

Процедура расчета в целом состоит из 8 шагов, ее несложно реализовать как с помощью любого табличного процессора, так и с помощью языков программирования, встроенных в распространенные программы статистической обработки данных.

Шаг 1. Из исходного массива данных объемом n значений, в котором содержится k цензурированных значений, формируется массив нецензурированных данных объемом $n-k$ значений.

Шаг 2. Рассчитываются входные и промежуточные значения:

$$\bar{y} = \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^{n-k} y_i, \quad (2.1.6)$$

где $y_i = \ln(x_i)$, а x_i – i -тое значение из массива нецензурированных данных.

$$z = \Phi^{-1} \left[\frac{k}{n} \right], \quad (2.1.7)$$

где функция Φ^{-1} дает обратное значение стандартного нормального распределения ($\mu=0; \sigma=1$), т.е. z -значение, соответствующее k/n .

$$f(z) = \frac{pdf(z, 0, 1)}{1 - cdf(z, 0, 1)} \quad (2.1.8)$$

$$\hat{s}_y = \frac{\bar{y} - \ln(L)}{f(z) - z} \quad (2.1.9)$$

$$f(\hat{s}_y, z) = \frac{1 - cdf \left(z - \frac{\hat{s}_y}{n}, 0, 1 \right)}{1 - cdf(z, 0, 1)}, \quad (2.1.10)$$

где $pdf(z, 0, 1)$ – функция плотности вероятности, а $cdf(z, 0, 1)$ – кумулятивная функция распределения стандартного нормального распределения;

\hat{s}_y – предварительная оценка $\ln(GSD)$;

L – значение НГДИ.

Шаг 3. Рассчитывается коэффициент β для оценки арифметического среднего (AM):

$$\beta_{AM} = \frac{n}{k} \cdot cdf(z - \hat{s}_y, 0, 1) \cdot \exp \left[-\hat{s}_y \cdot z + \frac{\hat{s}_y^2}{2} \right] \quad (2.1.11)$$

Шаг 4. Каждое цензурированное значение в исходном массиве данных заменяется на произведение $L \cdot \beta_{AM}$, после чего по полученному массиву рассчитывается арифметическое среднее.

Шаг 5. Рассчитывается коэффициент β для оценки геометрического среднего (GM):

$$\beta_{GM} = \exp \left[\frac{-(n-k)n}{k} \cdot \ln(f(\hat{s}_y, z)) - \hat{s}_y \cdot z - \frac{n-k}{2kn} \cdot \hat{s}_y^2 \right] \quad (2.1.12)$$

Шаг 6. Каждое цензурированное значение в исходном массиве данных заменяется на произведение $L \cdot \beta_{GM}$, после чего по полученному массиву рассчитывается геометрическое среднее.

Шаг 7. Пересчитывается предварительная оценка $\ln(GSD)$ и затем рассчитывается GSD :

$$s_y = \sqrt{\frac{2n}{n-1} \cdot \ln \left(\frac{AM}{GM} \right)} \quad (2.1.13)$$

$$GSD = \exp(s_y) \quad (2.1.14)$$

В случае, если отношение $AM/GM \leq 1$, что реализуется в случае выборок небольшого объема, в которых результаты близки к НГДИ, значение s_y принимается равным 0, а значение GSD равным 1.

Шаг 8. Рассчитывается 0,95-квантиль распределения:

$$\hat{X}_{0,95} = \exp \left[\ln(GM) - \frac{s_y^2}{2n} + 1,645 \cdot s_y \right] \quad (2.1.15)$$

При необходимости расчета квантиля распределения другого уровня, значение 1,645 должно быть заменено на значение квантиля стандартного нормального распределения нужного уровня.

Объем выборки при применении метода бета-подстановки должен составлять не менее 5 значений, а доля цензурированных значений не должна превышать 50%.

В случае, если массив исходных данных составлен из результатов измерений, полученных с использованием разных методик или типов СИ с отличающимися НГДИ, в качестве значения L , используемого в шагах 2, 4 и 6, используется значение \bar{L} , рассчитываемое следующим образом:

$$\bar{L} = \exp \left[\frac{1}{\sum_i m_i} \cdot \sum_i (m_i \cdot \ln(L_i)) \right], \quad (2.1.16)$$

где m_i – количество результатов измерений, цензурированных по i -той НГДИ L_i .

2.1.6.3. Учет ОА радона в наружном воздухе

За последние 10 лет был опубликован целый ряд работ по оценке результатов радоновых обследований в различных странах интегральным методом с помощью твердотельных трековых детекторов [Bossew, 2010; Hunter et al., 2011; Daraktchieva et al., 2014; Cinelli et al., 2015], в которых особое внимание уделялось анализу характера распределения значений ОА радона в воздухе помещений, а также исследованию факторов, искажающих это распределение в области очень низких и очень высоких значений. Было показано, что ОА радона в воздухе помещений формируется за счет трех основных источников поступления: подстилающих пород, материалов строительных конструкций и наружного воздуха, причем если характер взаимодействия комплекса факторов, в который вовлечены первые два источника, является мультипликативным (что порождает в итоге логнормальное распределение значений ОА радона), то влияние третьего источника является, по всей видимости, аддитивным [Gunby et al., 1993].

Фактически распределение этой величины можно описать следующим выражением:

$$A_I = A_o + \exp(Y) \quad , \quad (2.1.17)$$

где A_I – результирующая ОА радона в помещении;

A_o – ОА радона в наружном воздухе;

$\exp(Y)$ – логнормально распределенная ОА радона, сформировавшаяся в помещении за счет мультипликативного взаимодействия факторов, связанных с поступлением радона из подстилающих пород и материалов строительных конструкций.

На необходимость такой операции, как вычитание значений ОА радона в наружном воздухе («фоновых» значений) из результатов интегральных измерений ОА радона в воздухе помещений, обращалось внимание и в других работах, в том числе более ранних [Gunby et al., 1993; Miles, 2002; Synnott et al., 2006; Organo et al., 2007; Murphy et al., 2008; Antignani et al., 2019]. Это позволяет частично устранить искажение распределения в области очень низких значений, но при этом не оказывает значимого влияния на характер распределения в области высоких значений.

Некоторые авторы предлагают не отбрасывать значения, которые становятся отрицательными после вычитания фона, а заменять их на некую небольшую константу, например, 1 Бк/м³ [Cinelli et al., 2015]. Это приводит, с одной стороны, к снижению значения среднего геометрического (медианы) распределения, а с другой стороны – к повышению ожидаемой доли зданий с превышениями гигиенического норматива среднегодовой ЭРОА изотопов радона.

Данных о содержании радона в наружном воздухе на территории России крайне мало. Единственным на данный момент масштабным исследованием, проведенным за последние 30 лет, является измерение ОА радона в приземном слое атмосферы вдоль Транссибирской железнодорожной магистрали в ходе пяти международных экспедиций TROICA (Transcontinental Observations Into the Chemistry of the Atmosphere) в 1999–2007 гг. на вагоне-лаборатории, передвигавшемся в составе пассажирских поездов от Москвы до Хабаровска и

Владивостока и обратно [Березина и др., 2009]. Полученные результаты лежат в довольно широком диапазоне 0,5–75 Бк/м³ при среднем значении около 8 Бк/м³. В публикации, к сожалению, не приводятся результаты по отдельным регионам, через территорию которых пролегали маршруты экспедиции, зато представлены усредненные результаты по сезонам: весна, лето (три значения, полученные в разные годы) и осень (см. табл. 2.1.4; значение для зимы было получено путем усреднения результатов по остальным трем сезонам).

Таблица 2.1.4 – ОА радона в наружном воздухе по сезонам
(по данным [Березина и др., 2009])

Сезон	Средняя ОА радона в наружном воздухе, Бк/м ³	Ошибка среднего	Округленное среднее, Бк/м ³
Весна	6,706	0,184	7
Лето	6,536	0,162	7
	7,199	0,243	
	8,192	0,214	
Осень	12,615	0,270	13
Зима	–	–	8

Гораздо более масштабные измерения были проведены Институтом прикладной геофизики в конце 1970-х гг. [Болтнева и др., 1980]. Около 500 измерений было выполнено самолетной лабораторией по меридиональным маршрутам, пересекавшим практически всю территорию бывшего СССР и отстоявшим друг от друга на расстояние 100–400 км. На схематической карте пространственного распределения содержания радона в приземном слое воздуха над равнинной территорией бывшего СССР, представленной на рис. 2.1.25, выделены области с характерными для них диапазонами ОА радона (при этом отдельные районы этих областей различались по среднему значению ОА радона не более чем в два раза). Характеристика выделенных областей приведена в табл. 2.1.5.

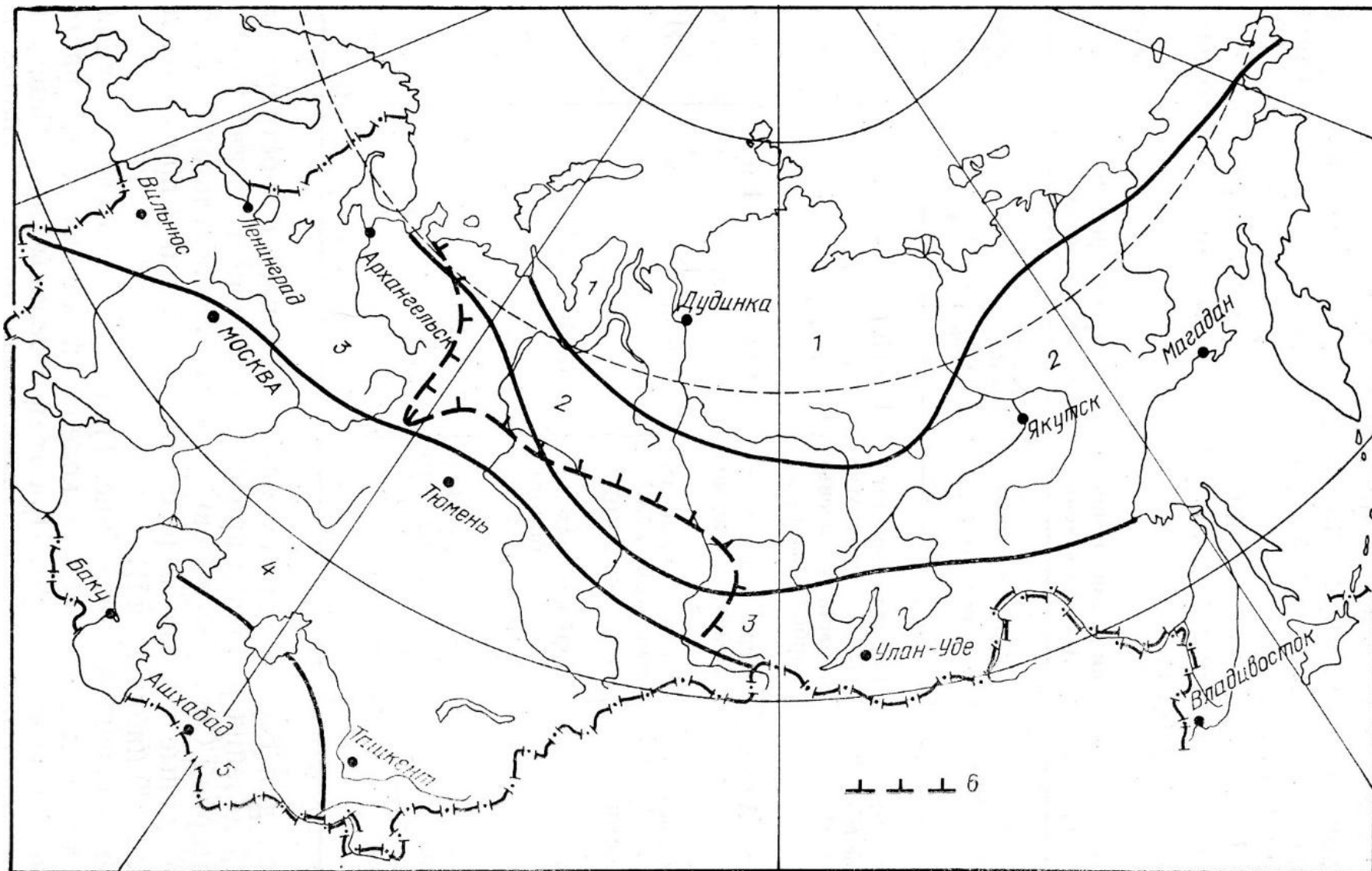


Рисунок 2.1.25 – Схема распределения радона в приземном слое воздуха над территорией бывшего СССР [Болтнева и др., 1980] (6 – западная граница распространения многолетней мерзлоты на равнинной территории бывшего СССР)

Таблица 2.1.5 – Характеристика областей распределения радона в приземном слое воздуха над территорией бывшего СССР (по данным [Болтнева и др., 1980])

Область (рис. 2.1.25)	Географическое положение	Средняя ОА радона, Бк/м ³	Коэффициент вариации, %
1	Арктическое побережье азиатской части; север Якутии и Красноярского края	0,185	60
2	Заполярье европейской территории, север Западной Сибири, Якутия (центр и юг), север Восточной Сибири, Камчатка	0,777	35
3	Северо-запад и север центральной части европейской территории, Средний Урал, юг Западной Сибири, юг Восточной Сибири и Дальний Восток	2,220	45
4	Центр и юг европейской территории, Южный Урал, Северный и Центральный Казахстан	6,660	40
5	Южный Казахстан, равнины Средней Азии	9,250	35

Полученные в обоих упомянутых исследованиях значения ОА радона в приземном слое воздуха в целом согласуются с данными, приведенными в отчетах НКДАР ООН за 1993 г. [UNSCEAR, 1993], 2000 г. [UNSCEAR, 2000] и 2006 г. [UNSCEAR, 2009]: в среднем 10 Бк/м³ при диапазоне 1–100 Бк/м³, в котором низкие значения характерны для небольших островов и прибрежных территорий, а высокие – для обширных территорий, обладающих высокой потенциальной радоноопасностью.

Однако, результаты обоих исследований обладают некоторыми недостатками, влияющими на возможность их использования для коррекции формы распределения значений ОА радона в воздухе помещений. Исследование TROICA было проведено преимущественно на территории южной Азиатской части страны и не охватывало зимний период; результаты

по отдельным регионам в публикациях не представлены. Следует обратить внимание на то, что в работе [Березина и др., 2009] не указано, каким ходом Транссибирской железнодорожной магистрали следовали поезда, поэтому приходится принять допущение, что результаты измерений ОА радона в наружном воздухе были получены во всех регионах, по территории которых проходит какой-либо из трех ходов (Северный, Новый, Южный) Транссиба (см. рис. 2.1.26). Однако, в случае такого региона как Красноярский край, имеющего огромную протяженность в меридиональном направлении, результаты могут быть применимы только для населенных пунктов, расположенных в южной части края, по территории которой и проходит магистраль.



Рисунок 2.1.26 – Карта Транссибирской железнодорожной магистрали: часть Северного хода (синяя линия); Новый ход (темно-красная линия в азиатской части России); Байкало-Амурская магистраль – часть Северного хода (зеленая линия); участок Южного хода (черная линия) [Stefan Kühn, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Map_Trans-Siberian_railway.png]

Результаты исследования Института прикладной геофизики [Болтнева и др., 1980] не имеют сезонной стратификации, однако охватывают всю территорию страны, что делает их, по-видимому, более предпочтительным источником информации об ОА радона в наружном воздухе.

Тем не менее, чтобы при коррекции результатов измерений в помещениях не опираться на чересчур усредненные данные, полученные в регионах, которые по своим геологическим, геофизическим и геодинамическим условиям, а также радиационно-физическим характеристикам грунтов могут заметно отличаться от других частей страны, необходимо включать в программу радоновых обследований измерения ОА радона в наружном воздухе на территории районов, муниципальных образований или даже отдельных населенных пунктов. Данный методический аспект представляется особенно важным с учетом возможного в ближайшем будущем роста числа радоновых обследований в России с использованием «контрольно-измерительных приборов для измерения содержания радона и продуктов его распада в жилых помещениях с применением интегральных методов», об использовании которых говорится в Указе Президента РФ от 13.10.2018 № 585 «Об утверждении Основ государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу».

В программном обеспечении «ФФ-4» для ввода первичной измерительной информации на уровне лабораторий радиационного контроля и дальнейшей ее передачи по форме федерального статистического наблюдения № 4-ДОЗ в ВБДОПИ или РБДОПИ, имеется возможность занесения результатов измерения содержания радона в воздухе на открытой местности. При условии накопления достаточного объема данных, данный показатель может быть в дальнейшем использован для построения региональных карт потенциальной радоноопасности наряду с плотностью потока радона с поверхности грунта, ОА радона в почвенном воздухе и

воздухе подвальных помещений, а также удельной активностью ^{226}Ra в подстилающих породах.

2.1.6.4. Методы статистической обработки данных

По современным научным представлениям, обобщенным в отчетах Научного комитета ООН по действию атомной радиации (НКДАР ООН) 2000 г. [UNSCEAR, 2000] и 2006 г. [UNSCEAR, 2009], содержание радона в воздухе помещений, выраженное в единицах ОА или ЭРОА, более или менее точно описывается логнормальным распределением (т.е. нормальное распределение имеет логарифм физической величины). Этот факт был также подтвержден путем анализа массива данных, содержащего более 800 тыс. результатов измерений содержания радона в воздухе помещений в 78 субъектах РФ [Кононенко, 2019a]. Предпринимались попытки подобрать альтернативное распределение [Andersen et al., 2001; Murphy et al., 2008; Tuia et al., 2008; Bossew, 2010], но в результате более глубокого анализа данных было установлено, что содержание радона в воздухе помещений точно следует логнормальному закону в том случае, когда данные получены на территории одной геологической формации (платформы); в случае же рассмотрения данных, полученных на территории целого региона или страны, где сочетаются разнообразные геологические условия, отклонения неизбежны [Kies et al., 1996]. В этом случае, как правило, в распределении присутствует тяжелый правый хвост – высокие, но немногочисленные значения.

В случаях, когда редкими событиями нельзя пренебречь, а средние арифметические значения являются неинформативными, можно говорить об анализе распределений с тяжелыми хвостами. Распределение имеет тяжелый хвост, если его плотность вероятности убывает медленнее плотности вероятности экспоненциального закона. Например, логнормальное распределение относится к распределениям с т.н. умеренно тяжелым хвостом

[Embrechts et al., 1997]: плотность вероятности для логнормального распределения убывает медленнее, чем для экспоненциального закона, но быстрее, чем для степенного.

Логнормальное распределение, при котором нормально распределены не сами случайные величины, а их логарифмы, свидетельствует о том, что оцениваемый показатель формируется благодаря мультипликативному воздействию факторов. При этом воздействие факторов, определяющих случайную величину, не суммируется, как в случае нормального распределения, а умножается, что и выражается в увеличении вероятности появления высоких значений, т.е. хвоста в правой части гистограммы частотного распределения (ГЧР) [Limpert et al., 2001; Микляев, 2015]. Во многих физических, химических, биологических и токсикологических процессах случайные величины подчиняются именно логнормальному закону [Ott, 1990; Hattis et al., 1994]. В случае содержания радона в воздухе помещения мультипликативными факторами являются удельная активность ^{226}Ra в подстилающих грунтах и материалах строительных конструкций, проницаемость грунтов, возможные пути поступления радона из грунта в помещения здания, разница давлений между наружным и внутренним воздухом, кратность воздухообмена в помещениях и др.

В ряде работ по оценке результатов радоновых обследований было показано, что распределение значений содержания радона в воздухе помещений не всегда строго подчиняется логнормальному закону, поскольку анализируемый массив данных представляет собой выборку из смешанного распределения [Дубнер, 2002], составленного из отдельных распределений с существенно отличающимися параметрами [Кононенко, 2019а; Маренный и др., 2020]. Эти отдельные распределения описывают части массива результатов измерений, полученных при разных условиях. К таким условиям могут относиться время года, тип помещения (жилое, общественное, производственное), конструктивные особенности здания (основной

строительный материал), а также географическое положение (расположение зданий на территориях с отличающейся потенциальной радоноопасностью).

Как правило, содержания радона строго следует логнормальному закону до определенного уровня, выше которого начинают наблюдаться отклонения (выбросы и экстремальные значения) [Кононенко, 2019a]. Результаты многочисленных исследований (длинный, но отнюдь не исчерпывающий список которых приведен в публикации [Bossew, 2010]) показывают, что отклонение статистическими тестами гипотезы о логнормальном характере распределения происходит преимущественно за счет наличия тяжелого правого хвоста. В ряде случаев после устранения нескольких верхних экстремальных значений (ВЭЗ) или выбросов гипотеза подтверждается [Bossew, 2010; Organo et al., 2007; Murphy et al., 2008]. Присутствие в массиве данных подобных результатов в определенной степени искажает оценку среднего значения, в зависимости от того, какая мера центральной тенденции выбрана для характеристики результатов, однако следует помнить, что исключение ВЭЗ и выбросов из массива неизбежно ведет к некоторой недооценке величин среднего значения и дисперсии [Bossew, 2010].

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

На искажение распределения определенное влияние оказывает также и объем выборки: при увеличении «разрешения» выборки (т.е. количества

точек измерения при неизменной площади охвата) вероятность отклонения распределения от логнормального возрастает за счет выявления определенных «локальных» особенностей [Bossew, 2010]. Вместе с тем при невысоком разрешении даже на больших площадях распределение с большой долей вероятности будет носить логнормальный характер. Данный факт заставляет обратить внимание на важность такой задачи как методически корректное формирование выборки необходимого и достаточного (!) объема на этапе планирования обследования [IAEA/AQ/33; Israel, 2013].

Как известно, «невозможно *доказать*, что распределение генеральной совокупности действительно является логнормальным: статистические тесты могут только оценить гипотезу о том, что распределение выборки *согласуется* с постулируемой формой распределения генеральной совокупности. И даже если гипотеза отклоняется статистическим тестом, данные все равно могут быть достаточно хорошо аппроксимированы логнормальным распределением» [Nazaroff et al., 1988].

Основной смысл использования логнормального распределения значений содержания радона (фактически, нормального распределения значений натурального логарифма содержания радона) заключается в возможности прогнозирования доли зданий, в которых ОА радона может превысить некоторый порог, например, 400 Бк/м^3 , что можно уверенно трактовать как превышение установленного в России (согласно п. 5.3.3 НРБ-99/2009 [СанПиН 2.6.1.2523-09]) норматива среднегодовой ЭРОА изотопов радона $\text{ЭРОА}_{\text{Rn}} + 4,6 \cdot \text{ЭРОА}_{\text{Tn}}$ для эксплуатируемых жилых и общественных зданий, равного 200 Бк/м^3 (с учетом того, что стандартное значение коэффициента радиоактивного равновесия между радоном и его короткоживущими дочерними продуктами распада принято равным 0,5, согласно п. 6.3 [МУ 2.6.1.2838-11]). Исходя из этого конечная цель выполнения всех математических операций, направленных на восстановление формы логнормального распределения значений содержания

радона и более точное определение его параметров, заключается в повышении достоверности оценки этой доли. В связи с этим некоторыми отклонениями эмпирического распределения от логнормального характера за счет тяжелого правого хвоста можно пренебречь, поскольку значения, искажающие распределение в области высоких значений, чаще всего превышают этот порог и, таким образом, не оказывают существенного влияния на искомую долю зданий [Cinelli et al., 2015].

Обработка массивов результатов измерений содержания радона в воздухе помещений включает в себя целый комплекс процедур [Кононенко, 2021; Кононенко, 2019а; Маренный и др., 2020]: анализ характера распределений значений содержания радона и натурального логарифма содержания радона и степени их соответствия некоторым законам, анализ на наличие выбросов, идентификация и, при необходимости, устранение ВЭЗ. Для визуализации результатов обработки (в т.ч. промежуточных в процессе устранения ВЭЗ) могут использоваться три типа диаграмм: Q-Q диаграмма с выделением ВЭЗ (при их наличии), ГЧР значений содержания радона и ГЧР значений натурального логарифма содержания радона с наложением кривых, соответствующих некоторым законам распределений.

Для построения ГЧР, расчета статистических критериев и квартилей распределения могут использоваться любые статистические пакеты. Q-Q диаграммы могут строиться как в статистических пакетах, так и «вручную» в табличных процессорах, где также удобно производить идентификацию выбросов и ВЭЗ и одновременно рассчитывать параметры и характеристики распределений.

Q-Q диаграмма (диаграмма квантиль-квантиль или нормальный вероятностный график) используется для визуальной оценки того, насколько результаты измерений физической величины отклоняются от теоретических значений, полученных из нормального распределения с теми же параметрами, что и для эмпирических данных. Данный вид диаграмм

является стандартным инструментом анализа характера распределения значений ОА радона в воздухе (см., например, [Bossey, 2010; Hunter et al., 2011; Daraktchieva et al., 2014; Cinelli et al., 2015]) и рекомендуются к применению МАГАТЭ [IAEA/AQ/33]. В качестве результатов измерений для построения Q-Q диаграмм используются натуральные логарифмы ОА радона. В случае идеального совпадения результаты измерений и теоретические значения будут находиться на одной прямой. По оси ординат откладываются значения натурального логарифма ОА радона $\ln(A_{Rn})$, а по оси абсцисс – z-значения (т.е. обратные значения стандартного нормального распределения, имеющего среднее, равное нулю, и стандартное отклонение, равное единице). Перед построением Q-Q диаграммы результаты измерений ранжируются по возрастанию, и вычисляется значение кумулятивной вероятности по формуле $(Rank - 0,5)/N$, где $Rank$ – порядковый номер (ранг) результата измерения в ранжированной последовательности, а N – общее количество результатов. После этого z-значения вычисляются в табличном процессоре Microsoft Excel или LibreOffice Calc с помощью функции НОРМСТОБР(), либо функции NORMSINV() в OpenOffice Calc, аргументом которых выступает значение кумулятивной вероятности. Теоретические значения получаются с помощью функции НОРМОБР(), либо NORMINV(), аргументами которых являются значение кумулятивной вероятности, а также среднее арифметическое и стандартное отклонение, рассчитанные по массиву логарифмов результатов измерений.

В качестве примера идеального совпадения на рис. 2.1.27 представлены Q-Q диаграмма и ГЧР, построенные для выборки объемом 1000 значений, сгенерированной случайным образом из нормального распределения с параметрами $\mu=1,5$; $\sigma=0,5$ для моделирования логнормального распределения ОА радона в воздухе помещений в интервале значений 1–20 Бк/м³.

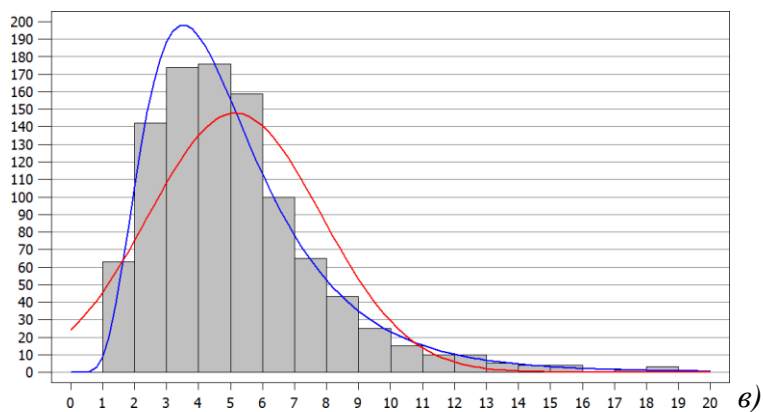
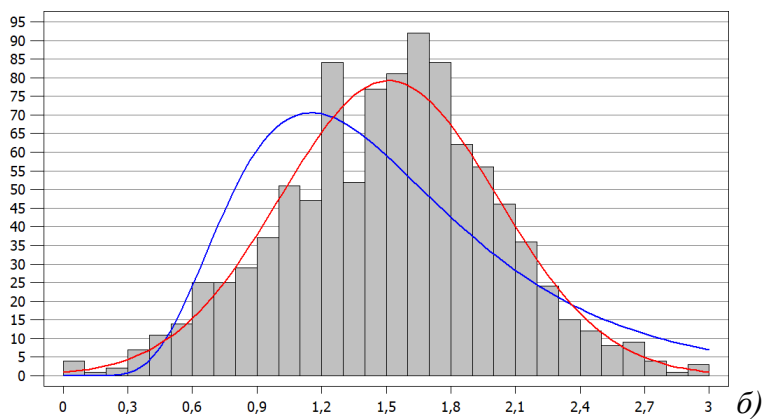
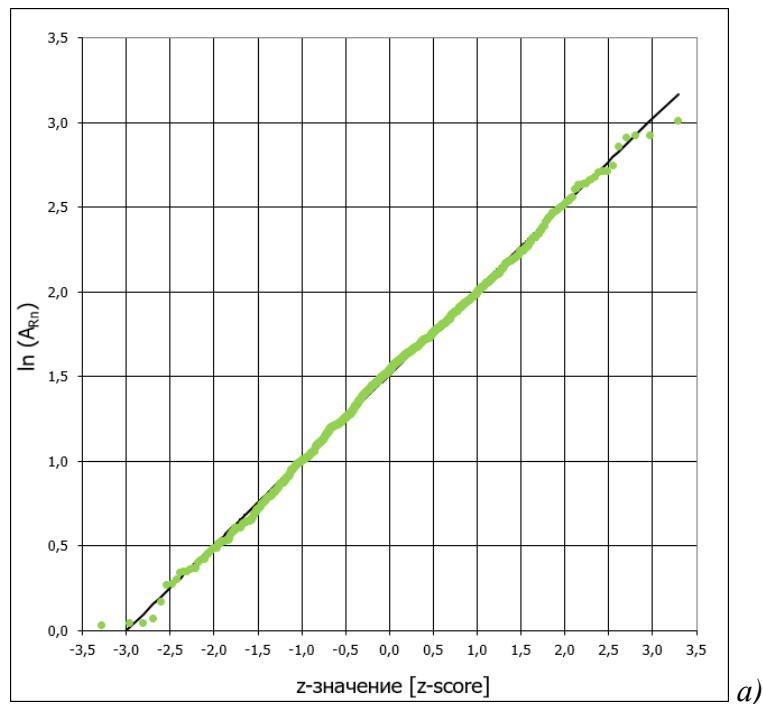


Рисунок 2.1.27 – Q-Q диаграмма и ГЧР для выборки объемом 1000 значений, сгенерированной случайным образом из нормального распределения с параметрами $\mu=1,5$; $\sigma=0,5$

На Q-Q диаграмме, представленной на рис. 2.1.27, *а* зеленые точки – это сгенерированные случайным образом значения, а на черной прямой

лежат теоретические значения, полученные из нормального распределения. По оси ординат отложены значения натурального логарифма ОА радона, а по оси абсцисс – z-значения (т.е. обратные значения стандартного нормального распределения, имеющего среднее, равное нулю, и стандартное отклонение, равное единице).

На рис. 2.1.27, б представлена гистограмма частотного распределения сгенерированных значений натурального логарифма ОА радона; видно, что эта выборка описывается нормальным законом (красная огибающая кривая), а не логнормальным (синяя огибающая кривая). Гипотеза о нормальном характере распределения также подтверждается результатами расчетов критерия Хи-квадрат ($p=0,17$), W-критерия Шапиро-Уилка ($p=0,08$), оценки коэффициентов асимметрии ($p=0,43$) и эксцесса ($p=0,86$): поскольку наименьшее значение $p \geq 0,05$, то с вероятностью 95% данные подчиняются нормальному закону распределения. На основе критерия Колмогорова-Смирнова можно сделать вывод о том, что распределение значений, скорее всего, является нормальным ($p=0,35$) и с вероятностью 95% не является логнормальным ($p=0$).

На рис. 2.1.27, в представлена гистограмма частотного распределения значений ОА радона (в Бк/м³), полученных экспонированием из сгенерированных значений натурального логарифма; явно видно, что эта выборка описывается логнормальным законом (синяя огибающая кривая), а не нормальным (красная огибающая кривая). Гипотеза о нормальном характере распределения в этом случае не подтверждается с вероятностью 95% результатами расчетов критерия Хи-квадрат, W-критерия Шапиро-Уилка, оценки коэффициентов асимметрии и эксцесса: во всех случаях $p=0$. На основе критерия Колмогорова-Смирнова можно сделать вывод о том, что распределение значений, скорее всего, является логнормальным ($p=0,35$) и с вероятностью 95% не является нормальным ($p=0$).

Для идентификации ВЭЗ может применяться модифицированный метод Тьюки [Hoaglin et al., 1987]. Значение Y_i из нормального распределения

считается экстремальным, если оно превышает граничное значение Y_{EV} , определяемое как

$$Y_{EV} = Q_3 + k(Q_3 - Q_1) \quad , \quad (2.1.18)$$

где Q_1 и Q_3 – нижний и верхний квартили распределения соответственно; k – параметр идентификации.

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

В классическом методе Тьюки [Tukey, 1977; Hoaglin et al., 1986] параметр k равен 1,5 для выбросов и 3,0 для экстремальных значений. В модифицированном методе значение параметра k зависит от объема выборки и лежит в диапазоне от 2,1 до 2,4. Классификация большего количества точек как ВЭЗ позволяет сделать правый хвост распределения не таким тяжелым и, тем самым, упростить идентификацию закона распределения, описывающего основную часть значений в выборке.

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

В работе [Кононенко, 2019a] был использован метод визуального анализа Q-Q диаграмм [Cinelli et al., 2015], который позволял оценить соответствие распределения значений ОА радона логнормальному закону как условно «хорошее» или «практически идеальное». В последующем этот метод был модифицирован с целью придания ему большей математической строгости [Маренный и др., 2020]. Анализ массивов данных включает

проверку четырех гипотез с помощью теста Колмогорова-Смирнова (т.н. Goodness-of-Fit test): соответствие или несоответствие распределения значений ОА радона логнормальному и лог-логистическому (т.н. распределение Фиска [McLaughlin, 2016]) законам и соответствие или несоответствие распределения значений натурального логарифма ОА радона нормальному и логистическому законам. Результаты проверки дополняются результатами расчета натурального логарифма функции правдоподобия (т.н. Log-likelihood function), ранжирующими подбираемые распределения по степени соответствия реальным данным.

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

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

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

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

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

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

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

В случае лог-логистического распределения значений ОА радона медиана (которая используется в качестве робастной меры центральной тенденции) определяется как $\exp(\mu_L)$, где μ_L – среднее для соответствующего логистического распределения значений натуральных логарифмов ОА радона (по аналогии с парой нормальное–логнормальное). Стоит отметить, что автоматизация расчета μ_L затруднена, поскольку это значение является параметром кривой, подобранной статистическим пакетом в процессе анализа массивов на соответствие распределений выбранным законам. Чтобы выяснить, обосновано ли в данном случае рассчитывать медиану тем же методом, который используется для логнормального распределения (как $\exp(\mu_N)$, где μ_N – среднее для соответствующего нормального распределения значений натуральных логарифмов ОА радона), в работе [Маренный и др.,

2020] был произведен расчет медианы обоими методами, дополненный расчетом относительной разницы значений медиан. Было получено, что значение медианы, рассчитанное как $\exp(\mu_L)$, в среднем не отличается от значения, рассчитанного как $\exp(\mu_N)$. В соответствии с этим, вне зависимости от результата анализа характера распределения, значение медианы допустимо рассчитывать как $\exp(\mu_N)$.

Если р-значение теста Колмогорова-Смирнова хотя бы для одного массива составляет менее 0,05, то массив с вероятностью 95% не принадлежит соответствующему распределению и является выборкой из смешанного распределения, т.е. составленного из отдельных распределений с существенно отличающимися параметрами [Daraktchieva et al., 2014]. Как правило, такая ситуация складывается при наличии слишком тяжелого правого хвоста распределения, за который ответственны результаты измерений, полученные в зданиях, расположенных на участках территории с существенно более высокой потенциальной радоноопасностью (т.н. «локальное» распределение [Daraktchieva et al., 2014]). Вместе с тем идентификация этих «локальных» распределений, составляющих единое смешанное распределение, может оказаться нетривиальной задачей.

Зачастую устранение нескольких ВЭЗ позволяет «исправить» распределение, после чего статистические тесты не отклоняют нулевую гипотезу [Bossew, 2010; Organo et al., 2007]. При этом, с одной стороны, ряд авторов обращает внимание на то, что исключение ВЭЗ из массива приводит к недооценке доли помещений, в которых может быть превышен некоторый порог ОА радона [Daraktchieva et al., 2014]. А с другой стороны, результаты моделирования, проведенного авторами работы [Murphy et al., 2008], показывают, что исключение ВЭЗ из массива позволяет устранить смещение оценки доли зданий с превышением некоторого порога относительно ее истинного значения. Поэтому важно помнить, что приведение распределения в точное соответствие логнормальному закону не является самоцелью. В

случае, если стратификация исходного массива по какому-либо признаку не позволяет в итоге получить массивы без ВЭЗ, целесообразным может оказаться для оценок медианы и доли помещений или зданий с превышением некоторого порога указывать «вилку» значений: оптимистичный вариант будет рассчитан по массиву с устраненными ВЭЗ, а консервативный – по исходному.

2.1.6.5. Методы обработки результатов, содержащихся в ВБДОПИ

Подход к обработке результатов измерений содержания радона, принятый для ВБДОПИ (в первую очередь, в плане учета неопределенности результатов измерений), несколько отличается от описанного выше, поэтому далее приводится описание некоторых специфических процедур анализа.

Межрегиональные управления (МРУ) ФМБА России в своей работе в основном используют инспекционные методы измерения ОА и ЭРОА радона и в меньшей степени – квазиинтегральные методы. Интегральные методы ввиду малой численности измерений далее не рассматриваются. При обработке результатов измерений используются обобщенные метрологические характеристики, полученные путем анализа паспортных данных средств измерений (см. табл. 2.1.6).

Таблица 2.1.6 – Обобщенные метрологические характеристики методов измерения ОА и ЭРОА радона

Метод измерения	Измеряемый параметр	Диапазон измерений, Бк/м ³		Пределы допускаемой погрешности, %
		Нижняя граница	Верхняя граница	
Инспекционный	ЭРОА Rn	10	$2,0 \cdot 10^4$	±30
	ОА Rn	20	$2,0 \cdot 10^4$	±30
Квазиинтегральный	ОА Rn	10	$1 \cdot 10^5$	±30

Коэффициент радиоактивного равновесия между радоном и его ДПР F_{Rn} принят равным 0,5.

В соответствии с требованиями [МУ 2.6.1.037–2015] определены коэффициенты вариации радона. Для инспекционных методов K_V принят за

1,8, для квазиинтегральных – за 1,6. Неопределенность измерения среднегодовой ЭРОА вычислялась по формуле 2.1.19:

$$U = \sqrt{K_v^2 + U_{СИ}^2}, \quad (2.1.19)$$

где U – расширенная неопределенность среднегодовой ЭРОА;

K_v – коэффициент вариации;

$U_{СИ}$ – неопределенность средства измерений для однократного измерения.

Для обработки результатов измерений МАЭД ГИ принята нижняя граница диапазона измерений 0,1 мкЗв/ч и предел допускаемой погрешности 50% [МУ 2.6.1.2838-11].

Сводные характеристики среднегодовой ЭРОА радона и МАЭД ГИ по различным МРУ вычислены с учетом реальных возможностей методов измерений и соблюдения принципа консервативности. Выполнение этих предпосылок обеспечено цензурированием данных по диапазону измерений метода и учетом расширенной неопределенности.

В качестве исходных данных рассматриваются интервалы охвата результатов измерений в виде $X \pm U$, где X – измеренное значение, U – расширенная неопределенность. В случаях, когда X принадлежит диапазону измерений, значения X и U цензурированию не подвергались. Если X меньше НГДИ, значения X и U принимались за $0,5 \cdot \text{НГДИ}$. На основании значений X и U вычислялись вспомогательные значения X_{min} , X_{max} , $\lg X$, $\lg U$ (формулы 2.1.20–2.1.23):

$$\text{Если } X \leq U: X_{min} = 0$$

$$\text{Если } X > U: X_{min} = X - U \quad (2.1.20)$$

где X_{min} – нижняя граница интервала охвата.

$$\text{Если } X \leq 0: X_{max} = U$$

$$\text{Если } X > 0: X_{max} = X + U \quad (2.1.21)$$

где X_{max} – верхняя граница интервала охвата.

$$\lg X = \log_{10}(X) \quad (2.1.22)$$

где \lg и \log_{10} – символы десятичного логарифма.

$$\begin{aligned} \text{Если } X \leq U: \lg U &= \log_{10}(X_{max}) - \log_{10}(X) \\ \text{Если } X > U: \lg U &= 0,5 \cdot (\log_{10}(X_{max}) - \log_{10}(X_{min})) \end{aligned} \quad (2.1.23)$$

Минимальное и максимальное значение по выборке рассчитывались по формулам 2.1.24–2.1.25:

$$\text{Min}(N) = \text{Min}(X_{min})$$

$\text{Min}(N)$ – минимальное значение по выборке; (2.1.24)

Min – функция минимума.

$$\text{Max}(N) = \text{Max}(X_{max})$$

$\text{Max}(N)$ – максимальное значение по выборке; (2.1.25)

Max – функция максимума.

Средняя арифметическая, ее предельная ошибка и границы доверительного интервала при $P=0,95$ рассчитывались по формулам 2.1.26–2.1.29 в соответствии с требованиями [ГОСТ Р 8.736–2011]:

$$X_{\text{ср.арифм.}} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N}$$

$X_{\text{ср.арифм.}}$ – средняя арифметическая по выборке; (2.1.26)

i – порядковый номер значения в выборке;

X_i – i -тое значение в выборке;

N – объем выборки.

$$U_{\text{ср.арифм.}} = \frac{t \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - X_{\text{ср.арифм.}})^2}{N \cdot (N - 1)} + \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N U_i^2}}{N}}}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - X_{\text{ср.арифм.}})^2}{N \cdot (N - 1)} + \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N U_i^2}}{2\sqrt{3} \cdot N}}} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - X_{\text{ср.арифм.}})^2}{N \cdot (N - 1)} + \frac{\sum_{i=1}^N U_i^2}{12 \cdot N^2}}$$

$U_{\text{ср.арифм.}}$ – предельная ошибка средней арифметической; (2.1.27)

t – коэффициент Стьюдента при $N-1$ степенях свободы и $P=0,95$.

$$X(\text{Min})_{\text{ср.арифм.}} = X_{\text{ср.арифм.}} - U_{\text{ср.арифм.}} \quad (2.1.28)$$

$X(\text{Min})_{\text{ср.арифм.}}$ – нижняя граница средней арифметической.

$$X(\text{Max})_{\text{ср.арифм.}} = X_{\text{ср.арифм.}} + U_{\text{ср.арифм.}} \quad (2.1.29)$$

$X(\text{Max})_{\text{ср.арифм.}}$ – верхняя граница средней арифметической.

Средняя геометрическая, ее предельная ошибка и границы доверительного интервала при $P=0,95$ рассчитывались по формулам 2.1.30–2.1.33:

$$X_{\text{ср.геом.}} = 10^{\frac{\sum_{i=1}^N \lg X_i}{N}} \quad (2.1.30)$$

$X_{\text{ср.геом.}}$ – средняя геометрическая по выборке.

$$\lg U_{\text{ср.геом.}} = \frac{t \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\lg X_i - \lg X_{\text{ср.геом.}})^2}{N \cdot (N-1)}} + \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \lg U_i^2}{N}}}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\lg X_i - \lg X_{\text{ср.геом.}})^2}{N \cdot (N-1)}} + \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N U_i^2}}{2\sqrt{3} \cdot N}}$$

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\lg X_i - \lg X_{\text{ср.геом.}})^2}{N \cdot (N-1)}} + \frac{\sum_{i=1}^N \lg U_i^2}{12 \cdot N^2}$$

$\lg U_{\text{ср.геом.}}$ – десятичный логарифм предельной ошибки средней геометрической. (2.1.31)

$$X(\text{Min})_{\text{ср.геом.}} = 10^{\lg X_{\text{ср.геом.}} - \lg U_{\text{ср.геом.}}} \quad (2.1.32)$$

$X(\text{Min})_{\text{ср.геом.}}$ – нижняя граница средней геометрической.

$$X(\text{Max})_{\text{ср.геом.}} = 10^{\lg X_{\text{ср.геом.}} + \lg U_{\text{ср.геом.}}} \quad (2.1.33)$$

$X(\text{Max})_{\text{ср.геом.}}$ – верхняя граница средней геометрической.

Медиана и границы ее доверительного интервала при $P=0,95$ вычислялись в соответствии с [ГОСТ Р ИСО 16269-7-2004] (формулы 2.1.34–2.1.36):

Если N – четное число: $Med = 0,5 \cdot (X_{i=0,5 \cdot N} + X_{i=0,5 \cdot N+1})$

Если N – нечетное число: $Med = X_{i=0,5 \cdot (N+1)}$

Med – медиана по выборке; (2.1.34)

i – порядковый номер значения в выборке, отсортированной по возрастанию.

$$Med_{min} = X_{min k}$$

Med_{min} – нижняя граница доверительного интервала медианы;

k – параметр, определяемый в соответствии с [ГОСТ Р ИСО 16269-7–2004] и соответствующий номеру значения в совокупности, отсортированной по возрастанию. (2.1.35)

$$Med_{max} = X_{max N-k+1}$$

Med_{max} – верхняя граница доверительного интервала медианы. (2.1.36)

Все вычисленные значения цензурированы по диапазону измерений используемых методов измерений и округлены до двух значащих цифр в соответствии с требованиями [СТ СЭВ 543–77].

Для построения распределений значений ЭРОА радона в воздухе помещений использовались максимально возможные значения X_{max} (с учетом неопределенности измерений). Ширина интервалов значений ЭРОА была выбрана в соответствии с [МР 11-2/206-09].

2.1.6.6. Представление результатов радоновых обследований

Для логнормального распределения мерой центральной тенденции является медиана (среднее геометрическое), выраженная в единицах измеряемой величины, а мерой изменчивости – геометрическое стандартное отклонение (безразмерная величина). Использование в качестве меры центральной тенденции арифметического среднего является некорректным и приводит к необоснованному завышению рассчитываемых на основе среднего значения ОА или ЭРОА радона доз облучения или показателей риска для здоровья населения [Кононенко, 2019a].

Минимально необходимый набор характеристик для описания массива данных, соответствующий рекомендациям Международной комиссии по радиологическим единицам и измерениям (МКРЕ) [ICRU Report No. 88], включает количество значений в массиве, медиану с доверительным интервалом, геометрическое стандартное отклонение, минимальное и максимальное значения, а также в некоторых случаях арифметическое среднее. В зависимости от задачи может оказаться полезным привести не только максимальное значение, но и 0,95-квантиль распределения (или квантиль какого-либо другого уровня – 0,90, 0,975, 0,99 и т.д.).

Для расчета медианы с доверительным интервалом, геометрического стандартного отклонения и, при необходимости, квантилей распределения различного уровня, прежде всего производится логарифмическая трансформация исходных данных, т.е. вычисляется натуральный логарифм каждого значения ОА или ЭРОА X_i в массиве данных по следующей формуле:

$$Y_i = \ln (X_i) \quad (2.1.37)$$

Медиана рассчитывается по следующей формуле:

$$GM = \exp (\mu) \quad , \quad (2.1.38)$$

где μ – среднее арифметическое Y_i , рассчитываемое по следующей формуле:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i \quad , \quad (2.1.39)$$

где n – количество значений в массиве данных.

Геометрическое стандартное отклонение рассчитывается по следующей формуле:

$$GSD = \exp (\sigma) \quad , \quad (2.1.40)$$

где σ – стандартное отклонение Y_i , рассчитываемое по следующей формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \mu)^2} \quad (2.1.41)$$

Границы двустороннего доверительного интервала медианы с уровнем доверия 95% (ДИ95) рассчитываются с использованием следующего выражения:

$$\left(\exp \left(\mu - 1,96 \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right); \exp \left(\mu + 1,96 \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right) \right) \quad (2.1.42)$$

0,95-квантиль распределения рассчитывается по следующей формуле:

$$\hat{X}_{0,95} = \exp(\mu + 1,645 \cdot \sigma) \quad (2.1.43)$$

При необходимости расчета квантиля распределения другого уровня, константа 1,645 должна быть заменена на значение квантиля стандартного нормального распределения нужного уровня.

Среднее значение ОА радона в воздухе помещений – это важный показатель, позволяющий оценить степень «радоновой проблемы» в отдельных регионах, районах или населенных пунктах, но не единственный и, возможно, не самый выразительный. При принятии решений о выделении сил и средств для проведения более масштабных радоновых обследований с целью выявления зданий, в которых требуется осуществление радонозащитных мероприятий, первостепенную роль должна играть доля результатов измерений ОА радона на определенной территории, которая превышает 400 Бк/м³, что можно уверенно трактовать как превышение установленного в России норматива среднегодовой ЭРОА изотопов радона для эксплуатируемых жилых и общественных зданий.

Важно отметить, что расчет этого показателя, выполненный на основе результатов уже проведенных обследований (обозначим его d_{400+}), далеко не всегда отражает реальную ситуацию на обследуемой территории, т.к. это тесно связано с вопросом методически правильного формирования случайной и представительной выборки зданий [МР 11-2/206-09]. Практика проведения радоновых обследований в России показывает, что территориальное распределение точек измерения носит, как правило, псевдослучайный характер, когда к установке детекторов привлекаются

сотрудники дружественных организаций, либо детекторы располагаются во всех зданиях определенного назначения (например, дошкольных и школьных образовательных учреждениях [Романович и др., 2017; Кормановская и др., 2021]) на обследуемой территории, и по умолчанию принимается, что их количество и расположение отражает в определенной мере территориальное распределение численности населения. В этом случае в выборке может оказаться как неадекватно много зданий с высоким содержанием радона в воздухе, так и неадекватно мало.

Альтернативой расчету d_{400+} является определение ожидаемой доли значений ОА радона выше 400 Бк/м^3 (обозначим ее P_{400+}) на основе полученного нормального распределения значений натурального логарифма ОА радона [Маренный и др., 2020]. С помощью метода стандартизации (т.н. z-преобразования) распределение приводится к стандартному нормальному ($\mu=0$, $\sigma=1$), рассчитывается z-значение, соответствующее ОА радона 400 Бк/м^3 , и далее определяется вероятность того, что ОА радона превысит этот порог (т.е., фактически, площадь под правым хвостом кривой функции плотности вероятности). Ожидаемая доля P_{400+} никогда не может быть равна нулю в силу своего вероятностного характера. Очевидно, что разница между ожидаемой долей P_{400+} и полученной в конкретной выборке долей d_{400+} может быть как положительной (в том случае, когда в выборку попало недостаточно зданий с высоким содержанием радона в воздухе), так и отрицательной (в том случае, когда в выборку попало слишком много таких зданий). Близкая к нулю разница между P_{400+} и d_{400+} будет свидетельствовать о том, что в ходе обследования были сформированы достаточно случайные и представительные выборки зданий.

2.1.6.7. Оценка доз внутреннего облучения изотопами радона и их ДПР

Согласно современным научным представлениям [UNSCEAR, 2000; UNSCEAR, 2009], эффективная доза облучения человека за счет ингаляционного поступления изотопов радона складывается из двух составляющих: доза за счет ДПР на легкие $E_{int,L}$ и доза, получаемая за счет растворения газообразных радона и торона в крови и дальнейшего облучения других тканей и органов, кроме легких $E_{int,B}$.

Для расчета первой части дозы используется следующее выражение:

$$E_{int,L} = \bar{C} \cdot T \cdot d_L, \text{ мЗв}, \quad (2.1.44)$$

где \bar{C} – среднее значение ЭРОА изотопа радона, Бк/м³;

T – длительность облучения, ч;

d_L – дозовый коэффициент, мЗв/(Бк·ч/м³).

Для ДПР радона и торона на данный момент доступен ряд значений дозовых коэффициентов, приведенных в публикациях различных международных научных организаций и предназначенных для использования при разных условиях облучения (см. табл. 2.1.7).

Таблица 2.1.7 – Различные дозовые коэффициенты для ДПР изотопов радона

Дозовый коэффициент d_L , мЗв/(Бк·ч/м ³)	Условия
<i>ДПР радона</i>	
$7,8 \cdot 10^{-6}$	Производственное облучение (Публикация 65 МКРЗ, 1993 г. [Рекомендации МКРЗ, 1995; ICRP, 1993])
$9,0 \cdot 10^{-6}$	Все случаи (Отчет НКДАР ООН 2000 г. [UNSCEAR, 2000] и 2006 г. [UNSCEAR, 2009])
$17 \cdot 10^{-6}$	Производственное облучение в зданиях и шахтах (Публикация 137 МКРЗ, 2017 г. [ICRP, 2017])
$33 \cdot 10^{-6}$	Производственное облучение на рабочих местах, где выполняется тяжелая работа (Публикация 137 МКРЗ, 2017 г. [ICRP, 2017])
<i>ДПР торона</i>	
$40 \cdot 10^{-6}$	Все случаи (Отчет НКДАР ООН 2000 г. [UNSCEAR, 2000] и 2006 г. [UNSCEAR, 2009])

Дозовый коэффициент d_L , мЗв/(Бк·ч/м ³)	Условия
$114 \cdot 10^{-6}$	Производственное облучение (Публикация 137 МКРЗ, 2017 г. [ICRP, 2017])

Для расчета второй части дозы используется следующее выражение:

$$E_{int,B} = \bar{A} \cdot T \cdot d_B, \text{ мЗв}, \quad (2.1.45)$$

где \bar{A} – среднее значение ОА изотопа радона, Бк/м³;

T – длительность облучения, ч;

d_B – дозовый коэффициент, мЗв/(Бк·ч/м³) (см. табл. 2.1.8).

Таблица 2.1.8 – Дозовые коэффициенты для газообразных изотопов радона (Отчет НКДАР ООН 2000 г. [UNSCEAR, 2000] и 2006 г. [UNSCEAR, 2009])

Дозовый коэффициент d_B , мЗв/(Бк·ч/м ³)	Изотоп
$0,17 \cdot 10^{-6}$	Радон
$0,11 \cdot 10^{-6}$	Торон

В целом, доза, получаемая за счет растворения газообразных радона и торона в крови и дальнейшего облучения других тканей и органов, кроме легких $E_{int,B}$ составляет около 5% от дозы за счет ДПР на легкие $E_{int,L}$ (4,7%, если быть точным), поэтому часто в литературе и российских нормативно-методических документах можно встретить единую формулу для расчета эффективной дозы внутреннего облучения радоном и его ДПР E_{int} , в которую введен коэффициент 1,05 (см., например, [МУ 2.6.1.1088-02; МР 2.6.1.0088-14]) или дозовый коэффициент d_L принят равным $9,45 \cdot 10^{-6}$ (см., например, [МУ 2.6.1.2397-08]):

$$E_{int} = 1,05 \cdot \bar{C} \cdot T \cdot d_L, \text{ мЗв} \quad (2.1.46)$$

Доза за счет внутреннего облучения торона и его ДПР в российских нормативно-методических документах отдельно, как правило, не фигурирует. Ее учет обеспечивается использованием в качестве нормируемой такой величины как среднегодовая ЭРОА изотопов радона, рассчитываемой как

$E_{\text{РОА}_{\text{Rn}}} + 4,6 \cdot E_{\text{РОА}_{\text{Tn}}}$, в которой коэффициент 4,6 как раз и представляет собой соотношение дозовых коэффициентов для торона и радона и их ДПР.

При оценке индивидуальной среднегодовой дозы внутреннего облучения изотопами радона и их ДПР (см., например, [МУ 2.6.1.1088-02; МР 2.6.1.0088-14]) $E_{\text{int,CG}}$ учитывается среднегодовая ЭРОА изотопов радона не только в воздухе помещений зданий, но и в приземном слое атмосферного воздуха на открытой территории населенных пунктов, а также доли времени нахождения людей в помещениях и на открытой местности:

$$E_{\text{int,CG}} = 1,05 \cdot T \cdot d_L \cdot (\bar{C}_{\text{зд}} \cdot \Omega_{\text{зд}} + \bar{C}_{\text{ул}} \cdot \Omega_{\text{ул}}) \quad , \text{ мЗв}, \quad (2.1.47)$$

где $\bar{C}_{\text{зд}}$ – среднегодовая ЭРОА изотопов радона в воздухе зданий, Бк/м³;

$\bar{C}_{\text{ул}}$ – среднегодовая ЭРОА изотопов радона в атмосферном воздухе на открытой местности, Бк/м³;

$\Omega_{\text{зд}}$ – доля времени нахождения людей в помещениях, отн. ед. (для населения РФ принимается равной 0,8 [МУ 2.6.1.1088-02; МР 2.6.1.0088-14]);

$\Omega_{\text{ул}}$ – доля времени нахождения людей на открытой местности, отн. ед. (для населения РФ принимается равной 0,2 [МУ 2.6.1.1088-02; МР 2.6.1.0088-14]).

Продолжительность времени облучения в ряде методических документов [МУ 2.6.1.1088-02; МР 2.6.1.0088-14; МУ 2.6.1.2397-08; МР 2.6.1.0145-19] установлена равной «стандартной продолжительности» 8800 ч/год, хотя фактически она составляет 8766 ч/год (продолжительность года принимается равной 365,25 суткам для учета високосных годов) [МР 2.6.1.0172-20]. НКДАР ООН в своих оценках доз [UNSCEAR, 1993; UNSCEAR, 2000] использовал значение 8760 ч/год, т.е. без учета високосных годов.

В идеальном случае вместо единого слагаемого $\bar{C}_{\text{зд}} \cdot \Omega_{\text{зд}}$ следует использовать три, первое из которых ($\bar{C}_{\text{зд,Ж}} \cdot \Omega_{\text{зд,Ж}}$) будет относиться к жилым зданиям, второе – к общественным ($\bar{C}_{\text{зд,О}} \cdot \Omega_{\text{зд,О}}$), а третье – к

производственным ($\bar{C}_{зд,П} \cdot \Omega_{зд,П}$), в зависимости от реального поведения группы населения, для которой производится расчет дозы. В этом случае сумма долей $\Omega_{зд,Ж} + \Omega_{зд,О} + \Omega_{зд,П}$ должна равняться 0,8.

Что касается среднегодовой ЭРОА изотопов радона в приземном слое атмосферного воздуха на открытой местности $\bar{C}_{ул}$, то в случае отсутствия реальных измерительных данных в конкретном регионе, районе или населенном пункте можно воспользоваться данными НКДАР ООН [UNSCEAR, 1993; UNSCEAR, 2000], согласно которым среднемировое значение ЭРОА радона в атмосферном воздухе составляет 6 Бк/м³ (ОА радона равна 10 Бк/м³, а коэффициент равновесия равен 0,6), среднемировое значение ЭРОА торона составляет 0,1 Бк/м³ (ОА торона равна 10 Бк/м³, а коэффициент равновесия равен 0,01). Таким образом, ЭРОА изотопов радона (ЭРОА_{Rn}+4,6·ЭРОА_{Tn}) будет равна 6,5 Бк/м³ – именно это значение и приводится в методических документах [МУ 2.6.1.1088-02; МР 2.6.1.0088-14]. В качестве альтернативы можно воспользоваться отечественными данными (см. подраздел 2.1.6.3), однако в рамках этих исследований измерения ОА и ЭРОА торона не проводились.

В случае, если для расчета значения среднегодовой ЭРОА радона в воздухе помещений зданий используются результаты серии интегральных измерений, охватывавшей целый год (по месяцам, кварталам или сезонам), то значение рассчитывается как среднее арифметическое полученных результатов. Однако, если в течение года было проведено всего два измерения, одно в теплый период, а другое – в холодный, то значение среднегодовой ЭРОА радона \bar{C} необходимо рассчитывать как средневзвешенное по долям года, приходящимся на эти периоды:

$$\bar{C} = C_{ТП} \cdot t_{ТП} + C_{ХП} \cdot t_{ХП}, \text{ Бк/м}^3, \quad (2.1.48)$$

где $C_{ТП}$ – ЭРОА радона в теплый период года, Бк/м³;

$C_{ХП}$ – ЭРОА радона в холодный период года, Бк/м³;

$t_{ТП}$ – доля года, приходящаяся на теплый период, отн. ед.;

$t_{ХП}$ – доля года, приходящаяся на холодный период, отн. ед.

При этом сумма долей $t_{ТП}+t_{ХП}$ должна равняться 1.

Строго говоря, исходя из сути физических процессов, определяющих поступление радона с грунтовым или наружным воздухом в помещения зданий, значение имеет разделение на отопительный и неотопительный периоды года, поскольку в разных субъектах РФ в зависимости от климата и конкретных погодных условий холодный и теплый периоды года наступают в разное время и не связаны напрямую с условным календарным делением года на сезоны. При этом начало и окончание отопительного периода в конкретном населенном пункте определяется соответствующими органами исполнительной власти по фактической погоде на основе установленных критериев, поэтому по сути отражает наступление холодного и теплого периодов года, соответственно. При этом состояние системы отопления в конкретном обследуемом здании значения не имеет. Следует отметить, что в тексте п. 6.5 методических указаний [МУ 2.6.1.2838-11], определяющего порядок расчета оценки среднегодового значения ЭРОА изотопов радона в воздухе здания по результатам экспрессных измерений, использована недостаточно корректная формулировка. Вместо «До получения функциональной зависимости значение коэффициента принимается равным 1 для зимнего периода года и 1,3 – для летнего» следует читать: «До получения функциональной зависимости значение коэффициента принимается равным 1,0 для отопительного периода года и 1,3 – для неотопительного».

Эффективная доза облучения человека, обусловленная присутствием радона в питьевой воде, также складывается из двух составляющих: доза за счет ДПР на легкие при водопользовании $E_{Rn,w,inh}$ и доза за счет перорального поступления радона с водой $E_{Rn,w,ing}$ [UNSCEAR, 2000; UNSCEAR, 2009]. Следует отметить, что критическим путем облучения людей за счет ^{222}Rn , содержащегося в питьевой воде, является переход радона в воздух помещения и последующее ингаляционное поступление ДПР в организм.

Уровень вмешательства для ^{222}Rn в питьевой воде в РФ составляет 60 Бк/кг [СанПиН 2.6.1.2523-09; СанПиН 2.6.1.2800-10].

Для расчета первой части дозы используется следующее выражение:

$$E_{Rn,w,inh} = A_{Rn} \cdot F_{Rn} \cdot T \cdot d_L \cdot 10^{-1}, \text{ мЗв}, \quad (2.1.49)$$

где A_{Rn} – среднее значение удельной активности (УА) радона в воде, Бк/л;

F_{Rn} – коэффициент равновесия между радоном и его ДПР;

T – длительность облучения, ч;

d_L – дозовый коэффициент, мЗв/(Бк·ч/м³);

10^{-1} – коэффициент перехода от УА в воде (Бк/л) к ОА в воздухе (Бк/м³).

Как правило, значение дозового коэффициента d_L принимается равным $9,0 \cdot 10^{-6}$, согласно отчетам НКДАР ООН 2000 г. [UNSCEAR, 2000] и 2006 г. [UNSCEAR, 2009].

Для расчета второй части дозы используется следующее выражение:

$$E_{Rn,w,ing} = A_{Rn} \cdot 60 \cdot d_{ing}, \text{ мЗв}, \quad (2.1.50)$$

где A_{Rn} – среднее значение УА радона в воде, Бк/л;

60 – средневзвешенное потребление воды из-под крана, л/год

(младенцы – 100 л, дети – 75 л, взрослые – 50 л [UNSCEAR, 1993; UNSCEAR, 2000]);

d_{ing} – дозовый коэффициент для случая перорального поступления, мЗв/Бк, принимаемый равным $3,5 \cdot 10^{-6}$, согласно отчетам НКДАР ООН 2000 г. [UNSCEAR, 2000] и 2006 г. [UNSCEAR, 2009].

В целом, доза за счет перорального поступления радона с водой $E_{Rn,w,ing}$ составляет около 8% от дозы за счет ДПР на легкие при водопользовании $E_{Rn,w,inh}$ (8,3%, если быть точным), поэтому расчет эффективной дозы, обусловленной присутствием радона в питьевой воде $E_{Rn,w}$, можно свести в следующую единую формулу:

$$E_{Rn,w} = 1,08 \cdot A_{Rn} \cdot F_{Rn} \cdot T \cdot d_L \cdot 10^{-1}, \text{ мЗв} \quad (2.1.51)$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Березина Е.В., Еланский Н.Ф. Концентрация ^{222}Rn в приземном слое атмосферы над континентальной территорией России по наблюдениям в экспериментах TROICA // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2009. – Т. 45, № 6. – С. 809–822.
- Болтнева Л.И., Ионов В.А., Назаров И.М., Сисигина Т.И. Пространственное распределение радона-222 над территорией СССР // Труды Ордена Трудового Красного Знамени Института прикладной геофизики. Выпуск 43. Фоновая радиоактивность почв и горных пород на территории СССР. – М.: Московское отделение Гидрометеоздата, 1980. – С. 56–69.
- ВМУ 1Р1-97. Определение плотности потока радона на участке застройки. – М., 1997.
- ГК РЭИ. Комплект аппаратуры «ТРЕК-РЭИ-1М» для измерений средней объемной активности радона в воздухе трековым методом. – URL: <https://gruppa-rei.ru/page/159>
- ГОСТ 8.638–2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение радиационного контроля. Основные положения : межгосударственный стандарт. – М.: Стандартинформ, 2014. – 11 с.
- ГОСТ И ИСО 16269-7–2004. Статистическое представление данных. Медиана. Определение точечной оценки и доверительных интервалов : национальный стандарт Российской Федерации. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 12 с.
- ГОСТ Р 54500.3–2011/Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008. Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения : национальный стандарт Российской Федерации. – М.: Стандартинформ, 2012. – 101 с.
- ГОСТ Р 8.736–2011. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов. Основные положения : национальный стандарт Российской Федерации. – М.: Стандартинформ, 2019. – 20 с.
- ГОСТ Р 8.820–2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение. Основные положения : национальный стандарт Российской Федерации. – М.: Стандартинформ, 2014. – 8 с.
- Дубнер П.Н. Англо-русский статистический глоссарий: основные понятия. – 2002. – URL: <https://masters.donntu.ru/2002/fvti/spivak/library/book2/book2.htm>
- Киселев С.М., Жуковский М.В., Стамат И.П., Ярмошенко И.В. Радон. От фундаментальных исследований к практике регулирования. – М.: Изд-во

«ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России», 2016. – 432 с. – ISBN 978-5-905926-11-2.

- Киселев С.М., Маренный А.М., Старинский В.Г., Бельских Ю.С., Шлыгин В.В., Коренков И.П., Нефедов Н.А., Маренный М.А. Оценка качества измерений объемной активности радона в воздухе помещений. Результаты международных сличительных испытаний // Радиационная гигиена. – 2020. – Т. 13, № 4. – С. 82–92. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2020-13-4-82-92>
- Кононенко Д.В. Анализ распределений значений объемной активности радона в воздухе помещений в субъектах Российской Федерации // Радиационная гигиена. – 2019. – Т. 12, № 1. – С. 85–103. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-1-85-103>
- Кононенко Д.В. Использование метода бета-подстановки для анализа цензурированных данных об объемной активности радона в воздухе помещений // Радиационная гигиена. – 2019. – Т. 12, № 4. – С. 47–55. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-4-47-55>
- Кононенко Д.В. Системный подход к анализу массивов данных с результатами радоновых обследований // VIII Съезд по радиационным исследованиям, Москва, 12-15 октября 2021 г. : тезисы докладов. – Дубна: ОИЯИ, 2021. – С. 393. – ISBN 978-5-95300561-6.
- Кононенко Д.В., Кормановская Т.А. Типичные ошибки операторов при внесении результатов измерений содержания радона в воздухе помещений в банк данных лабораторий радиационного контроля «ФФ-4» // Актуальные вопросы радиационной гигиены : материалы международной научно-практической конференции (Санкт-Петербург, 23-24 октября 2018 г.). – СПб., 2018. – С. 176–178.
- Кормановская Т.А. Сравнительный анализ российских и международных подходов к вопросам обеспечения радиационной безопасности при облучении природными источниками излучения // Радиационная гигиена. – 2022. – Т. 15, № 3. – С. 40–49. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2022-15-3-40-49>
- Кормановская Т.А., Историк О.А., Романович И.К., Еремина Л.А., Королева Н.А., Балабина Т.А., Кононенко Д.В., Кокоулина Е.С., Васильев А.С. Исследование уровней содержания радона в воздухе помещений зданий детских учреждений // Радиационная гигиена. – 2021. – Т. 14, № 2. – С. 6–20. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2021-14-2-6-20>
- Крисюк Э.М. Радиационный фон помещений. – М. Энергоатомиздат, 1989. – 120 с. – ISBN 5-283-02992-1.
- Кузнецов Ю.В., Ярына В.П. Проблема достоверности измерений плотности потока радона // АНРИ. – 2001. – № 4 (27). – С. 26–29.

- Маренный А.М. Методические аспекты измерений средней объемной активности радона в помещениях интегральным трековым методом // АНРИ. – 2012. – № 4 (71). – С. 13–19.
- Маренный А.М. Проблема облучения населения от природных источников ионизирующих излучений // Инф. бюлл. «Ядерная и радиационная безопасность России». – 2002. – Вып. 2 (5). – С. 36–63.
- Маренный А.М., Антропов С.Ю., Карл Л.Э., Щитов Д.В., Сидякин П.А., Мурзабеков М.А. Система мотивированного сбора информации о содержании радона в помещениях с участием населения // Радиационная гигиена. – 2022. – Т. 15, № 1. – С. 96–103. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2022-15-1-96-103>
- Маренный А.М., Кононенко Д.В., Труфанова А.Е. Радоновое обследование в Челябинской области в 2008–2011 гг. Анализ территориальной вариабельности объемной активности радона // Радиационная гигиена. – 2020. – Т. 13, № 3. – С. 51–67. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2020-13-3-51-67>
- 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.
- МВИ 2.6.1.003-99. Радон. Измерение объемной активности интегральным трековым методом в производственных, жилых и общественных помещениях. Аттестована ЦМПИ ГП «ВНИИФТРИ» Госстандарта РФ, свидетельство № 45090.84769 от 08.12.1998.
- Методика измерений. Радон. Измерение объемной активности в воздухе помещений интегральным трековым методом. Аттестована ФГУП ВНИИФТРИ, свидетельство № 40090.2И385 от 15.07.2012.
- Методика измерения объемной активности радона в воздухе жилых и служебных помещений, а также в рудниках всех типов, путем отбора пробы воздуха. Разработана ЗАО НТЦ «НИТОН». Аттестована ФГУП ВНИИФТРИ, свидетельство № 40090.6К815 от 02.06.2006.
- 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.
- Методика измерений содержания радия и радона в природных водах. Разработана ЗАО НТЦ «НИТОН». Аттестована ФГУП ВНИИФТРИ, свидетельство № 40090.6К818 от 02.06.2006.
- Методика измерения средней за время экспозиции объемной активности радона в воздухе жилых и служебных помещений. Разработана ЗАО НТЦ «НИТОН». Аттестована ФГУП ВНИИФТРИ, свидетельство № 40090.6К817 от 02.06.2006.

- Методика измерения суммарной альфа- и суммарной бета-активности радионуклидов в толстослойных счетных образцах с использованием альфа- бета-радиометра РКС-01А «Абелия». Разработана ООО «НТЦ Амплитуда». Аттестована ФГУП «ВНИИФТРИ», свидетельство № RA.RU.311243-2018/400.154 от 15.06.2018.
- Методические рекомендации по санитарному контролю за содержанием радиоактивных веществ в объектах внешней среды / сост. А.Н. Марей [и др.] – М.: Министерство здравоохранения СССР, 1980. – 336 с.
- Микляев П.С. Научные основы оценки потенциальной радоноопасности платформенных территорий : дисс. ... докт. геол.-мин. наук. – М., 2015. – 307 с.
- МР 11-2/206-09. Выборочное обследование жилых зданий для оценки доз облучения населения : методические рекомендации. Утверждены заместителем Главного государственного санитарного врача Российской Федерации 29.08.2000 г.
- МР 2.6.1.0088-14. Форма федерального статистического наблюдения № 4-ДОЗ. Сведения о дозах облучения населения за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона : методические рекомендации. – М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2014. – 39 с.
- МР 2.6.1.0145-19. Расчет показателей радиационного риска по данным, содержащимся в радиационно-гигиенических паспортах территорий для обеспечения комплексной сравнительной оценки состояния радиационной безопасности населения субъектов Российской Федерации : методические рекомендации. – М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2019. – 14 с.
- МР 2.6.1.0172-20. Оценка радиационного риска для здоровья населения за счет внутреннего облучения радоном и его дочерними продуктами распада : методические рекомендации. – М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2020. – 24 с.
- МУ 2.6.1.037–2015. Определение среднегодовых значений ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений по результатам измерений разной длительности : методические указания. – М.: ФМБА России, 2016. – 48 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 2.6.1.1088-02. Оценка индивидуальных эффективных доз облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения :

- методические указания. – М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2002. – 22 с.
- МУ 2.6.1.2397-08. Оценка доз облучения групп населения, подвергающихся повышенному облучению за счет природных источников ионизирующего излучения : методические указания. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2008. – 18 с.
- 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.
- МУ 2.6.1.2838-11. Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка жилых, общественных и производственных зданий и сооружений после окончания их строительства, капитального ремонта, реконструкции по показателям радиационной безопасности : методические указания. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2011. – 26 с.
- МУ 2.6.5.062–2017. Углубленное обследование объектов с высокими уровнями содержания радона в помещениях : методические указания. – М.: ФМБА России, 2017. – 65 с.
- Николаев В.А. Твердотельные трековые детекторы в радиационных исследованиях. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 283 с. – ISBN 978-5-7422-3530-9.
- НТЦ «Нитон». Комплекс измерительный для мониторинга радона «КАМЕРА-01». – URL: http://www.niton.su/index.php?option=com_content&task=view&id=8&Itemid=37
- ООО «НТМ-Защита». Комплекс измерительный для мониторинга радона, торона и их дочерних продуктов «Альфарад плюс» Руководство по эксплуатации БВЕК 590000.001 РЭ. – URL: https://ntm.ru/UserFiles/File/document/ION/Aplus/Alpharad_manual.pdf
- Павлов И.В., Покровский С.С., Камнев Е.Н. Способы обеспечения радиационной безопасности при разведке и добыче урановых руд. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 256 с.
- Патент на изобретение № 2769336, с приоритетом от 30.08.2021. Способ получения нитроцеллюлозного детектора альфа-частиц.
- Рекомендации МКРЗ. Защита от радона-222 в жилых зданиях и на рабочих местах. Публикация 65 МКРЗ / пер. с англ. М.В. Жуковского ; под ред. А.В. Кружалова. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 78 с.

- РМГ 29-2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения : рекомендации по межгосударственной стандартизации. – М.: Стандартинформ, 2014. – 56 с.
- Романович И.К., Стамат И.П., Кормановская Т.А., Балабина Т.А., Королева Н.А., Историк О.А., Еремина Л.А. Результаты выборочного исследования содержания радона в помещениях детских дошкольных и школьных организаций Ленинградской области // Здоровье населения и среда обитания. – 2017. – № 10 (295). – С. 46–49.
- 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.
- СанПиН 2.6.1.2800-10. Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения : санитарные правила и нормативы. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2011. – 40 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.
- СТ СЭВ 543–77. Числа. Правила записи и округления : стандарт Совета экономической взаимопомощи : утвержден Постоянной Комиссией по стандартизации, Улан-Батор, июнь 1977. – 4 с.
- ФГИС «АРШИН». Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. Утвержденные типы средств измерений. – URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4>
- Яковлева В.С. Методы определения объемной активности изотопов радона и продуктов распада в воздухе: учебное пособие. – Томск: ТПУ, 2010. – 119 с.
- Andersen C.E., Ulbak K., Damkjaer A., Kirkegaard P., Gravesen P. Mapping indoor radon-222 in Denmark: design and test of the statistical model used in the second nationwide survey // Science of the Total Environment. – 2001. – Vol. 272, nr 1-3. – P. 231–241. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(01\)00697-0](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)00697-0)
- Antignani S., Venoso G., Carpentieri C., Bochicchio F. Analytical method for evaluating (and correcting) the impact of outdoor radon concentration // Journal of Environmental Radioactivity. – 2019. – Vol. 196. – P. 264–267. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.12.021>

- Barry T.M., Brattin W.J. Distribution of Radon-222 In Community Groundwater Systems: Analysis of Type I Left-Censored Data with Single Censoring Point // *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*. – 1998. – Vol. 4, nr 2. – P. 579–603. <https://doi.org/10.1080/10807039891284424>
- Bossew P. Radon: exploring the log-normal mystery // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2010. – Vol. 101, nr 10. – P. 826–834. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2010.05.005>
- Burmester D.E., Wilson A.M. Fitting second-order finite mixture models to data with many censored values using maximum likelihood estimation // *Risk Analysis*. – 2000. – Vol. 20, nr 2. – P. 261–271. <https://doi.org/10.1111/0272-4332.202025>
- Busschaert P., Geeraerd A.H., Uyttendaele M., Van Impe J.F. Hierarchical Bayesian analysis of censored microbiological contamination data for use in risk assessment and mitigation // *Food Microbiology*. – 2011. – Vol. 28, nr 4. – P. 712–719. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2010.06.006>
- Cinelli G., Tondeur F. Log-normality of indoor radon data in the Walloon region of Belgium // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2015. – Vol. 143. – P. 100–109. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.02.014>
- Daraktchieva Z., Miles J.C., McColl N. Radon, the lognormal distribution and deviation from it // *Journal of Radiological Protection*. – 2014. – Vol. 34, nr 1. – P. 183–190. <https://doi.org/10.1088/0952-4746/34/1/183>
- EFSA (European Food Safety Authority). Management of left-censored data in dietary exposure assessment of chemical substances. Scientific report of EFSA // *EFSA Journal*. – 2010. – Vol. 8, nr 3. – P. 1557–1653.
- Embrechts P., Klüppelberg C., Mikosch T. *Modelling Extremal Events for Insurance and Finance*. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1997. – 648 p. – ISBN 978-3-642-33483-2.
- Finkelstein M.M., Verma D.K. Exposure estimation in the presence of nondetectable values: another look // *American Industrial Hygiene Association Journal*. – 2001. – Vol. 62, nr 2. – P. 195–198. <https://doi.org/10.1080/15298660108984622>
- Ganser G.H., Hewett P. An accurate substitution method for analyzing censored data // *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. – 2010. – Vol. 7, nr 4. – P. 233–244. <https://doi.org/10.1080/15459621003609713>
- GEMS/Food-EURO Second Workshop on Reliable Evaluation of Low-Level Contamination of Food. Report on a Workshop in the Frame of GEMS/Food-EURO (with Addendum, January 2013); 1995 May 26-27; Kulmbach, Federal Republic of Germany. – 10 p.
- Glass D.C., Gray C.N. Estimating mean exposures from censored data: exposure to benzene in the Australian petroleum industry // *The Annals of Occupational*

- Hygiene. – 2001. – Vol. 45, nr 4. – P. 275–282.
<https://doi.org/10.1093/annhyg/45.4.275>
- Gunby J.A., Darby S.C., Miles J.C., Green B.M., Cox D.R. Factors affecting indoor radon concentrations in the United Kingdom // Health Physics. – 1993. – Vol. 64, nr 1. – P. 2–12. <https://doi.org/10.1097/00004032-199301000-00001>
- Hattis D.B., Burmaster D.E. Assessment of variability and uncertainty distributions for practical risk assessments // Risk Analysis. – 1994. – Vol. 14, nr 5. – P. 713–730. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.1994.tb00282.x>
- Hecht H., Honikel K.O. Assessment of data sets containing a considerable number of values below the detection limits // Z Lebensm Unters Forsch. – 1995. – Vol. 201, nr 6. – P. 592–597.
- Hewett P., Ganser G.H. A comparison of several methods for analyzing censored data // The Annals of Occupational Hygiene. – 2007. – Vol. 51, nr 7. – P. 611–632. <https://doi.org/10.1093/annhyg/mem045>
- Hoaglin D.C., Iglewicz B. Fine-Tuning Some Resistant Rules for Outlier Labeling // Journal of the American Statistical Association. – 1987. – Vol. 82, nr 400. – P. 1147–1149. <https://doi.org/10.1080/01621459.1987.10478551>
- Hoaglin D.C., Iglewicz B., Tukey J.W. Performance of Some Resistant Rules for Outlier Labeling // Journal of the American Statistical Association. – 1986. – Vol. 81, nr 396. – P. 991–999. <https://doi.org/10.1080/01621459.1986.10478363>
- Hornung R.W., Reed L.D. Estimation of average concentration in the presence of nondetectable values // Applied Occupational and Environmental Hygiene. – 1990. – Vol. 5, nr 1. – P. 46–51. <https://doi.org/10.1080/1047322X.1990.10389587>
- Hunter N., Muirhead C.R., Miles J.C.H. Two error components model for measurement error: application to radon in homes // Journal of Environmental Radioactivity. – 2011. – Vol. 102, nr 9. – P. 799–805. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2011.05.009>
- Huynh T., Quick H., Ramachandran G., Banerjee S., Stenzel M., Sandler D.P., Engel L.S., Kwok R.K., Blair A., Stewart P.A. A Comparison of the β -substitution method and a Bayesian method for analyzing left-censored data // The Annals of Occupational Hygiene. – 2016. – Vol. 60, nr 1. – P. 56–73. <https://doi.org/10.1093/annhyg/mev049>
- Huynh T., Ramachandran G., Banerjee S., Monteiro J., Stenzel M., Sandler D.P., Engel L.S., Kwok R.K., Blair A., Stewart P.A. Comparison of methods for analyzing left-censored occupational exposure data // The Annals of Occupational Hygiene. – 2014. – Vol. 58, nr 9. – P. 1126–1142. <https://doi.org/10.1093/annhyg/meu067>

- IAEA/AQ/33. National and Regional Surveys of Radon Concentration in Dwellings. Review of Methodology and Measurement Techniques. IAEA Analytical Quality in Nuclear Applications Series No. 33. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2013. – 35 p.
- ICRP. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3. ICRP Publication 137. Ann. ICRP 46 (3/4). – 2017. – 486 p. – ISBN 978-1-5264-4016-7.
- ICRP. Protection against Radon-222 at Home and at Work. ICRP Publication 65. Ann. ICRP 23 (2). – Pergamon Press, 1993. – 45 p. – ISBN 0-08-042475-9.
- ICRU Report No. 88. Measurement and reporting of radon exposures // Journal of the ICRU 12 (2). – Oxford University Press, 2012. – 191 p.
- Israel G.D. Determining Sample Size (PEOD6). – University of Florida, IFAS Extension, 2013. – 5 p.
- JCGM 200:2012. International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM). 3rd Edition. 2008 version with minor corrections. – JCGM, 2012. – 91 p.
- Kies A., Feider M., Biell A., Rowlinson L. Radon survey in the Grand-Duchy of Luxembourg. Indoor measurements related to house features, soil, geology and environment // Environment International. – 1996. – Vol. 22, suppl. 1. – P. 805–808. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(96\)00187-0](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(96)00187-0)
- Limpert E., Stahel W.A., Abbt M. Log-Normal Distributions Across the Sciences: Keys and Clues // BioScience. – 2001. – Vol. 51, nr 5. – P. 341–352. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2001\)051\[0341:LNDATS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0341:LNDATS]2.0.CO;2)
- McLaughlin M.P. Compendium of Common Probability Distributions. Second Edition, v2.7. – 2016. – 128 p. – URL: https://www.causascientia.org/math_stat/Dists/Compendium.pdf
- Miles J. Use of a model dataset to test methods for mapping radon potential // Radiation Protection Dosimetry. – 2002. – Vol. 98, nr 2. – P. 211–218. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a006711>
- Murphy P., Organo C. A comparative study of lognormal, gamma and beta modelling in radon mapping with recommendations regarding bias, sample sizes and the treatment of outliers // Journal of Radiological Protection. – 2008. – Vol. 28, nr 3. – P. 293–302. <https://doi.org/10.1088/0952-4746/28/3/001>
- Nazaroff W.W., Nero A.V. Radon and its decay products in indoor air. – New York: John Wiley & Sons, 1988. – P. 149.
- Organo C., Murphy P. The Castleisland Radon Survey – follow-up to the discovery of a house with extremely high radon concentrations in County Kerry (SW Ireland) // Journal of Radiological Protection. – 2007. – Vol. 27, nr 3. – P. 275–285. <https://doi.org/10.1088/0952-4746/27/3/002>

- Ott W.R. A physical explanation of the lognormality of pollutant concentrations // Journal of the Air & Waste Management Association. – 1990. – Vol. 40, nr 10. – P. 1378–1383. <https://doi.org/10.1080/10473289.1990.10466789>
- Paulo M.J., van der Voet H., Jansen M.J., ter Braak C.J., van Klaveren J.D. Risk assessment of dietary exposure to pesticides using a Bayesian method // Pest Management Science. – 2005. – Vol. 61, nr 8. – P. 759–766. <https://doi.org/10.1002/ps.1060>
- Perkins J.L., Cutter G.N., Cleveland M.S. Estimating the mean, variance, and confidence limits from censored (<Limit of Detection), lognormally distributed exposure data // American Industrial Hygiene Association Journal. – 1990. – Vol. 51, nr 8. – P. 416–419. <https://doi.org/10.1080/15298669091369871>
- Rad Elec Inc. SPER-1E Electret Voltage Reader User's Manual. – URL: <https://www.radelec.com/manuals.html>
- Schmoyer R.L., Beaucamp J.J., Brandt C.C., Hoffman F.O.Jr. Difficulties with the lognormal model in mean estimation and testing // Environmental and Ecological Statistics. – 1996. – Vol. 3, nr 1. – P. 81–97. <https://doi.org/10.1007/BF00577325>
- She N. Analyzing censored water quality data using a nonparametric approach // Journal of the American Water Resources Association. – 1997. – Vol. 33, nr 3. – P. 615–624. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1997.tb03536.x>
- Sinha P., Lambert M.B., Trumbull V.L. Evaluation of statistical methods for left-censored environmental data with nonuniform detection limits // Environmental Toxicology and Chemistry. – 2006. – Vol. 25, nr 9. – P. 2533–2540. <https://doi.org/10.1897/05-548R.1>
- TASL (Track Analysis Systems Ltd, Bristol, UK.). TASTRAK PADC. – URL: <https://www.tasl.co.uk/tastrak-padc.php>
- SAPHYMO. AquaKIT data sheet. – URL: <https://www.bertin-technologies.com/wp-content/uploads/2016/06/Data-Sheet-AquaKIT.pdf>
- Synnott H., Hanley J., Fenton D., Colgan P.A. Radon in Irish schools: the results of a national survey // Journal of Radiological Protection. – 2006. – Vol. 26, nr 1. – P. 85–96. <https://doi.org/10.1088/0952-4746/26/1/005>
- Tuia D., Kanevski M. Indoor radon distribution in Switzerland: lognormality and Extreme Value Theory // Journal of Environmental Radioactivity. – 2008. – Vol. 99, nr 4. – P. 649–657. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2007.09.004>
- Tukey J.W. Exploratory Data Analysis. – Addison-Wesley Pub. Co., 1977. – 688 p. – ISBN 978-0-201-07616-5.
- UNSCEAR. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 1993 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Annex A: Exposures from

natural sources of radiation. – New York: United Nations, 1993. – 59 p. – ISBN 92-1-142200-0.

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.

UNSCEAR. Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2006 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Volume II: Scientific Annexes C, D and E. Annex E: Sources-to-effects assessment for radon in homes and workplaces. – New York: United Nations, 2009. – 142 p. – ISBN 978-92-1-142270-2.

Vlachonikolis I.G., Marriott F.H. Evaluation of censored contamination data // Food Additives & Contaminants. – 1995. – Vol. 12, nr 5. – P. 637–644. <https://doi.org/10.1080/02652039509374352>