

Измерения и вычисления – предмет современной метрологии

Сергей Фёдорович Левин

Московский институт экспертизы и испытаний, Москва, Россия, miei-metrolog@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрена проблема синонимии измерений и вычислений, длительное время препятствовавшая должной нормативно-методической проработке вопросов неадекватности для математических моделей объектов измерений – одной из важнейших проблем метрологии. Концептуально решение проблемы неадекватности при идентификации математических моделей по данным совместных измерений связано с переходом от синонимии измерений и вычислений к принципу единства результатов измерений и результатов вычислений. Дана краткая характеристика тематики Всесоюзной дискуссии по проблемам применимости вероятностно-статистических методов 1970–1990 гг., инициированной вопросом А. Н. Колмогорова об объективном смысле вероятности. Обращено внимание на то, что в ходе дискуссии критике подверглись математические результаты, составившие впоследствии основу «Руководства по выражению неопределённости измерения» и его приложений. Проанализированы основные результаты математики как универсального языка науки, связанные с решением измерительных задач, расширяющих представление о предмете метрологии. Показано, что с этой точки зрения современная метрология представляет собой фундаментальную науку о методах и средствах отображения свойств объектов измерений математическими моделями. Простейшими моделями являются величины и распределения значений, а более сложными – случайные функции, функционалы и операторы. К средствам отображения, кроме средств измерений, отнесены средства вычислений с математическим, алгоритмическим и программным обеспечением для решения измерительных задач. Отмечена связь с проблемой неадекватности сложностей, возникающих в подготовке и повышении квалификации специалистов-метрологов.

Ключевые слова: измерение, метод измерения, измерительная задача, метод решения измерительной задачи, погрешность неадекватности, распределение вероятностей, композиция, свёртка

Для цитирования: Левин С. Ф. Измерения и вычисления – предмет современной метрологии // Измерительная техника. 2022. № 5. С. 15–21. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-5-15-21>

Measurements and calculations are the subject of modern metrology

Sergey F. Levin

Moscow Institute for Expertise and Tests, Moscow, Russia, miei-metrolog@yandex.ru

Abstract. The problem of synonymy of measurements and calculations is considered, which for a long time prevented the proper normative and methodological elaboration of the issues of inadequacy for mathematical models of measurement objects – one of the most important problems of metrology. Conceptually, the solution to the problem of inadequacy in identifying mathematical models based on joint measurements is associated with the transition from synonymy of measurements and calculations to the principle of unity of measurement results and calculation results. A brief description of the topics of the All-Union discussion on the applicability of probabilistic and statistical methods of the 1970–1990s, initiated by A. N. Kolmogorov's question about the objective meaning of probability, is given. Attention is drawn to the fact that during the discussion the mathematical results were criticized, which later formed the basis of the "Guide to the expression of measurement uncertainty" and its applications. The main results of mathematics as a universal language of science related to the solution of measurement problems that expand the understanding of the subject of metrology are analyzed. From this point of view, modern metrology is a fundamental science of methods and means of displaying the properties of measurement objects by mathematical models. The simplest of them are quantities and distributions of values, and the more complex ones are random functions, functionals and operators. The means of selection, in addition to measuring instruments, include computing tools with mathematical, algorithmic and software for solving measurement problems. The connection with the problem of inadequacy of difficulties arising in the training and advanced training of metrologists is noted.

Keywords: measurement, measurement method, measurement problem, method of solving the measurement problem, error of inadequacy, probability distribution, composition, convolution

Введение. Центральным технологическим событием метрологии XX в. стало начало широкого внедрения вычислительной техники. К этому времени понятия «измерение» и «вычисление» всё ещё воспринимались как нечто большее, чем синонимы, несмотря на различие физической природы соответствующих им операций, но благодаря совпадению числовых форм результатов. На сочетание *реального*

(физического) и *идеального* (математического) в измерении в 1938 г. обратил внимание А. Лебег в книге [1]: «геометрическое измерение начинается как **физический** процесс и имеет **метафизическое** продолжение». В предисловии к [1] А. Н. Колмогоров уточнил: «в геометрических измерениях условие сохранения физического смысла математических операций с величинами на метрических шкалах есть **гомоморфизм**».

Система аксиом, лежащих в основе геометрии, является замечательным, концентрированным выражением наших усилий, направленных к познанию действительности».

Другими словами, языку чисел для описания объективной реальности надо учиться, опираясь на физический смысл математических действий с величинами. Но именно искажение прямого смысла слова «измерение» в названиях так называемых «непрямых измерений» – косвенных, совокупных и совместных – причина того, что длительное время без должной нормативно-методической проработки оставалась неадекватность математических моделей объектов измерений.

Показательно, если в МИ 1967-89 «ГСИ. Выбор методов и средств измерений при разработке методик выполнения измерений. Общие положения» отмечалось, что «способы определения методической погрешности измерений, обусловленной неадекватностью принятой модели объекта измерений, относятся к наименее развитым областям метрологии», то в МИ 2091-90 «ГСИ. Измерения физических величин. Общие требования» появилась норма: «погрешность, обусловленная несоответствием модели объекту измерений, не должна превышать 10 % от предела допускаемой погрешности измерений».

Привязка понятия «неадекватности» к погрешности измерения была связана с отсутствием термина «погрешность неадекватности» и его количественного определения в нормативных документах Государственной системы обеспечения единства измерений (ГСИ) до 1998 г. Правда, количественная мера неадекватности в виде статистического распределения или распределения вероятностей (функции компактности [2]) фактически применялась в методе максимума компактности (ММК) в теории обеспечения эксплуатации технических объектов, к надёжности которых предъявлялись повышенные требования. В метрологии же функция компактности нашла применение в Руководящем материале ВНИИМИСП¹ – РМ-88 «Методика назначения сроков очередной аттестации и поверки средств измерений высшей точности в приборостроении».

Термин «погрешность неадекватности» сформировался в ходе Всесоюзной дискуссии по проблемам применимости вероятностно-статистических методов, которая вначале проходила заочно [2–8], а затем продолжилась на Всесоюзном научно-техническом семинаре «Статистическая идентификация, прогнозирование и контроль» [9–12], причём материалом дискуссии стали и работы зарубежных авторов [13–21].

Дискуссия была инициирована вопросом А. Н. Колмогорова об объективном смысле вероятности [22]. Его в ходе дискуссии дополнила Е. С. Вентцель: «на теорию вероятностей нередко смотрят как на своего рода волшебную палочку, позволяющую получать информацию из полного незнания» [23]. Принципиальным стало уточнение ведущих специалистов в области теории планирования эксперимента Ю. П. Адлера, Ю. В. Грановского и Е. В. Марковой: «проверка

адекватности оказывается единственным критерием годности моделей. Все стройное здание построения математической модели может рухнуть, если не выполняются исходные предпосылки, лежащие в основе статистического анализа, такие, как предпосылки о виде законов распределения, однородности дисперсий и т. д.» [24]. Началась же дискуссия научно-методическими замечаниями В. Н. Тутубалина к краткому курсу теории вероятностей [25].

В ходе дискуссии критике в первую очередь подверглись так называемая «нормальная теория», ГОСТ 8.207-76 «ГСИ. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения», а также субъективная и частотная концепции вероятности в совокупности с предельными теоремами теории вероятностей. Предметами критики также стали датчики псевдослучайных чисел, дисперсионный анализ, устойчивость статистических оценок и критерии проверки гипотез. Особой критике было подвергнуто определение адекватности математических моделей по ГОСТ 24026-80 «Планирование эксперимента. Термины и определения», связанное с принимаемым критерием адекватности, как правило, критерием Фишера.

В конце 1980-х гг. были отменены 24 стандарта по статистическим методам из 31 и аннулированы стандарты по прикладной статистике.

В сложившейся ситуации вследствие появления различного рода «современных курсов», «современных методов» или «современных подходов» и т. п., сформировался **вопрос о предмете современной метрологии как науки**. Метрология – наука консервативная, и её обычно рассматривают как науку об измерениях, о методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности. Но, строго говоря, необходимо уточнять, о каких именно измерениях, методах и средствах, о каком единстве идёт речь, и, главное, какие задачи решает метрология. Известно и то, что метрология немыслима без математики, которая выражает коллективный опыт человечества, полученный при познании многообразия физической реальности как единого целого.

Цель настоящей статьи – рассмотреть предмет метрологии с точки зрения определивших её развитие математических результатов.

Предыстория вопроса. Открытие в VI в. до н. э. Пифагором Самосским несоизмеримых отрезков вызвало первый в истории математики кризис. Появились теория иррациональных величин Таэтета Афинского и учение о несоизмеримости Евдокса Книдского, разработавшего в IV в. до н. э. научную основу геометрии – аксиоматику понятия величины. Её обобщил Евклид Александрийский и дополнил аксиомой измеримости в III в. до н. э. Архимед Сиракузский [26]. Понятие же действительного числа было сформулировано только в 1707 г. И. Ньютоном в «Универсальной арифметике»: «Число есть не столько совокупность нескольких единиц, сколько отвлечённое отношение какой-нибудь величины к другой, однородной с ней и принятой за единицу. Число бывает трёх видов: целое, дробное и иррациональное.

¹ ВНИИМИСП – Всесоюзный НИИ метрологии, испытаний и стандартизации в приборостроении.

Целое есть то, что измеряется единицей; дробное – кратное долей единицей; иррациональное число несоизмеримо с единицей». В 1768 г. Л. Эйлер уточнил в «Алгебре»: «При определении или измерении величин всякого рода устанавливается некоторая известная величина этого же рода, именуемая мерой или единицей и зависящая исключительно от нашего произвола. Затем определяется, в каком отношении находится данная величина к этой мере, что всегда выражается через числа, так что число является не чем иным, как отношением, в котором одна величина находится к другой, принятой за единицу». Меры дольных и кратных единиц при построении шкал измерений могут быть получены калибровкой. Аксиоматике системы действительных чисел придан законченный вид аксиомой непрерывности Р. Дедекинда накануне принятия Метрической конвенции. В итоге полнота выполнения аксиом определила классификацию шкал измерений, а их спецификацию – способ калибровки соответствующей системы мер. Создание дифференциального и интегрального исчисления к концу XVII в. И. Ньютоном и Г. Лейбницем [27] дополнило аппарат математического отображения объектов измерений операторными моделями.

Накопленный в астрономии за две с половиной тысячи лет опыт построения математических моделей «системы мира» сформировал понятие *точности* как совпадения расчётных предсказаний модели с измеренным положением небесного светила. Или, другими словами, как совпадения результата вычислений с результатом измерений. Расхождение выражали ошибкой или погрешностью – *числом*. А на рубеже XVIII–XIX вв. благодаря работам по теории вероятностей стало формироваться представление о расхождении результатов вычислений и измерений «с точностью до *распределения вероятностей*».

Проблема неадекватности первоначально была сформулирована количественно в задаче прогнозирования надёжности технических объектов и решена в начале 1980-х гг. в схеме перекрёстного наблюдения *распределением погрешностей предсказания надёжности*, удовлетворяющем требованию компактности [7, с. 187] – методом максимума компактности (ММК) [28].

Проблема неадекватности с точки зрения неполноты описания «уравнения измерения» рассматривалась и в Приложении D [29]. Её решением могла бы стать метрологическая аттестация, но ни математического определения «собственной» неопределённости, «которую, в принципе, можно оценить тем или иным способом» [29, D.3.4, с. 47], ни «того или иного способа» её оценивания указано не было. Позже в Международном словаре 2007 г. [30] эта неопределённость получила название «дефиниционной», была связана с понятием *детализации* и полагалась как «пренебрежимо малая по сравнению с другими составляющими неопределённости измерений». Однако в примечании 2 к [29, D.3.4] всё-таки было отмечено, что «это не всегда будет практично».

Заметим, *детализация* неполного «уравнения измерения» предполагает его усложнение включением дополнительных переменных [29]. Перебор же кодов структуры математической модели и «подробность моделирования» в ММК

допускает также упрощение и, самое главное, существование модели оптимальной сложности для достигнутого уровня точности измерений [28].

Вместе с тем некоторые ведущие метрологи восприняли появление концепции неопределённости измерения как новый этап развития метрологии, и их усилия фактически вылились в терминологический гудок при полном отсутствии каких-либо математических результатов в отношении «неопределённости измерения». Поэтому не удивительно, что после перевода [31] на русский язык и внедрения в отечественную метрологию оригинальной терминологии [29] возник проект кардинальной ревизии [32], который ещё больше скомпрометировал концепцию неопределённости измерения в целом [33].

Актуальные для метрологии математические результаты. Ответ на *вопрос о предмете современной метрологии как науки* даёт анализ хронологии математических результатов, составляющих арсенал методов и средств метрологии для решения измерительных задач и приведенных ниже.

1738 г. – нормальное распределение как предел биномиального распределения при $p=1/2$ [34].

1792 г. – метод наименьших модулей [35].

1794 г. – метод наименьших квадратов (МНК) [36, 37].

Оба метода до сих пор используются в статистических измерительных задачах, причём в силу простоты вычислительной схемы более широко распространён МНК.

1834 г. – *композиция* как функциональное преобразование распределений вероятностей [38] (для линейных моделей она вырождается в свёртку), что стало основой *композиционного подхода* к оцениванию точности.

1894 г. – метод моментов [39]. Оценивание точности решений измерительных задач на основе этого метода получило название моментного подхода. Метод получил широкое распространение благодаря простоте.

1853 г. – теория наилучшего приближения непрерывных функций [40].

1901 г. – центральная предельная теорема теории вероятностей [41]. Теоретическое обоснование «нормального закона» (распределения Гаусса) как предельного соотношения для среднего арифметического при неограниченном увеличении объёма выборки в неизменных условиях измерений.

1914 г. – предпочтительность среднего абсолютного отклонения (САО) перед средним квадратическим отклонением (СКО). Точка зрения А. С. Эддингтона: «Хотя это входит в противоречие с рекомендацией большинства учебников, как нетрудно показать, правильнее пользоваться именно ею» [42, р. 147].

1925 г. – формула обращения для характеристических функций $\chi(t)$ [43]:

$$\frac{F(x+h)-F(x-h)}{2h} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sin(ht)}{ht} e^{-itx} \chi(t) dt,$$

где функция распределения вероятностей $F(x)$ непрерывна в точках $x \pm h$. Формула обращения представляет собой свёртку для суммы независимых случайных величин с распределением $F(x)$ и равномерным распределением на интервале

$[-h, +h]$. Её практическое использование сначала ограничивалось нормальным законом при $h \ll \sigma$, где σ – стандартное отклонение этого закона, когда свёртка «мало отличается от нормальной кривой с дисперсией, равной сумме дисперсий компонент» [44, с. 190], или $\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma^2 + h^2/3}$.

1933 г. – первый прорыв в непараметрической статистике (по выражению Ю. Неймана [18, с. 6]), теорема А. Н. Колмогорова о предельном поведении наибольшего отклонения эмпирической функции распределения от теоретической, называемого статистикой или расстоянием Колмогорова [45, с. 134]:

$$D_* = \sup_{|x| < \infty} |F_{(N)}(x) - F_*(x)|.$$

1942–1945 гг. – оценка вероятности для доли γ неизвестного распределения на размахе вариационного ряда из N членов по крайним порядковым статистикам:

$$\beta = P\{\hat{\xi}_{(1)} \leq \Xi \leq \hat{\xi}_{(N)}\} = 1 - N\gamma^{N-1} + (N-1)\gamma^N,$$

где $0 < \gamma < 1$ [46–48]. При доверительной вероятности $P = \gamma = \{0,90; 0,95; 0,99\}$ объём N выборок, необходимых согласно ГОСТ Р 50779.29-2017 «Статистические методы. Статистическое представление данных. Определение статистических толерантных интервалов» для подтверждения заданного значения P для непрерывных распределений составляет $N = \{38; 93; 662\}$, а при достоверных сведениях об их симметричности – $N_v = \{11; 29; 228\}$.

1945 г. – второй прорыв в непараметрической статистике, открытие ранговых критериев [49].

1949 г. – схема *Jack knife*, прообраз схемы перекрёстного наблюдения [50]. Идея получила развитие в *Cross validation* М. Стоуна [51], в информационном критерии Х. Акаике [52] и в методе *Generalized cross validation* Г. Уабы [53].

1956 г. – открытие ядерных оценок плотности распределения вероятностей [54, 55].

1960 г. – схема «ε-загрязнения» разрешила спор о CAO/СКО между А. С. Эддингтоном и Р. А. Фишером [56] в пользу робастной статистики [57].

1963 г. – третий прорыв в непараметрической статистике, использование ранговых критериев для оценивания неизвестных параметров [58].

1966 г. – выделение теории измерительных задач из теории измерений в специальный раздел теоретической метрологии [59].

1968 г. – метод группового учёта аргументов (МГУА) с контрольным окном 1/2 в схеме перекрёстного наблюдения [60].

1971 г. – расстояние по вариации между плотностями распределений вероятностей $f(x)$ и $f_*(x)$ по аналогии с расстоянием Колмогорова [61, с. 327]:

$$\rho(F, F_*) = \int_{-\infty}^{+\infty} |f(x) - f_*(x)| dx.$$

1976 г. – границы неисключённой систематической погрешности при равномерном распределении её составляющих «путём построения композиции» согласно ГОСТ 8.207-76 «ГСИ.

Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения»:

$$\Theta = k \sqrt{\sum_{i=1}^m \Theta_i^2},$$

где « Θ_i – граница i -й неисключённой систематической погрешности; k – коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью. Коэффициент k принимают равным 1,1 при доверительной вероятности $P = 0,95$.»

1979 г. – метод *Boot strap* как обобщение схемы *Jack knife* на случайный выбор удаляемых членов статистического ряда [62].

1982 г. – ММК с распределением погрешностей экстраполяции идентифицируемой математической модели на контрольную часть выборки данных совместных измерений в схеме перекрёстного наблюдения с контрольным окном 1/2 в качестве критерия идентификации [28].

1983 г. – теорема о связи æ-критерия (вероятности согласия) с расстоянием Колмогорова и расстоянием по вариации Фёллера [63, с. 15]:

$$\begin{aligned} \text{æ}_{\Psi_1 \Psi_2} &\equiv \int_{-\infty}^{+\infty} \inf_f \{f_{\Psi_1}(\psi), f_{\Psi_2}(\psi)\} d\psi \equiv 1 - \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} |f(x) - f_*(x)| dx \equiv \\ &\equiv 1 - \sum_{m=1}^M (-1)^{m-1} |F(\xi_m) - F_*(\xi_m)|. \end{aligned}$$

1984 г. – в качестве модели погрешности в ГОСТ 8.009-84 «ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений» принята свёртка (объединение) распределений составляющих.

1988 г. – схема перекрёстного наблюдения с контрольным окном $(M+1)^{-1}$ для модели объекта измерений с M параметрами при проверке гипотез вырожденности H_0 , непрерывности H_{00} и композиционной однородности H_{000} [8].

2000 г. – общая схема структурно-параметрической идентификации объектов измерений как логика статистического вывода по критерию максимума воспроизводимости или минимума погрешности неадекватности регламентирована Р 50.2.004-2000 «ГСИ. Определение характеристик математических моделей зависимостей между физическими величинами. Основные положения».

2004 г. – контурная оценка неадекватности функции распределения $F(x)$ по статистикам Смирнова и обобщённой формуле обращения

$$f(x) * f_R(x) = \frac{F(x-a) - F(x-b)}{b-a},$$

где $F(x)$ представляет наблюдаемую составляющую результата решения измерительной задачи, а интервал $[a, b]$ – сумму ненаблюдаемых составляющих. Методика контурного оценивания в расчётах точности и достоверности контрольных испытаний регламентирована МИ 2916-2005 «ГСИ. Идентификация распределений вероятностей при решении измерительных задач».

Заметим, эти результаты в рамках композиционного подхода к оцениванию точности позволили оценить неадекватность математических моделей объектов измерений при их идентификации по данным совместных измерений.

А на чем же основана «неопределённость» оценок?

Математика «неопределённости измерения». Казалось бы, теперь следовало бы привести перечень математических результатов, на которых основан моментный подход концепции неопределённости измерения [29], и сравнить.

Однако можно поступить радикально иначе.

Если из «Руководства по выражению неопределённости измерения» полностью удалить текст, то «математический остаток» не представит собой никакой загадки для любого грамотного специалиста. Это значит, что концепция неопределённости никаких новых математических результатов не содержит!

Это – попытка выдать подмену «безопасных» терминов математической статистики «реалистическими» псевдотерминами концепции неопределённости измерения за новый этап развития метрологии. Об этом предупреждали ведущие метрологи России [64–66], в том числе еще и до появления перевода [31]: «пришлось бы “переделать” сотни тысяч, миллионы документов, требующих выражения результатов измерений с той или иной погрешностью» [64, с. 183].

«Переделкой» никто серьёзно не занялся, а в новых нормативных документах «неопределённость измерения» стала тривиальной сменой названий.

Заключение. Приведённый перечень математических результатов показывает, что предмет метрологии, арсенал её методов и средств, последние двести пятьдесят лет непрерывно расширяется, как в рамках композиционного, так и в рамках моментного подхода. Однако по «странному» совпадению в ходе Всесоюзной дискуссии 1970–1990 гг. по проблемам применимости вероятностно-статистических методов критике подверглись математические результаты, составившие впоследствии основу руководства [31] и его приложений. Это были так называемые «нормальная теория», субъективная концепция вероятности, предельные теоремы теории вероятностей, проблема датчиков псевдослучайных чисел в методе Монте-Карло, дисперсионный анализ, проблема устойчивости статистических оценок и т. д. На этот же период в практику теории надёжности и метрологии пришлось широкое внедрение персональных компьютеров, и одним из его инициаторов был профессор Л. К. Горский – главный инженер НИЦ СНПО «Алгоритм» ВО «СОЮЗЭВМКОМПЛЕКС». Персональные компьютеры оказались средством решения одной из важнейших проблем метрологии – проблемы неадекватности математических моделей объектов измерений. Концептуально её решение определил переход от *синонимии измерений и вычислений* к принципу **единства результатов измерений и результатов вычислений**.

Наложением на эти события «катастрофического феномена 1985–1986 гг.» [9, 67] следовало бы воспользоваться для корректировки вошедшего в противоречие с математическими результатами термина *измерение* так, как это сделано в Рекомендации Р 50.2004-2000. Два шага в этом направлении сделаны ВНИИМ имени Д. И. Менделеева в РМГ 29-99 и РМГ 29-2013

«ГСИ. Метрология. Основные термины и определения» в примечаниях к термину **прямое измерение**: «Строго говоря, измерение всегда прямое» и «В основу разделения измерений на прямые, косвенные, совместные и совокупные может быть положен вид модели измерений». Промежуточным шагом ВНИИМ было предложение распространить положения Рекомендации Р 50.2004-2000 на «математическое обеспечение, вычислительные и программные средства, в том числе поставляемые отдельно, характеристики которых документированы производителем или разработчиком». В то же время недоступным для Международного словаря VIM3 [30] оказалось то, что удалось сделать в РМГ 83-2007 «ГСИ. Шкалы измерений. Термины и определения» для уточнения термина *измерение*:

«2.1.1 **шкала (измерений)**: Отображение множества различных проявлений количественного ... свойства на ... упорядоченное множество чисел...

2.4.4 **измерение**: Сравнение конкретного проявления измеряемого свойства ... со шкалой ... измерений этого свойства (величины)».

Таким образом, непрерывное совершенствование математических результатов, используемых в метрологии, с точки зрения математики как универсального языка науки привело к уточнению собственно предмета метрологии.

Современная метрология представляет собой фундаментальную науку о методах и средствах наиболее объективного отображения свойств объектов измерений математическими моделями. Простейшими моделями являются величины или распределения их значений, а более сложными – случайные функции, функционалы и операторы. К средствам отображения, кроме средств измерений, относятся средства вычислительной техники с соответствующим математическим, алгоритмическим и программным обеспечением для решения измерительных задач. Именно применение этих методов и средств метрологии в сочетании с проверкой на неадекватность составляют количественную основу других наук, без чего усилия в рамках этих наук, «направленные к познанию действительности», оказываются малоэффективными.

Искусственное присоединение метрологии в качестве вспомогательной дисциплины к другим наукам затеняет ведущую роль метрологического обеспечения этих наук. А ведь основной целью Федерального закона «Об обеспечении единства измерений» является защита прав и законных интересов граждан, общества и государства от отрицательных последствий недостоверности результатов измерений. Метрологический инструмент этой защиты – нормы доверительной вероятности, установленные государственными поверочными схемами, подтверждённые при поверке, обеспеченные при калибровке средств измерений, а также при метрологической аттестации методик решения измерительных задач, включая их математическое и программное обеспечение!

В связи с вышеизложенным можно понять возникающие сложности при подготовке и повышении квалификации специалистов-метрологов, о чём чётко указано в Распоряжении Правительства Российской Федерации № 737-р от 19.04.2017 г. «Об утверждении Стратегии обеспечения единства измерений в Российской Федерации до 2025 года»: «Начиная с последнего

десятилетия прошлого столетия, не происходит качественного повышения уровня профессиональной подготовки специалистов в области обеспечения единства измерений. Одновременно уменьшается число квалифицированных специалистов-метрологов. Это касается специалистов всех уровней – от техников до профессорско-преподавательского состава».

Выход из этого положения уже наметился: переход на новые учебные программы по специальности «Метрология и метрологическое обеспечение», повышение квалификации профессорско-преподавательского состава и компьютеризация (цифровизация) метрологической деятельности на основе решения прикладных проблем неадекватности для математических моделей объектов.

Список источников/References

1. Лебег А. Об измерении величин: Пер. с фр. Кисловской-Карской О. И. под ред. и с предисловием А. Н. Колмогорова. М.: Госучпедгиз, 1938. 216 с.
2. Вопросы кибернетики, ВК-94: Статистические методы в теории обеспечения эксплуатации / Под ред. С. Ф. Левина. М.: Научный совет по комплексной проблеме «Кибернетика» АН СССР, 1982. 152 с.
3. Налимов В. В. Вероятностная модель языка: О соотношении естественных и искусственных языков. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1979. 304 с.
4. Алимов Ю. И. Альтернатива методу математической статистики. М.: Знание, 1980. 64 с.
5. Алимов Ю. И. О практической ценности теории оценок // Автоматика. 1981. № 2. С. 84–94.
6. Эльясберг П. Е. Измерительная информация: сколько её нужно? Как её обрабатывать? М.: Наука, 1983. 400 с.
7. Новицкий П. В., Зограф И. А. Оценка погрешностей результатов измерений. Л.: Энергоатомиздат, 1985. 248 с.
8. Левин С. Ф., Блинов А. П. Научно-методическое обеспечение гарантированности решения метрологических задач вероятностно-статистическими методами // Измерительная техника. 1988. № 12. С. 5–8.
9. Гарантированность программ обеспечения эксплуатации техники. Методические рекомендации. Киев: Знание, 1989. 24 с.
10. Статистическая идентификация, прогнозирование и контроль. Методические рекомендации. М.: МО СССР, 1990. 80 с.
11. Статистическая идентификация, прогнозирование и контроль // Тезисы докладов 2-го Всесоюзного научно-технического семинара. Севастополь, 4–6 сентября 1991. Севастополь: Знание, 1991. 78 с.
12. Контроль технических объектов по аварийным и определяющим параметрам. Методические рекомендации. Киев: Знание, 1992. 24 с.
13. Scheffe H., *The Analysis of Variance*, New York, John Wiley & Sons, 1959, 477 p.
14. Korn G. A., Korn T. M., *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers*, New York, McGRAW-Hill Book Company, 1961, 1509 p.
15. *Classification and Clustering, Proceedings of an Advanced Seminar conducted by the Mathematics Research Center*, the

University of Wisconsin-Madison, May 3–5 1976, ed. J. Van Ryzin, New York, Academic Press, 1977, 467 p.

16. Runion R. P., *Nonparametric Statistics: A Contemporary Approach*, Addison-Wesley Publishing Company, 1977, 199 p.
17. Mosteller F., Tukey J. W., *Data Analysis and Regression: A second course in statistics*, Massachusetts, USA, Addison-Wesley, 1977, 588 p.
18. Hollander M., Wolfe D. A., *Nonparametric Statistical Methods*, New York, John Wiley & Sons, 1999, 787 p.
19. Huber P., *Robust Statistics*, New York, John Wiley & Sons, 1981, 317 p.
20. Вучков И., Бояджиева Л., Солаков Е. Прикладной линейный регрессионный анализ: Пер. с болг. Ю. П. Адлера. М.: Финансы и статистика, 1987. 239 с.
21. Hampel F. R., Ronchetti E. M., Rousseeuw P. J., Stahel W. A., *Robust Statistics: The Approach Based on Influence Functions*, New York, John Wiley & Sons, 1986, 526 p.
22. Колмогоров А. Н. Реальный смысл результатов анализа // Труды II Всесоюзного совещания по математической статистике. Ташкент, 27 сентября – 2 октября 1948. Ташкент: Изд-во АН УзССР, 1949 г. С. 240–268.
23. Вентцель Е. С. Методологические особенности математики на современном этапе // Сборник Математики о математике. М.: Знание, 1982. С. 37–55.
24. Адлер Ю. П., Грановский Ю. В., Маркова Е. В. Теория эксперимента: прошлое, настоящее, будущее. М.: Знание, 1982.
25. Тутубалин В. Н. Теория вероятностей: Краткий курс и научно-методические замечания. М.: Изд-во Московского университета, 1972. 231 с.
26. Математическая энциклопедия. В 5 т. / Гл. ред. И. М. Виноградов. Т. 1. А–Г. М.: Советская энциклопедия, 1977. 1152 стб.
27. Математическая энциклопедия. В 5 т. / Гл. ред. И. М. Виноградов. Т. 2. Д–Коо. М.: Советская энциклопедия, 1979. 1104 стб.
28. Вопросы кибернетики, ВК-94: Статистический анализ систем обеспечения эксплуатации технических объектов / Под ред. С. Ф. Левина. М.: Научный совет по комплексной проблеме «Кибернетика» АН СССР, 1982. С. 105–122.
29. Руководство по выражению неопределённости измерения: Пер. с англ. / Науч. редактор проф. В. А. Слаев. СПб.: ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, 1999. 135 с.
30. International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms, VIM, 3rd edition, 2007, 146 p.
31. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement: First edition, ISO, Switzerland, 1993, 101 p.
32. Bich W. et al., *Metrologia*, 2012, vol. 49 (6), pp. 702–705. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/49/6/702>
33. Левин С. Ф. Принцип Ньютона-Эйлера, концепции вероятности и Руководство по выражению неопределённости измерения // Сборник докладов XIII Международного научно-технического семинара «Неопределённость измерений: научные, законодательные, методические и прикладные аспекты» (УМ-2016), Минск, Республика Беларусь, 13–14 апреля 2016. Минск: БелГИМ, 2016. С. 78–81.
34. Moivre A. de, *The Doctrine of Chances*, London, Wood full, 1738, 258 p.

35. Laplace P., *Oeuvres complètes*, vol. 14, Paris, Gauthier-Villars, 1878, 490 p. (In Fr.)
36. Гаусс К. Ф. Избранные геодезические сочинения. Т. 1. Способ наименьших квадратов: Пер. с лат. и нем. Н. Ф. Булаевского под ред. и с введением Г. В. Багратуни. М.: Изд-во геодезической литературы, 1957. 153 с.
37. Legendre A. M., *Nouvelles méthodes pour la détermination des orbites des comètes*, Paris, F. Didot, 1805. 80 p. (In Fr.)
38. Jacobi C. G. J., De Determinantibus functionalibus, *Journal für reine und angewandte Mathematik*, 1841, bd. 22, ss. 319–359. (In Lat.)
39. Pearson K., Contributions to the Mathematical Theory of Evolution, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1894, vol. A, pp. 71–110.
40. Чебышёв П. Л. Избранные труды. М.: Изд-во Академии наук, 1955. 923 с.
41. Lyapunov A. M., Une proposition générale du calcul de probabilités, *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, 1901, vol. 132, pp. 814–815. (In Fr.)
42. Eddington A. S., *Stellar Movements and the Structure of the Universe*, London, Macmillan, 1914, 291 p.
43. Lévy P., *Calcul des probabilités*, Paris, Gauthier-Villars, 1925, 350 p. (In Fr.)
44. Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений: Учебное пособие для высших технических учебных заведений. Изд. 3-е, стереотип. М.: Наука, 1969. 512 с.
45. Колмогоров А. Н. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Наука, 1986. С. 134–141.
46. Wilks S. S., Statistical prediction with special reference to the problem of tolerance limits, *Annals of Mathematical Statistics*, 1942, vol. 13, pp. 400–409.
47. Robbins H., On distribution-free tolerance limits in random sampling, *Annals of Mathematical Statistics*, 1944, vol. 15, pp. 214–216.
48. Scheffé H., Tukey J. W., Nonparametric estimation. I. Validation of order statistics, *Annals of Mathematical Statistics*, 1945, vol. 16, pp. 187–192.
49. Wilcoxon F., Individual comparisons by ranking methods, *Biometrics*, 1945, vol. 1, pp. 80–83.
50. Quenouille M. H., Approximate tests of correlation in time-series, *Journal of Royal Statistical Society*, 1949, no. B 11, pp. 68–84.
51. Stone M. Cross-validated choice and assessment of statistical prediction, *Journal of Royal Statistical Society, Series B*, 1974, vol. 36, no 2, pp. 111–147.
52. Akaike H., New Look at the Statistical Model Identification, *IEEE Trans. Autom. Control*, 1974, vol. AC-19, pp. 716–723.
53. Wahba G., Spline bases, regularization, and generalized cross validation for solving approximation problems with large quantities of noisy data, *Proceedings of the International Conference on "Approximation Theory III"*, ed. W. Cheney, New York, Academic Press, 1980, p. 905–912.
54. Rosenblatt M., *Annals of Mathematic Statistic*, 1956, vol. 27 (3), pp. 832–837. <https://doi.org/10.1214/aoms/11777281901956>
55. Parzen E., *Annals of Mathematic Statistic*, 1962, vol. 33 (3), pp. 1065–1076. <https://doi.org/10.1214/aoms/1177704472>
56. Fisher R. A., *Monthly Notice Royal Astronomical Society*, 1920, vol. 80, pp. 758–770. <https://doi.org/10.1093/MNRAS/80.8.758>
57. Tukey J. W., A survey of sampling from contaminated distributions, *Contributions to Probability and Statistics*, ed. I. Olkin, Stanford, Stanford University Press, 1960, pp. 448–485.
58. Hodges J. L.-Jr., Lehmann E. L., *Annals of Mathematic Statistic*, 1963, vol. 34 (2), pp. 598–611. <https://doi.org/10.1214/aoms/1177704172>
59. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. Изд. второе, исправленное и дополненное. М.: Физматгиз, 1962. 352 с.
60. Ивахненко А. Г. Метод группового учёта аргументов – конкурент метода стохастической аппроксимации // Автоматика. 1968. № 3. С. 58–72.
61. Feller W., *An Introduction to Probability theory and its Applications*, in 2 vols, vol. II, sec. ed., New York-London-Sydney-Toronto, John Wiley & Sons, 1971.
62. Efron B., Bootstrap methods: another look at the jackknife, *The Annals of Statistics*, 1979, vol. 7, no 1, pp. 1–26.
63. Левин С. Ф. Основы теории контроля. М.: МО СССР, 1983. 52 с.
64. Кузнецов В. А., Ялунина Г. В. Метрология (теоретические, прикладные и законодательные основы): Учебное пособие. М.: Изд-во стандартов, 1998. 336 с.
65. Кузнецов В. А., Ялунина Г. В. Общая метрология. М.: Изд-во стандартов, 2001. 272 с.
66. Кузнецов В. А., Исаев Л. К., Шайко И. А. Метрология / Под ред. В. А. Кузнецова. М.: Стандартиформ, 2005. 297 с.
67. Fritsch O., Santamaria J., Aviation safety – a review of the 1985 record, *ICAO Bulletin*, 1988, vol. 41, no 10, pp. 15–17.

Статья поступила в редакцию 01.04.2022; одобрена после рецензирования 06.04.2022; принята к публикации 11.04.2022.
The article was submitted 01.04.2022; approved after reviewing 06.04.2022; accepted for publication 11.04.2022.