

EDN: <https://elibrary.ru/svnfhr>DOI: <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2023-63-5-327-335>

УДК [613.6:614.875]+53.088

© Коллектив авторов, 2023

Прокопенко Л.В.¹, Курьеров Н.Н.¹, Лагутина А.В.¹, Воронков А.А.², Куриленко Ю.В.², Стерликов А.В.³, Руднева Е.А.⁴**Неопределённость в измерениях и оценке физических факторов неионизирующей природы**¹ФГБНУ «Научно-исследовательский институт медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова», пр-т Будённого, 31, Москва, 105275;²ООО «ПКФ Цифровые приборы», ул. Енисейская, 24, Москва, 129281;³Научно-технический центр радиационно-химической безопасности и гигиены ФМБА России, ул. Щукинская, 40, Москва, 123182;⁴ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в городе Москве», Графский пер., 4, Москва, 129626

В метрологии неопределённость измерений — это выражение статистической дисперсии значений, приписываемых измеряемой величине. Все измерения подвержены неопределённости, и результат измерения является полным только тогда, когда он сопровождается данными о связанной с ним неопределённости. В обзоре рассмотрены основные положения действующих нормативно-методических документов по проблеме учёта значений неопределённости при измерениях физических факторов неионизирующей природы и оценке их результатов. В частности, подробно рассматривается основополагающий в плане определения и применения неопределённости измерений ГОСТ 34100.1–2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008. Освещены вопросы учёта неопределённости измерений при гигиенической оценке физических факторов производственной среды, в т. ч. представлены правила оценки результатов измерений с учётом неопределённости, перечень аттестованных методик измерения физических факторов на рабочих местах с указанием параметров расширенной неопределённости, способы снижения неопределённости.

Ключевые слова: неопределённость; физические факторы; методы измерения; параметры; точность; погрешность; ошибка; достоверность

Для цитирования: Прокопенко Л.В., Курьеров Н.Н., Лагутина А.В., Воронков А.А., Куриленко Ю.В., Стерликов А.В., Руднева Е.А. Неопределённость в измерениях и оценке физических факторов неионизирующей природы. *Мед. труда и пром. экол.* 2023; 63(5): 327–335. <https://elibrary.ru/svnfhr> <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2023-63-5-327-335>

Для корреспонденции: Курьеров Николай Николаевич, вед. науч. сотрудник лаборатории физических факторов ФГБНУ «Научно-исследовательский институт медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова». E-mail: courierov@mail.ru

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Дата поступления: 03.04.2023 / Дата принятия к печати: 20.04.2023 / Дата публикации: 05.05.2023

Ludmila V. Prokopenko¹, Nikolay N. Courierov¹, Alla V. Lagutina¹, Andrey A. Voronkov², Yuri V. Kurilenko², Aleksander V. Sterlikov³, Elena A. Rudneva⁴**Uncertainty in the measurement and evaluation of physical factors of non-ionizing nature**¹Izmerov Research Institute of Occupation Health, 31, Budyonnogo Ave., Moscow, 105275;²PKF Tsifrovye Pribory Ltd, 24, Eniseiskaya St., Moscow, 129281;³Research and Technical Center of Radiation-Chemical Safety and Hygiene of Federal Medical-Biological Agency, 40, Shchukinskaya St., Moscow, 123182;⁴Center of Hygiene and Epidemiology in Moscow, 4, Graftsky lane, Moscow, 129626

In metrology, measurement uncertainty is an expression of the statistical variance of values attributed to a measured quantity. All measurements are subject to uncertainty, and the measurement result is complete only when it is accompanied by data on the uncertainty associated with it. The scientists have considered the main provisions of the current regulatory and methodological documents on the problem of accounting for uncertainty values when measuring physical factors of a non-ionizing nature and evaluating their results. In particular, the fundamental in terms of the definition and application of measurement uncertainty GOST 34100.1–2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008 is considered in detail. The authors highlighted the issues of taking into account measurement uncertainty in the hygienic assessment of physical factors of the production environment, including the rules for evaluating measurement results taking into account uncertainty, a list of certified methods for measuring physical factors in the workplace indicating the parameters of extended uncertainty, ways to reduce uncertainty.

Keywords: uncertainty; physical factors; measurement methods; parameters; accuracy; error; reliability

For citation: Prokopenko L.V., Courierov N.N., Lagutina A.V., Voronkov A.A., Kurylenko Yu.V., Sterlikov A.V., Rudneva E.A. Uncertainty in measurements and evaluation of physical factors of non-ionizing nature. *Med. truda i prom. ekol.* 2023; 63(5): 327–335. <https://elibrary.ru/svnfhr> <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2023-63-5-327-335> (in Russian)

For correspondence: Nikolay N. Kuryerov, the Leading Researcher at the Laboratory of Physical Factors, Izmerov Research Institute of Occupational Health. E-mail: courierov@mail.ru

Information about the authors: Prokopenko L.V. <https://orcid.org/0000-0001-7767-8483>

Courierov N.N. <https://orcid.org/0000-0001-7064-5849>

Lagutina A.V. <https://orcid.org/0000-0002-7177-1350>

Funding. The study had no funding.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Received: 03.04.2023 / Accepted: 20.04.2023 / Published: 05.05.2023

Определение величины параметров физических факторов — измерение в принятых единицах оценки должно отражать требуемую информацию о количественных свойствах объектов, явлений и процессов с необходимой точностью. Точность измерения определяет достоверность научных результатов, качества инженерных решений, технического состояния машин и механизмов, физиологического состояния биологических объектов и др. [1–6].

Абсолютно точных измерений не существует, поскольку неизбежно возникают неточности, ошибки. Результат измерений, как правило, зависит от многих причин, прежде всего, качества измерительной системы, методики измерения, квалификации оператора, внешних условий и других факторов [7].

О качестве проведённого измерения можно судить по разбросу его результатов. Разброс показаний и их число дают некоторую информацию в отношении среднего значения как оценки истинного значения величины. Однако этой информации в большинстве случаев будет недостаточно.

В конце прошлого столетия используемая метрологическая терминология (основной термин «погрешность» — характеристика точности измерения) вошла в противоречие с получившей всеобщее признание и повсеместно применяемой в мире идеологией управления качеством товаров и услуг на основе международных стандартов [8].

Понятие и термин «неопределённость» были введены в практику оценки физических величин Вернером Гейзенбергом в теории квантовой механики почти сто лет назад.

Впоследствии термин «неопределённость» был использован в новой концепции оценивания точности измерений, регламентированной в международном документе «Руководство по выражению неопределённости измерения» (*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, далее — Руководство GUM) [9].

Концепция неопределённости, введённая в Руководстве GUM, включает следующие положения. Базовые понятия классической теории точности: истинное значение, действительное значение и погрешность измерения не вводятся. Взамен введено понятие «неопределённость измерения», описываемое как сомнение, неполное знание значения измеряемой величины после проведения измерений и как количественное описание этого неполного знания. Далее это понятие уточняется: неопределённость — параметр, связанный с результатом измерения и характеризующий рассеяние значений, которые могли бы быть приписаны измеряемой величине [8].

Неопределённость является единственной признанной на международном уровне оценкой точности измерений, и её определение рассматривается как важнейшая практическая задача.

Неопределённость измерения — это общее понятие, связанное с любым измерением, которое используют при необходимости принятия обоснованных решений в разных областях практической деятельности и теоретических исследований.

Существует несколько определений неопределённости измерений в нормативных документах:

- неопределённость (измерения) — неотрицательный параметр, характеризующий рассеяние значений величины, приписываемых измеряемой величине на основании измерительной информации [10];
- неопределённость (измерения) — параметр, относящийся к результату измерения и характеризующий

разброс значений, которые могли бы быть обоснованно приписаны измеряемой величине [11].

Приведённые определения могут быть объединены одной фразой: неопределённость есть мера рассеяния результатов измерения.

Основопологающим документом, действующим в Российской Федерации в отношении определения и применения неопределённости в измерениях, является ГОСТ 34100.1–2017/*ISO/IEC Guide 98-1:2009* «Неопределённость измерения. Часть 1. Введение в руководства по выражению неопределённости измерения», идентичный международному документу *ISO/IEC Guide 98-1:2009*, разработанному Рабочей группой JCGM/WG 1 Объединённого комитета по руководствам в метрологии (*JCGM 104:2009*) и одобренному национальными комитетами международных организаций по стандартизации (*ISO*) и международной электротехнической комиссией (*IEC*) [12].

Стандарт является частью серии документов JCGM под общим названием «Оценивание данных измерений», включающей «Руководство по выражению неопределённости измерения» (*GUM — Guide to the expression of uncertainty in measurement*) — JCGM 100:2008 с дополнениями: JCGM 101:2008, JCGM 102-107 [9].

ГОСТ 34100.1–2017/*ISO/IEC Guide 98-1:2009* распространяется на следующие сферы жизнедеятельности (но не ограничивается ими): наука; промышленность; здравоохранение; обеспечение безопасности и охраны окружающей среды; деятельность калибровочных и испытательных лабораторий в промышленности, а также органов по аккредитации, органов контроля, надзора и оценки соответствия [12].

Разработчики Руководства GUM рекомендуют выражать результат измерения как наилучшую оценку измеряемой величины вместе с соответствующей неопределённостью измерения. Рассматривается два типа оценивания неопределённости:

- тип А — информацию о точности результата измерений получают из ряда повторных измерений;
- тип В — точность измерений оценивается обоснованными суждениями на основе имеющихся данных о возможных значениях этой величины (предварительная оценка точности метода измерений).

При этом определение результата измерений (выходной величины, обозначаемой Y) по ряду повторных измерений или, для косвенных измерений, по ряду измерений различных физических показателей (входных величин, обозначаемых $X_1, \dots, X_N$), представляют моделью в виде функции измерения $Y = f(X_1, \dots, X_N)$.

При оценивании неопределённости по типу А делают предположение, что распределение, наилучшим образом соответствующее входной величине X в условиях имеющихся повторных, независимых показаний, — это распределение Гаусса. В таком случае X характеризуется математическим ожиданием, наилучшей оценкой которого является среднее арифметическое показаний, и стандартным отклонением, равным стандартному отклонению среднего арифметического. Если неопределённость оценивают по малому числу показаний (являющихся мгновенными реализациями величины, распределённой по нормальному закону), то соответствующим распределением будет t -распределение. На рисунке 1 показаны плотности вероятности для распределения Гаусса (сплошная линия) и t -распределения с четырьмя степенями свободы (пунктирная линия) [12].

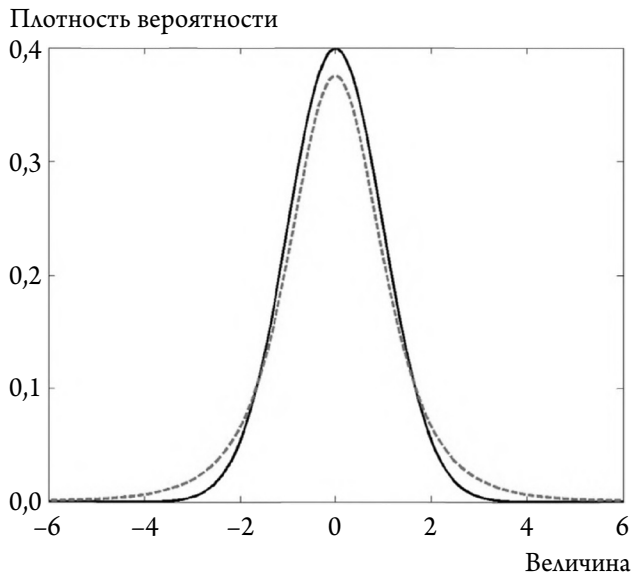


Рис. 1. Распределение Гаусса (сплошная линия) и t -распределение с четырьмя степенями свободы (пунктирная линия) [12]

Fig. 1. Gaussian distribution (solid line) and t -distribution with four degrees of freedom (dotted line) [12]

Сказанное выше будет справедливо, если показания рассматриваются как независимые.

При оценивании неопределённости по типу В единственной доступной информацией является то, что X лежит в определённом интервале величин $[a-b]$. Информация такого вида может быть формализована в виде прямоугольного распределения вероятностей, с границами a и b (рис. 2) [12].

Один из самых распространённых примеров оценивания по типу В — это оценка неопределённости прямых однократных измерений на основе погрешности, заданной через границы не исключённой систематической погрешности (НСП).

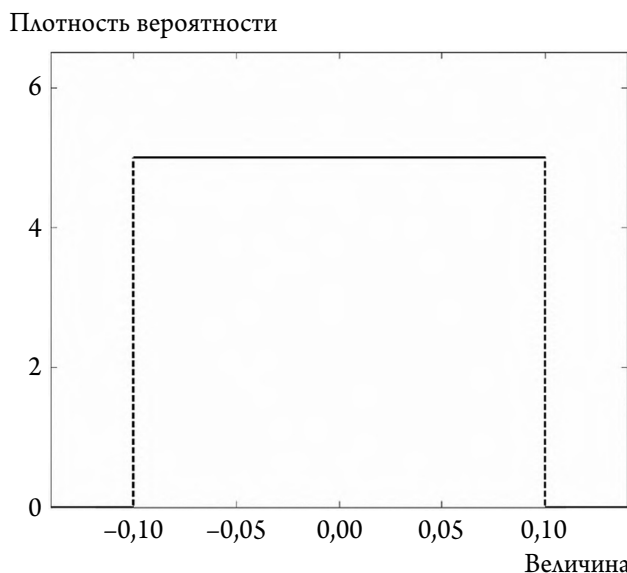


Рис. 2. Прямоугольное распределение на интервале $[-0.10; 0.10]$ [12]

Fig. 2. Rectangular distribution on the interval $[-0.10; 0.10]$ [12]

После того, как составлена модель измерения, и входные величины $X_1, \dots, X_N$ описаны через соответствующие распределения вероятностей, распределение вероятностей для измеряемой величины Y полностью определено. Математическое ожидание Y используется в качестве оценки измеряемой величины, а стандартное отклонение Y — в качестве стандартной неопределённости, ассоциированной с этой оценкой [13].

При оценивании неопределённости необходимо знать интервал, содержащий величину Y с заданной вероятностью. Такой интервал, называемый интервалом охвата, может быть получен из распределения вероятностей для Y .

Заданную вероятность называют вероятностью охвата. Для установленной вероятности охвата существует множество интервалов охвата, среди которых различают:

а) вероятностно симметричный интервал охвата, для которого вероятности (в сумме равные единице за вычетом вероятности охвата) расположения значения величины справа или слева от интервала равны;

б) наименьший интервал охвата, протяжённость которого является наименьшей из всех интервалов охвата, имеющих ту же вероятность охвата [12].

На рисунке 3 показано усечённое и масштабированное распределение Гаусса (в виде спадающей кривой) с граничными точками наименьшего (сплошные вертикальные линии) и вероятностно симметричного (пунктирные вертикальные линии) 95% доверительного интервала охвата для величины, с которой ассоциировано это распределение.

Распределение асимметрично, поэтому указанные два интервала охвата различаются между собой (особенно заметно различие в граничных точках справа). Левая граничная точка наименьшего интервала охвата точно совпадает с нулём — наименьшим возможным значением для этой

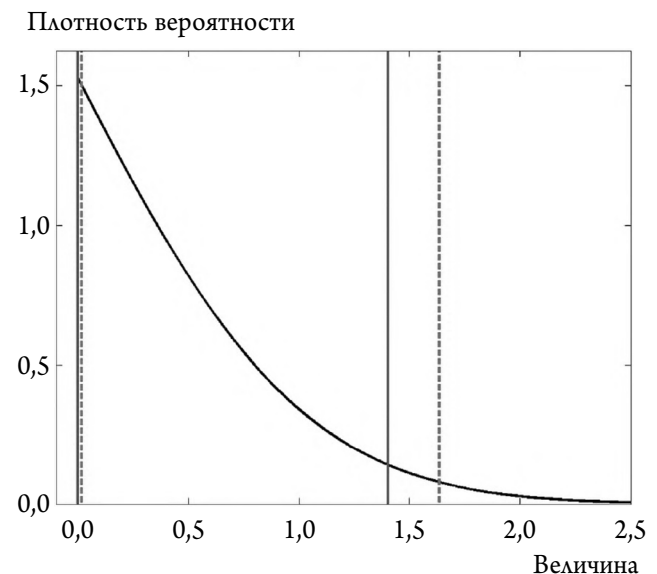


Рис. 3. 95% доверительный интервал охвата: наименьший (сплошные вертикальные линии) и вероятностно симметричный (пунктирные вертикальные линии) для величины с усечённым масштабированным распределением Гаусса [12]

Fig. 3. 95% confidence interval of coverage: the smallest (solid vertical lines) and probabilistically symmetric (dotted vertical lines) for a value with a truncated scaled Gaussian distribution [12]

величины. Для данного примера вероятно симметричный интервал охвата на 15% протяжённее наименьшего интервала охвата [12].

Для многих измерительных ситуаций способ расчёта неопределённости по Руководству *GUM* позволяет получить достоверные результаты [10]. Если функция измерения линейна относительно входных величин и эти величины распределены по нормальному закону, то способ оценивания неопределённости по *GUM* даёт точные результаты. Но даже, если указанные условия не соблюдаются, данный способ может достаточно хорошо работать на практике.

Однако существуют измерительные ситуации, при которых способ оценивания неопределённости по Руководству *GUM* нельзя считать удовлетворительным. В таких случаях более подходящим и удобным для применения является метод Монте-Карло, подробное руководство по которому, как способу трансформирования распределений, установлено в *JCGM 101:2008* [9].

Для метода Монте-Карло существует меньше ограничений по применению, чем для способа оценивания неопределённости по Руководству *GUM*. В дополнениях *JCGM 102–107* рассматриваются и другие методы оценки неопределённости измерений [9].

Само измерение (величины) можно определить, как:

- процесс экспериментального получения одного или более значений величины, которые могут быть обоснованно приписаны этой величине [10];
- совокупность операций, имеющих целью определение значения величины [11].

Совсем недавно процесс измерения воспринимался исключительно как сравнение результатов измерения с единицей величины, то есть с эталоном, то теперь — это совокупность любых операций, которые приводят к какому-то значению. Такая трансформация понятий естественна: старые метрологические концепции выросли из эпохи палат мер и весов, а сегодня для многих измерений вообще не существует эталонов, например, в информационных технологиях, медицинских и биологических исследованиях, при измерении интенсивности транспортных потоков и пр.

Следствием этих фундаментальных изменений стал постепенный отказ от применения термина «погрешность». Погрешность определяется как разность между измеренным и опорным значениями величин (опорное значение используют в качестве основы для сопоставления со значениями величин того же рода) [10].

Опорное значение величины заранее известно на эталоне, например, при калибровке средства измерения. При натурных измерениях опорное значение неизвестно, поэтому говорить о погрешности в этих случаях некорректно.

Согласно Приложению D ГОСТ 34100.3–2017/*ISO/IEC Guide 98-3:2008* «Неопределённость измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределённости измерения»: «... при натурных измерениях мы почти никогда не измеряем то, что хотим: мы имеем дело с измеренной величиной...» [11]. Простейший пример: измерение шума оборудования при наличии помех, когда возникает ещё одна составляющая неуверенности в результате (неопределённости), связанная с учётом различий между измеренной величиной и величиной, подлежащей измерению и оценке [14].

В отличие от погрешности натурных измерений, составляющие неопределённости (отклонения измеренной

величины от измеряемой, погрешности средств измерений и пр.) могут быть оценены, а именно с некоторой вероятностью можно ожидать, что результаты последующих измерений окажутся в пределах области значений, размеры которой характеризуются рассчитанной неопределённостью.

Для многих практических применений этого вполне достаточно, так как позволяет сопоставлять результаты измерений различных лабораторий и использовать их в технических расчётах [6].

Применение понятия погрешности результата измерения, которая принципиально неизвестна и конкретно неопределима, возможно только в теоретических рассуждениях о результатах измерений. Понятие оценки погрешности допускается использовать при калибровке средства измерений и для оценки точности результатов, полученных прямым методом измерений [11].

Прямой метод измерений — измерение, при котором искомое значение величины находят непосредственно из опытных данных. Прямые измерения проводятся по методикам, изложенным в эксплуатационной документации [15]. Такие методики не требуют обязательной аттестации.

Руководствуясь положениями ГОСТ 8.401-80 «Государственная система обеспечения единства измерений. Классы точности средств измерений. Общие требования» и ГОСТ 8.009-84 «Государственная система обеспечения единства измерений. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений» нормирование метрологических характеристик средств измерений осуществляют, оперируя понятием «погрешность». При этом величина погрешности (основной и дополнительной) приводится в эксплуатационной документации или определяется классом средства измерений данного типа [16, 17].

Поскольку точность измерений определяется не только метрологическими характеристиками средств измерений, условиями проведения измерений, ошибками оператора и другими причинами, это означает, что методики выполнения измерений (далее — методики измерения — МИ) могут разрабатываться и быть аттестованными только применительно к конкретным условиям проведения измерения с использованием конкретных средств [18].

В аттестованных методиках измерений устанавливается совокупность операций и правил, следуя которым обеспечивается получение результата измерения с неопределённостью, не превышающей допускаемых пределов, обеспечивающих точность, определяемую целью измерений.

Проблема учёта неопределённости измерений при гигиенической оценке виброакустических факторов поднималась в 70–80-е годы прошлого века. Разработкой методов определения и снижения неопределённости при измерениях активно занимались специалисты ВЦНИИОТ ВЦСПС Ю.М. Васильев и Л.Ф. Лагунов.

Результатом этих усилий явилась разработка ГОСТ ССБТ 12.1.050-86 «Методы измерения шума на рабочих местах» (действовавшего до декабря 2014 г.), в котором впервые для стандартов ССБТ появились разделы, касающиеся оценки степени точности измерения шума и контроля соответствия предельно допустимым уровням (ПДУ) [19].

По этому стандарту контроль соответствия измеренных эквивалентных уровней звука за 8-часовую рабочую смену установленному ПДУ проводился с учётом неопределённости измерений по следующим правилам:

- если $L_{Aeq} + \varepsilon < \text{ПДУ}$, то шум ниже предельно допустимого значения;
- если $L_{Aeq} - \varepsilon \geq \text{ПДУ}$, то шум равен предельно допустимому значению или превосходит его;
- если $L_{Aeq} - \varepsilon < \text{ПДУ} \leq L_{Aeq} + \varepsilon$, то решение о результате контроля не может быть принято. В этом случае следует повторить измерения, используя метод более высокой степени точности.

Это правило вполне соответствует требованиям стандарта ГОСТ Р ИСО 10576-1-2006 «Статистические методы. Руководство по оценке соответствия установленным требованиям. Часть 1. Общие принципы» при следующих условиях:

- интервал неопределённости результатов измерений находится внутри области допустимых значений, принимают решение о соответствии;
- интервал неопределённости результатов измерений находится внутри области недопустимых значений, то принимают решение о несоответствии;
- в соответствии с процедурой оценки не может быть принято решение ни о соответствии, ни о несоответствии требованиям, результат оценки является неокончательным [20].

В некоторых случаях, когда нормируется не диапазон допустимых величин, а только верхняя (или нижняя) граница, решение о соответствии принимается только в том случае, если соответствующая граница одностороннего интервала неопределённости не выходит за нормативное значение.

Такой метод учёта неопределённости использован в ГОСТ 23337-2014 «Шум. Методы измерения шума на селитебной территории и в помещениях жилых и общественных зданий» при оценке результатов измерений шума на селитебной территории и в помещениях жилых и общественных зданий [21].

Существует ещё один принцип косвенного учёта неопределённости измерений, когда с нормативом сравнивается непосредственно результат измерения (без прибавления/вычитания неопределённости), но при этом неопре-

делённость измерений не должна выходить за оговоренные (приемлемые) рамки. Такой принцип рекомендуется в ГОСТ 12.1.003-2014 «ССБТ. Шум. Общие требования безопасности». Однако, если по проведённым измерениям неопределённость измерений выходит за приемлемые величины, в стандарте приводится алгоритм расчёта оцениваемого уровня звука [22].

До недавнего времени гигиеническая оценка физических факторов осуществлялась без учёта неопределённости несмотря на то, что требования по расчёту и представлению её в протоколах измерения действуют не один год.

В 2012 г. Роспотребнадзор направил подведомственным организациям письмо № 01/6620-12-32 от 13.06.2012 г. «Об оценке данных, получаемых при инструментальных измерениях физических факторов неионизирующей природы», в котором отмечалось, что при проведении измерений и оформлении результатов необходимо указывать неопределённость измерений, а при оценке соответствия результатов требованиям гигиенических нормативов следует руководствоваться приведёнными выше положениями ГОСТ Р ИСО 10576-1-2006 [20, 23].

В СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах», в пункте 1.5 было записано: «Оценка фактических уровней производственных физических факторов должна проводиться с учётом неопределённости измерений». Однако правил учёта неопределённости этот документ не содержал [24].

Вышедшие в 2021 г. санитарные нормы и правила – СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и(или) безвредности для человека факторов среды обитания» (отменившие СанПиН 2.2.4.3359-16) не содержат упоминаний о неопределённости измерений и правилах её учёта [25].

Вместе с тем, в письме Роспотребнадзора № 02/12560-2021-32 от 23.06.2021 г. «Об оценке воздействия физических факторов» в связи с вступлением в силу СП 2.2.3670-20 «Санитарно-эпидемиологические требования к условиям труда» и СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы

Таблица 1 / Table 1

Правила оценки результатов измерений физических факторов неионизирующей природы с учётом неопределённости

Rules for evaluating the results of measurements of physical factors of a non-ionizing nature, taking into account uncertainty

Показатель	Тип гигиенического норматива	Критерий соответствия
1	2	3
Микроклимат: температура, относительная влажность	$A \leq Y \leq B$	$\bar{Y} + 2u_c \leq B$ и $\bar{Y} - 2u_c \geq A$
Интенсивность теплового облучения, скорость воздуха	$Y \leq B$	$\bar{Y} + 1,64u_c \leq B$ или $Y - 1,64u_c \geq A$
ТНС индекс	$A \leq Y \leq B$	$\bar{Y} + 2u_c \leq B$ и $\bar{Y} - 2u_c \geq A$
Виброакустические факторы	$Y \leq B$	$\bar{Y} + 1,64u_c \leq B$ или $Y_{+0,95} \leq B$
Напряжённость ЭП, магнитная индукция, напряжённость МП, плотность потока ЭМП	$Y \leq B$	$\bar{Y} + 1,64u_c \leq B$ или $Y_{+0,95} \leq B$
Освещённость	$A \leq Y$	$\bar{Y} + 1,64u_c \leq B$ или $Y_{-0,95} \leq B$
Коэффициент пульсации освещённости	$Y \leq B$	$\bar{Y} + 1,64u_c \leq B$ или $Y_{+0,95} \leq B$
Лазерное излучение	$Y \leq B$	$\bar{Y} + 1,64u_c \leq B$ или $Y_{+0,95} \leq B$
Ультрафиолетовое излучение	$Y \leq B$	$\bar{Y} + 1,64u_c \leq B$ или $Y_{+0,95} \leq B$

Примечание к таблице: Y — нормируемая величина, B — верхний допустимый уровень, A — нижний допустимый уровень, $\bar{Y}$ — среднее значение (результат измерения), $Y_{+0,95}$ ($Y_{-0,95}$) — верхняя (нижняя) граница одностороннего интервала охвата для доверительного интервала 95%.

Note: Y is the normalized value, B is the upper permissible level, A is the lower permissible level, $\bar{Y}$ is the average value (measurement result), $Y_{+0,95}$ ($Y_{-0,95}$) is the upper (lower) boundary of the one-sided coverage interval for the 95% confidence interval.

и требования к обеспечению безопасности и(или) безвредности для человека факторов среды обитания» даны разъяснения по проведению измерений физических факторов неионизирующей природы в условиях производства и санитарно-эпидемиологической оценке условий труда. В частности, содержится предписание о применении односторонних или двусторонних интервалов неопределённости при проведении измерений и оценке физических факторов в условиях производства, но правила учёта неопределённости и в этом документе отсутствуют [25, 26, 27].

В новых методических документах — МУК 4.3.3722-21 «Контроль уровня шума на территории жилой застройки, в жилых и общественных зданиях и помещениях» и МУК 4.3.3786-22 «Инструментальный контроль и оценка вибрации в жилых и общественных зданиях» содержатся разделы по расчёту расширенной неопределённости измерений [28, 29].

Специалистами Роспотребнадзора подготовлены правила оценки результатов измерений физических факторов с учётом неопределённости (проект), которые наиболее соответствуют гигиенической практике (**табл. 1**) [14].

Действующие в настоящее время аттестованные методики измерения физических факторов содержат разделы по оценке неопределённости результатов измерений.

Показателями точности измерений по методикам прямых измерений, например, таким как, МИ ПКФ-12-006 «Методика измерений. Однократные прямые измерения уровней звука, звукового давления и вибрации приборами серий ОКТАВА и ЭКОФИЗИКА» является погрешность. Одновременно этот документ включает указания по оценке неопределённости по типу В [30]. Эти сведения могут быть использованы для оценки неопределённости измерений, которая составляет 0,7 дБ для измерений постоянного и непостоянного шума и 1,1 дБ для измерений шума, состоящего из импульсов длительностью от 5 до 100 мс [30].

В соответствии с ГОСТ 34100.3–2017/ИСО/МЭК 98-3:2008 стандартная неопределённость представляет собой неопределённость результата, выраженного через стандартное отклонение [11].

Содержащиеся в таблицах указанного стандарта предельные значения погрешности следует рассматривать в качестве границ неисклѐченной систематической погрешности по ГОСТ Р 8.736-2011 «Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения», а среднееквадратичное отклонение НСП можно понимать как стандартную неопределённость прямого однократного измерения по типу В или как инструментальный вклад в неопределённость многократных и/или косвенных измерений [31].

Таким образом, в этом случае стандартная неопределённость измерения вычисляется по формуле:

$$u_B = \frac{\theta_x}{\sqrt{3}} \quad (1)$$

если границы НСП несимметричны, то неопределённость рассчитывают по формуле:

$$u_B = \frac{\theta_+ - \theta_-}{\sqrt{12}} \quad (2)$$

где θ_+ и θ_- — верхняя и нижняя граница НСП.

Диапазоны и погрешности измерения уровней звука, звукового давления и вибрации приведены в соответствующих таблицах МИ.

Для учёта дополнительных погрешностей на влияние ветрозащиты и внешних факторов следует пользоваться формулой:

$$\Delta L = 20 \times \lg(1 + \sqrt{(10^{\Delta L/20} - 1)^2 + \Sigma(10^{\Delta L_k/20} - 1)^2}) \quad (3)$$

где ΔL — модуль погрешности измерения,

ΔL_k — k -я дополнительная погрешность в децибелах.

Методики измерения таких физических факторов как шум, инфразвук, ультразвук, локальная и общая вибрация, электрические и магнитные поля, электромагнитное излучение, некоторые параметры световой среды и микроклимата на рабочих местах разработаны и аттестованы метрологической службой ООО «ПКФ Цифровые приборы». Эти методики внесены в реестр аттестованных методик измерений Фонда по обеспечению единства измерений Росстандарта (**табл. 2**).

Метрологической службой ООО «ПКФ Цифровые приборы» также разработан и аттестован ряд методик измерения физических факторов в помещениях жилых и общественных зданий и на территории жилой застройки, которые содержат сведения о точности измерений.

Для метрологического обеспечения специальной оценки условий труда разработаны методики измерения практически всех основных неблагоприятных факторов производственной среды и трудового процесса, включая физические факторы, которые содержат требования к точности применяемых средств измерений, значениям допускаемой (целевой) неопределённости результатов измерений, условиям и правилам подготовки и проведения измерений. В некоторых из этих методик представлен алгоритм расчёта неопределённости измерений.

Как видно из **таблицы 2**, при измерениях по указанным методикам расширенная неопределённость для большинства виброакустических факторов составит порядка ± 3 дБ, а это значит, что экспозиция для крайних величин в диапазоне неопределённости будет различаться в 4 раза.

Для измерений показателей электрических и магнитных величин расширенная неопределённость составит порядка ± 20 –30%. Поэтому проблема снижения неопределённости измерений крайне актуальна и требует разработки способов её снижения.

Среди способов снижения неопределённости выделяют два основных: 1) повышение качества выборки прямых измерений, по которой считается конечный результат, и 2) повышение качества анализа, по итогу которого можно обоснованно уменьшить оценку рассеяния результатов.

Первое направление. Увеличение выборки (количества измерений), которое всегда приводит к более надёжной оценке, так, например, увеличение количества измерений в k^2 раз уменьшит неопределённость, связанную со случайными факторами в k раз. Если вместо 3 прямых измерений напряжённости электрического поля провести 5 измерений, то вклад в неопределённость, связанный со случайными колебаниями поля уменьшится примерно на 30%, а при 12 измерениях — уменьшится в 2 раза.

Второе направление. Помимо увеличения числа измерений в выборке результатов важно уделять внимание и качеству этой выборки, в частности, исключать из рас-

Таблица 2 / Table 2

Аттестованные методики измерения физических факторов на рабочих местах
Certified methods of measuring physical factors in the workplace

Шифр методики измерения	Наименование методики	Расширенная неопределённость*
Методики измерений уровня звука и уровня звукового давления		
МИ ПКФ-14-010 с изменением 1	Методика измерений эквивалентного уровня звука на рабочем месте на основе стратегии трудовой функции	3,0 дБ
МИ ПКФ-14-011 с изменением 1	Методика измерений эквивалентного уровня звука на рабочем месте на основе стратегии рабочей операции	3,0 дБ
МИ ПКФ-14-016	Методика измерений уровней звукового давления в инфразвуковом диапазоне частот на рабочих местах в производственных помещениях и на территории	2,7 дБ
Методики измерений уровня вибрации		
МИ ПКФ-14-014 с изменением 1	Методика измерений ускорения общей производственной вибрации, передающейся через ноги стоящего человека	4,0 дБ
МИ ПКФ-14-017 с изменениями №1 и №2	Методика измерений ускорения общей вибрации, передающейся через сиденье на водителей и пассажиров автомобильных транспортных средств	3,5 дБ
МИ ПКФ-22-018	Методика измерений ускорения локальной вибрации, передающейся на руки водителей автомобильных транспортных средств через руль	3,3 дБ
МИ ПКФ-15-022 с изменением 1	Методика измерений локальной вибрации ручной машины в условиях эксплуатации на рабочих местах	3,0 (3,8)** дБ
Методики измерений напряжённости электрических и магнитных полей		
МИ ПКФ-15-023 с изменением 1	Методика измерений напряжённости электрического поля частоты 50 Гц на рабочем месте, в помещениях жилых и общественных зданий и на территории	20%
МИ ПКФ-15-024 с изменением 1	Методика измерений напряжённости магнитного поля частоты 50 Гц на рабочем месте, в помещениях жилых и общественных зданий и на территории	20%
МИ ПКФ-16-038	Методика измерения напряжённости электрического поля в полосах частот 5–2000 Гц, 10–30 кГц, 2–400 кГц на рабочем месте	до 30%
МИ ПКФ-16-039	Методика измерений напряжённости магнитного поля в полосах частот 5–2000 Гц, 10–30 кГц, 2–400 кГц на рабочем месте	до 30%
МИ ПКФ-17-047	Методика измерения коэффициента ослабления геомагнитного поля	до 23%
Методики измерений параметров микроклимата		
МИ ПКФ-17-046	Методика измерений индекса тепловой нагрузки среды в производственных помещениях	0,7°C
МИ ФФ-03/21	Методика измерений среднесменных показателей микроклимата на рабочем месте	0,4°C
МИ ФФ-04/21	Методика измерений расхода воздуха в системах принудительной вентиляции	Рассчитывается
Методики измерений параметров световой среды		
МИ Эколайт	Методика измерений параметров освещения люксметром-яркомером-пульсметром «Эколайт-01»	13%–21%

Примечание: * — при коэффициенте охвата 2, при доверительном интервале 95%; ** — при отсутствии до и после измерений проверки чувствительности измерительного тракта.

Note: * — with a coverage factor of 2, with a confidence interval of 95%; ** — in the absence of a sensitivity check of the measuring path before and after measurements.

смотрения явные ошибки, а для тех прямых измерений, которые сами по себе являются результатом усреднения, увеличивать время этого усреднения.

Второе направление носит скорее формальный характер, но и повышение качества анализа может обоснованно снизить неопределённость.

Существуют также следующие способы улучшения оценки неопределённости при том же объёме измерений:

- отказ от заведомо завышенных оценок отдельных вкладов в неопределённость измерений (пример — заведомо завышенная оценка инструментального

вклада в 1,7 дБ для шумомеров первого класса при оценке неопределённости по ГОСТ ISO 9612-2016 «Акустика. Измерения шума для оценки его воздействия на человека. Метод измерений на рабочих местах» [32]);

- использование, в тех случаях, когда это допустимо, односторонних интервалов охвата, что позволяет уменьшить коэффициент охвата.

Исходя из рассмотренных положений нормативно-методических документов, можно сделать вывод, что для практической работы лабораторий по измерениям

физических факторов и их оценке на соответствие требованиям гигиенических норм возможны два варианта учёта неопределённости:

- с нормативными уровнями шума следует сопоставлять верхнюю границу одностороннего интервала охвата для уровня доверия 95% ($\bar{Y}+1,64u_{\leq B}$ или $Y_{+0,95} \leq B$), что равноценно введению коэффициента запаса к нормативной величине равный неопределённости измерения и заведомо снижает риск для здоровья;
- с нормативными значениями следует сравнивать результат без учёта неопределённости. Одновременно накладывается ограничение на максимальную разрешённую неопределённость измерений. При этой оценке допускается увеличение риска для здоровья, определяемого максимально разрешённой неопределённостью.

Заключение. Конкретные результаты измерений в любых метрологических ситуациях однозначно могут и должны быть охарактеризованы неопределённостью.

Действующие в настоящее время нормативно-методические документы, определяют терминологию, совокупность операций и правил, следуя которым обеспечивается получение результата измерения с неопределённостью, не превышающей допустимых пределов, обеспечивающих точность. Точность определяется целью измерений, алгоритмом принятия решения о соответствии результата оценки требованиям норм.

Для обеспечения единства измерений при осуществлении контроля и оценке показателей физических факторов неионизирующей природы на предмет соответствия их гигиеническим нормативам по обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания необходимо учитывать неопределённость по правилам, изложенным в **таблице 1**.

Список литературы

1. Измеров Н.Ф., Суворов Г.А. *Физические факторы производственной и природной среды. Гигиеническая оценка и контроль*. М.: Медицина; 2003.
2. *Контроль физических факторов окружающей среды, опасных для человека: Энциклопедия «Экометрия» из серии справочных изданий по экологическим и медицинским измерениям*. М.: ИПК Издательство стандартов; 2003.
3. *Воздействие на организм человека опасных и вредных производственных факторов. Метрологические аспекты*. Т.2. М.: ИПК Издательство стандартов; 2004.
4. *Российская энциклопедия по медицине труда*. Главный редактор Н.Ф. Измеров. М.: Медицина; 2005.
5. *Российская энциклопедия по охране труда*. Издание 2-е, переработанное и дополненное. М.: НИЦ ЭНАС; 2006.
6. *Руководство в 2-х томах. Физические факторы, Эколого-гигиеническая оценка и контроль*. М.: Медицина; 1999.
7. Bell S. *Measurement Good Practice Guide No. 11. A Beginner's Guide to Uncertainty of Measurement*. Tech, rep., National Physical Laboratory. 1999.
8. *Погрешность и неопределённость*. Интернет-ресурс «Metrob.ru» <https://metrob.ru/html/pogreshnost/> (дата обращения 02.03.2023 г.).
9. JCGM 100:2008 Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement. https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf/cb0ef43f-baa5-11cf-3f85-4dcd86f77bd6 (дата обращения 28.03.2023 г.).
10. РМГ 29-2013 Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения. М. Стандартинформ; 2014.
11. ГОСТ 34100.3-2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008 Неопределённость измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределённости измерения. М. Стандартинформ; 2018.
12. ГОСТ 34100.1-2017/ISO/IEC Guide 98-1:2009 Неопределённость измерения. Введение в руководства по выражению неопределённости измерения. М. Стандартинформ; 2018.
13. Weise K., Woger W. A Bayesian theory of measurement uncertainty. *Meas. Sci. Technol.* 1992; 3: 1–11.
14. Воронков А.А., Куриленко Ю.В., Стерликов А.В. Вопросы учёта неопределённости измерений. <https://www.octava.info/Uncertainty/> (дата обращения 10.03.2023 г.).
15. Федеральный закон от 26.06.2008 № 102-ФЗ (ред. от 11.06.2021 г.) «Об обеспечении единства измерений». <https://base.garant.ru/12161093/> (дата обращения 15.03.2023 г.).
16. ГОСТ 8.401-80 Государственная система обеспечения единства измерений. Классы точности средств измерений. Общие требования. М. Стандартинформ; 2010.
17. ГОСТ 8.009-84 Государственная система обеспечения единства измерений. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. М. Стандартинформ; 2006.
18. Главный форум метрологов. Справочник Методы измерения. https://info.metrologu.ru/spravochnik/metrologiya/izmereniya/izmereniya_15.html (дата обращения 15.03.2023 г.).
19. ГОСТ 12.1.050-86 Система стандартов безопасности труда. Методы измерения шума на рабочих местах. М. Стандартинформ; 2007.
20. ГОСТ Р ИСО 10576-1-2006 Статистические методы. Руководство по оценке соответствия установленным требованиям. Часть 1. Общие принципы. М. Стандартинформ; 2008.
21. ГОСТ 23337-2014 Шум. Методы измерения шума на селитебной территории и в помещениях жилых и общественных зданий. М. Стандартинформ; 2019.
22. ГОСТ 12.1.003-2014 Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности. М. Стандартинформ; 2019.
23. Письмо Роспотребнадзора от 13.06.2012 № 01/6620-12-32 Об оценке данных, получаемых при инструментальных измерениях физических факторов неионизирующей природы <https://docs.cntd.ru/document/420303757/> (дата обращения 02.03.2023 г.).
24. СанПиН 2.2.4.3359-16 Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах. <https://base.garant.ru/71462000/53f89421bbdaf741eb2d1ecc4ddb4c33/> (дата обращения 02.03.2023 г.).
25. СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/406408041/> (дата обращения 02.03.2023 г.).
26. Письмо Роспотребнадзора от 23.06.2021 № 02/12560-2021-32 Об оценке воздействия физических факторов. <https://docs.cntd.ru/document/607874744/> (дата обращения 14.03.2023 г.).
27. СП 2.2.3670-20 Санитарно-эпидемиологические требования к условиям труда. <https://docs.cntd.ru/document/573230583> (дата обращения 15.03.2023 г.).
28. МУК 4.3.3722-21 Контроль уровня шума на территории жилой застройки, в жилых и общественных зданиях и помещениях. <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/403287707/> (дата обращения 14.03.2023 г.).
29. МУК 4.3.3786-22 Инструментальный контроль и оценка вибрации в жилых и общественных зданиях. <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/403287707/>

- tertia-shop.ru/image/catalog/files/MUK_4_3_3786_22.pdf (дата обращения 14.03.2023 г.).
30. МИ ПКФ-12-006 Методика измерений. Однократные прямые измерения уровней звука, звукового давления и вибрации приборами серий ОКТАВА и ЭКОФИЗИКА. <https://www.octava.info/files/Статьи/МИ%20ПКФ-12-006.pdf> (дата обращения 16.03.2023 г.).
31. ГОСТ Р 8.736-2011 Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. М.: Стандартинформ; 2019.
32. ГОСТ ISO 9612-2016. Акустика. Измерения шума для оценки его воздействия на человека. Метод измерений на рабочих местах. М.: Стандартинформ; 2019.

References

- Izmerov N.F., Suvorov G.A. *Physical factors of industrial and natural environment. Hygienic assessment and control*. M.: Meditsina; 2003.
- Control of physical environmental factors dangerous to humans: *Encyclopedia "Ecometrics" from a series of reference publications on environmental and medical measurements*. M.: IPK Izdatelstvo Standartov; 2003.
- The impact on the human body of hazardous and harmful production factors. Metrological aspects*. Vol.2. M.: IPK Izdatelstvo Standartov; 2004.
- Russian Encyclopedia of Occupational Medicine*. Editor-in-chief: N.F. Izmerov. M.: Meditsina; 2005.
- Russian Encyclopedia on Labor Protection*. 2nd edition revised and supplemented. Moscow: NC ENAS; 2006.
- Manual in 2 volumes. Physical factors, Ecological and hygienic assessment and control*. M.: Meditsina; 1999.
- Bell S. *Measurement Good Practice Guide No. 11. A Beginner's Guide to Uncertainty of Measurement*. Tech, rep., National Physical Laboratory; 1999.
- Error and uncertainty*. Internet resource "Metro.ry" <https://metro.ru/html/pogreshnost> (accessed 02.03.2023).
- JCGM 100:2008 Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement. https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf/cb0ef43f-baa5-11cf-3f85-4dcd86f77bd6 (accessed 28.03.2023 г.).
- RMG 29-2013 State system for ensuring the uniformity of measurements. Metrology. Basic terms and definitions. M.: Standartinform; 2014.
- GOST 34100.3-2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008 Measurement uncertainty. Part 3. Guide to the expression of measurement uncertainty. M. Standartinform; 2018.
- GOST 34100.1-2017/ISO/IEC Guide 98-1:2009 Measurement uncertainty. Introduction to guidelines on the expression of measurement uncertainty. M. Standartinform; 2018.
- Weise K., Wagner W. A Bayesian theory of measurement uncertainty. *Meas. Sci. Technol.* 1992; 3: 1–11.
- Voronkov A.A., Kurylenko Yu.V., Sterlikov A.V. Issues of accounting for measurement uncertainty. <https://www.octava.info/Uncertainty> (accessed 10.03.2023).
- Federal Law No. 102-FZ of June 26, 2008 (as amended on June 11, 2021) "On Ensuring the Uniformity of Measurements". <https://base.garant.ru/12161093/> (accessed 03/15/2023).
- GOST 8.401-80 State system for ensuring the uniformity of measurements. Accuracy classes of measuring instruments. General requirements. M.: Standartinform; 2010.
- GOST 8.009-84 State system for ensuring the uniformity of measurements. Normalized metrological characteristics of measuring instruments. M. Standartinform; 2006.
- The main forum of metrologists. Handbook of Measurement Methods. https://info.metrologu.ru/spravochnik/metrologiya/izmereniya/izmereniya_15.html (accessed 03/15/2023).
- GOST 12.1.050-86 System of occupational safety standards. Methods of measuring noise in the workplace. M.: Standartinform; 2007.
- GOST R ISO 10576-1-2006 Statistical methods. Guidelines for assessing compliance with established requirements. Part 1. General principles. M.: Standartinform; 2008.
- GOST 23337-2014 Noise. Methods of measuring noise in residential areas and in residential and public buildings. M. Standartinform; 2019.
- GOST 12.1.003-2014 System of occupational safety standards. Noise. General safety requirements. M.: Standartinform; 2019.
- Letter of Rospotrebnadzor dated 13.06.2012 No. 01/6620-12-32 On the evaluation of data obtained by instrumental measurements of physical factors of non-ionizing nature <https://docs.cntd.ru/document/420303757> (accessed 02.03.2023).
- SanPiN 2.2.4.3359-16 Sanitary and epidemiological requirements for physical factors in the workplace. <https://base.garant.ru/71462000/53f89421bbdaf741eb2d1ecc4ddb4c33> (accessed 02.03.2023).
- SanPiN 1.2.3685-21 Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans. <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/406408041> (accessed 02.03.2023).
- Letter of Rospotrebnadzor dated 06/23/2021 No. 02/12560-2021-32 On the assessment of the impact of physical factors. <https://docs.cntd.ru/document/607874744> / (date of application 14.03.2023).
- SP 2.2.3670-20 Sanitary and epidemiological requirements for working conditions. <https://docs.cntd.ru/document/573230583> (date of application 15.03.2023).
- MUK 4.3.3722-21 Noise level control in residential buildings, residential and public buildings and premises. <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/403287707> (accessed 14.03.2023).
- MUK 4.3.3786-22 Instrumental monitoring and evaluation of vibration in residential and public buildings. https://www.tertia-shop.ru/image/catalog/files/MUK_4_3_3786_22.pdf (accessed 14.03.2023).
- MI PKF-12-006 Measurement methodology. One-time direct measurements of sound levels, sound pressure and vibration by devices of the OCTAVE and ECOPHYSICS series. <https://www.octava.info/files/Articles/MI%20PKF-12-006.pdf> (accessed 16.03.2023).
- GOST R 8.736-2011 State system for ensuring the uniformity of measurements. Direct multiple measurements. Methods of processing measurement results. Basic provisions. M.: Standartinform; 2019.
- GOST ISO 9612-2016. Acoustics. Noise measurements to assess its impact on humans. The method of measurements in the workplace. M.: Standartinform; 2019.