

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-7-78-86>

НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ: КАЧЕСТВЕННЫЙ И КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АСПЕКТЫ

© Евгений Юрьевич Колесников

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; e-mail: e.konik@list.ru

*Статья поступила 24 января 2023 г. Поступила после доработки 23 февраля 2023 г.
Принята к публикации 30 марта 2023 г.*

Проведен анализ понятия неопределенности, его происхождения, толкования в различных научных областях, источников неопределенности, качественного и количественного аспектов данного понятия, а также подходов к количественной оценке неопределенности. Используются методы исторического и сравнительного анализов. Показана необходимость учета наличия и количественной оценки неопределенности результатов математического моделирования объектов и явлений окружающего мира аналогично тому, как это делается при оценке измерительной неопределенности результатов экспериментальных исследований. Сделан вывод о том, что наиболее перспективным представляется интервальный подход к оценке неопределенности результатов моделирования. Понятие неопределенности, впервые предложенное в начале прошлого века, означало неполноту или несовершенство имеющейся информации. Долгое время это понятие имело лишь качественный аспект. Во второй половине XX века, практически одновременно с развитием риск-ориентированного подхода в сфере техногенной безопасности, возник интерес к пониманию неопределенности, ее происхождению и типизации. Приданию неопределенности количественного аспекта мы обязаны метрологии, в которой вместо парадигмы погрешности измерения была разработана парадигма измерительной неопределенности, предложены подходы (отчасти спорные) к ее количественной оценке. Неопределенность — атрибут результата любого исследования, полученного экспериментально или теоретическим методом (обычно математическим моделированием). В области экспериментальных исследований указание интервала неопределенности результата давно уже является научным стандартом и рутинной. Пришло время сделать это обязательным и для результатов теоретических исследований. К настоящему времени разработаны три альтернативных метода количественной оценки неопределенности — вероятностный, нечеткий и интервальный. В современном интервальном анализе разработаны методы нивелирования негативных особенностей его первоначальной, «наивной» версии. Интервальный анализ представляется сегодня наиболее перспективным методом количественной оценки неопределенности результатов математического моделирования.

Ключевые слова: неопределенность; качественный и количественный аспекты; количественная оценка неопределенности; вероятностная; нечеткая и интервальная постановки.

UNCERTAINTY: QUALITATIVE AND QUANTITATIVE ASPECTS

© Eugeny Yu. Kolesnikov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic university, 29, Politekhnikeskaya ul., St. Petersburg, 195251, Russia; e-mail: e.konik@list.ru

Received January 24, 2023. Revised February 23, 2023. Accepted March 30, 2023.

The analysis the concept of uncertainty, its origin, interpretation in various scientific fields, sources of uncertainty, qualitative and quantitative aspects of this concept, as well as approaches to quantifying uncertainty are presented. Methods of historical and comparative analysis were used in the study. The main conclusion is the necessity of taking into account the presence of uncertainty and quantification of uncertainty of the results of mathematical modeling of objects and phenomena of the surrounding world in the same way as we do when assessing measurement uncertainty of experimental data. It is shown that the interval approach to estimating uncertainty of modeling results currently seems to be the most promising. The concept of uncertainty first proposed at the beginning of the last century refers to epistemic situations involving imperfect or unknown information. This concept had only a qualitative aspect for a long time. In the second half of the twentieth century, almost simultaneously with the development of a risk-based approach in the field of technological security, there was an interest in understanding uncertainty, its origin and typification. We are indebted to metrology for giving uncertainty a quantitative aspect, in which, instead of the measurement error paradigm, a measurement uncertainty paradigm was

developed, and approaches (partly controversial) to its quantitative assessment were proposed. Uncertainty is an attribute of any data obtained both experimentally or theoretically (currently, usually by mathematical modeling). In the field of experimental research, specifying the uncertainty interval of the result has long been a scientific standard and routine. The time has come to make it mandatory for the results of theoretical research. To date, three alternative methods of quantitative estimation of uncertainty have been developed: probabilistic, fuzzy and interval methods. Methods for leveling the negative features of its initial “naive” version have been proposed in modern interval analysis. It seems to be the most promising method of quantifying uncertainty of the results of mathematical modeling today.

Keywords: uncertainty; qualitative and quantitative aspects; quantitative uncertainty assessment; probabilistic; fuzzy and interval statements.

Введение

По некоторым сведениям, впервые в научный оборот понятие «неопределенность» ввел американский экономист Аллан Уиллет (Allan Willet) в своей диссертации, датированной 1901 годом. До недавнего времени оно использовалось преимущественно в экономических науках («хозяйствование в условиях неопределенности»). Это означало, что рыночная стихия с присущей ей непредсказуемостью внешних и внутренних условий создавала определенные сложности для прогнозирования экономической деятельности предприятия в долгосрочной и среднесрочной перспективах, а также при реализации инвестиционных проектов. Понятие «неопределенность» не входило в глоссарий классической науки, свидетельством чему является отсутствие соответствующих словарных статей энциклопедий (Философской, Большой Советской и др.).

В последнее время интерес к изучению неопределенности растет, о чем красноречиво свидетельствует увеличение числа научных публикаций о различных ее аспектах во всем мире, в том числе и на русском языке. Более современные толковые словари и википедия (eng) дают следующие толкования понятия «неопределенность»:

отсутствие или недостаток определения, информации о чем-либо;

осознание недостатка знаний о текущих событиях или о будущих возможностях;

недостаточность сведений об условиях, в которых будет протекать экономическая деятельность, низкая степень предсказуемости, предвидения этих условий;

«неопределенность характеризует ситуации, связанные с несовершенной или неизвестной информацией; она относится как к предсказаниям будущих событий, так и к уже выполненным физическим измерениям».

Неопределенность как неполное, неточное знание возникает либо в частично наблюдаемой, либо изменяющейся непредсказуемым образом (стохастической) среде (wikipedia.org) [1].

Все приведенные дефиниции указывают на ключевое содержание данного понятия — харак-

теристику либо нашей недостаточной информированности о качественной оценке, величине количественного параметра объекта, либо размытости, нечеткости их трактовок (формулировок). Второе даже при видимой точности оценок на самом деле ведет к интервалу значений. О природе и источниках неопределенности речь пойдет ниже. Наиболее полно некоторые виды неопределенности (терминологическая, эпистемическая, стохастическая, измерительная) упомянуты в англоязычной версии википедии.

Сразу поясним, что понятие «стохастический» означает принципиальную непредсказуемость, индетерминизм. Причем стохастический — не синоним случайного, последнее является лишь частным случаем первого. Это происходит оттого, что понятие «случайного» непосредственно связано с понятием «вероятности». О случайном (явлении, процессе, величине) можно обоснованно говорить лишь в ситуациях, когда имеется статистическая устойчивость ключевых параметров, для которых характерно соблюдение некоторых законов распределения вероятности. К сожалению, это слишком часто упускают из виду и стохастические явления, величины необоснованно называют случайными.

Корни длительного игнорирования феномена неопределенности в науке следует, по-видимому, искать в двух парадигмах:

а) точечных чисел, используемых для количественного выражения величины любых параметров;

б) детерминистического подхода.

До недавнего времени эти парадигмы не имели альтернатив.

На практике почти для любых объектов или явлений реального мира характерен некоторый разброс величин их параметров (либо в силу изменчивости их свойств с течением времени, либо от экземпляра к экземпляру в некоторой выборке им подобных). Долгое время величины этих параметров привычно задавали точечными числами. Позднее с учетом величины исходных параметров задачи, с помощью открытых законов классического естествознания в аналитической форме стали рассчитывать значения интересую-

щих параметров, разумеется, в той же точечной постановке. Именно таким способом долгое время решалась основная задача науки — получить более полное и точное априорное знание об объекте и предмете исследования.

О природе, источниках и типах неопределенности

Итак, феномен неопределенности заключается в недостаточном, несовершенном знании об объекте исследования и его свойствах. Покажем, что неопределенность является атрибутом любого научного результата.

Рассмотрим происхождение неопределенности. В научном сообществе в целом сложился некоторый консенсус — принято различать два принципиально различных ее источника, которые в разных «школах» (или подходах) обозначаются различными терминами, но, по сути, означают одно и то же. По-видимому, впервые это было сделано в отчете МАГАТЭ № 100 серии «Безопасность» [2]. Первый источник связан с объективной изменчивостью (вариабельностью) со временем или в пространстве свойств изучаемого(ых) объекта(ов) и его(их) окружения, оказывающих влияние на объект(ы) — в скобках указана ситуация, когда объектом изучения является некоторая совокупность (выборка) относительно однородных объектов (типичным примером является изменчивость температуры атмосферного воздуха в заданном месте в течение суток).

Второй источник обусловлен субъективным фактором — недостаточностью (неполнотой, неточностью, неоднозначностью) имеющихся знаний об их свойствах, не позволяющей точно описать и спрогнозировать поведение объекта и возможные изменения в нем. Как известно, информация об объекте и его параметрах в ходе научного исследования может быть получена:

экспериментальным путем, тогда она будет обладать принципиально неустранимой измерительной неопределенностью (об этом — ниже);

теоретическим способом — с помощью математического или иного моделирования; следует понимать, что любое моделирование всегда сопровождается неопределенностью параметрического, модельного и вычислительного типов (об этом — ниже);

в результате литературного поиска — методами аналогии, статистического анализа, каждому из которых присущ свой тип неопределенности;

привлечением экспертных суждений, неопределенность которых очевидна и наиболее сложна с точки зрения своей количественной оценки.

Источник неопределенности, названный первым, в одном из подходов принято называть стохастическим (stochastic); в альтернативном

подходе, развиваемом US EPA и US NRC, он традиционно обозначается терминами «вариабельность, изменчивость».

Источник второго типа, связанный с состоянием знания, в первом подходе сначала был назван «эпистимологическим» (epistemological), т.е. связанным с процессом познания (его название со временем сократилось до эпистемического (epistemic), а во втором — просто «неопределенностью».

Отчет МАГАТЭ подчеркивает принципиальное различие двух названных источников неопределенности — если стохастическая неопределенность объективна, поскольку создается объективной вариабельностью Природы, то эпистемическая, напротив, субъективна, она характеризуется альтернативностью, обусловленной качеством доступной субъекту информации.

Второе важнейшее различие между двумя этими источниками неопределенности заключается в том, что стохастическая неопределенность неустранима принципиально, а эпистемическая может быть уменьшена при получении новой информации, усовершенствовании модели, выполнении более точных расчетов или просто уточнением формулировок (это невозможно в случае полного незнания, когда мы даже не догадываемся о том, что не знаем). Очевидно, что в подобной ситуации эпистемическая неопределенность является принципиально не только неоцениваемой, но и неустранимой. В [3] для этого типа неопределенности предложен специальный термин «indeterminacy» (неопределимость). Кроме того, как указывает А. И. Кравченко [4], существует предельная неустранимая эпистемическая неопределенность, обусловленная семантикой языка, принципиальной невозможностью определить понятийный аппарат любой научной области, поскольку на каком-то уровне мы вынуждены апеллировать к интуитивно понимаемым базовым понятиям.

Обратимся теперь к вопросу, какие типы неопределенности содержит результат научного исследования в зависимости от способа его получения.

Экспериментальный метод. В современной метрологии (науке об измерениях) взамен традиционного понятия погрешности появилось понятие измерительной неопределенности, характеризующей точность результатов измерений. Это произошло в конце 70-х – начале 80-х годов прошлого века, когда в науке возник кризис традиционной парадигмы, связанной с понятием погрешности измерений. Как известно, согласно каноническому определению погрешность измерения есть не что иное как разница между результатом измерения и истинным значением величины. Долгое время это толкование всех

устраивало, однако с некоторых пор части научного сообщества стало не вполне понятно, чему, собственно, равно это «истинное» значение величины и как его получить.

Ввиду отсутствия международного единства по вопросу выражения неопределенности измерений в 1978 г. в Международном бюро мер и весов (МБМВ) была подготовлена подробная анкета и разослана национальным метрологическим лабораториям 32 стран и пяти международным организациям. На основании ответов, полученных от 21 страны, специальная рабочая группа МБМВ подготовила рекомендацию INC-1 [5], в которой сформулировала принципы Руководства по выражению измерительной неопределенности (GUM) [6].

Предложенный подход впоследствии поддержали семь наиболее авторитетных научных организаций:

Международное бюро мер и весов (BIPM);

Международная организация по стандартизации (ISO);

Международная электротехническая комиссия (IEC);

Международный союз по чистой и прикладной химии (IUPAC);

Международный союз по чистой и прикладной физике (IUPAP);

Международная организация законодательной метрологии (OIML);

Международная федерация клинической химии (IFCC).

Согласно последнему, третьему изданию Международного словаря по метрологии (VIM, 2008) [7], «неопределенность измерения — это неотрицательная величина, характеризующая рассеивание результатов измерения, которая может быть обоснованно приписана измеряемой величине на основании используемой информации».

Подчеркнем, что понятие измерительной неопределенности не упразднило полностью прежнее понятие погрешности измерения — отечественный нормативный документ по метрологии РМГ 91–2009 [8] назвал два особых вида измерительной задачи, в которых понятие «погрешность» по-прежнему может использоваться:

1) когда «истинное» значение измеряемой величины принято на основании соглашения (например, величина скорости света в вакууме принята решением генеральной конференции по мерам и весам);

2) при метрологической поверке средства измерения, когда в качестве истинного принимаются показания эталонного прибора.

Во всех остальных случаях рассеивание экспериментальных данных следует характери-

зовать величиной измерительной неопределенности.

Согласно последнему (третьему) изданию GUM [9] существуют два типа измерительной неопределенности: тип А — статистической природы; тип В — нестатистической.

Ситуация с неопределенностью типа А традиционна и относительно проста, для ее количественной характеристики (величиной дисперсии или стандартного отклонения) достаточно статистики экспериментальных данных. Подход GUM к выражению неопределенности типа В (эпистемической) менее очевиден — данное Руководство предложило ее также оценивать в вероятностной постановке, приписывая ей некоторое стандартное отклонение ... Неудивительно, что далеко не все в научном мире с этим согласны. По ряду причин [9] измерительная неопределенность неустраима в принципе, поэтому ею обладает результат любого измерения.

Одна из новелл подхода GUM к выражению точности измерительной задачи заключалась в том, что понятию неопределенности наряду с традиционным качественным аспектом, идентифицированным еще Уиллетом, придан количественный аспект и, кроме того, предложен способ (хотя и не бесспорный) его оценки.

Теоретический метод. В настоящее время теоретическое исследование по большей части заключается в моделировании, т.е. научном методе, основанном на изучении поведения некоего объекта (модели), который по ряду своих свойств соответствует объекту-оригиналу. Наиболее популярно математическое моделирование, заключающееся в решении системы математических уравнений, описывающих взаимоотношения между входными и выходными параметрами модели объекта и его окружения. Суть любого вычислительного эксперимента:

а) присвоение входным параметрам математической модели определенных значений;

б) выполнения расчета (обычно приближенными методами на ЭВМ);

в) получение значений выходных параметров.

Анализ показывает [10], что результаты математического моделирования сопровождаются следующими типами неопределенности: модельной и параметрической.

Модельная неопределенность является разновидностью эпистемической. Ее наличие у результата моделирования обусловлено тем, что всякая модель:

упрощает реальный объект;

не учитывает (явно или неявно, осознанно или нет) некоторые влияющие факторы;

имеет ограниченную область применимости.

Модельная неопределенность может быть уменьшена по величине, но принципиально неустранима, несводима к нулю. Как указано в работе [7], в которой введено понятие принципиально неустранимой «внутренней» (definitional or intrinsic) неопределенности, возникновение ее связано с тем, что вместо реальных объектов при моделировании оперируют их упрощенными образами. Внутренняя неопределенность есть тот предел, та минимальная величина неопределенности, которая может быть достигнута при любых измерениях или расчетах.

Как известно, используемые при моделировании модели могут быть в большей или меньшей степени полны и адекватны, поэтому как неполнота, так и неадекватность модели — это источники модельной неопределенности. Полноту модели характеризует учтенное в ней количество факторов, способных оказывать влияние на поведение моделируемого объекта. В зависимости от того, насколько существенно игнорируемые моделью факторы влияют на его поведение, результат моделирования будет в большей или меньшей степени отличаться от поведения объекта. Кроме того, хорошая модель должна учитывать, что на реальные объекты всегда оказывают влияние внешние (а часто и внутренние) факторы стохастической природы.

Адекватность модели — понятие более концептуального порядка. Адекватность моделей, описывающих поведение объектов и явления в техносфере, связана с тем, насколько правильно отражена в них физическая сущность моделируемых объектов и явлений.

Согласно современным представлениям, адекватность и полнота модели проверяются в процессе ее верификации. В то же время с точки зрения практического использования важнее результаты валидации модели, в ходе которой ее предсказания сравнивают с результатами соответствующего эксперимента, за которым всегда остается последнее слово в оценке модели.

Важно представлять область применимости модели, поскольку любая модель построена на ряде некоторых принципов, закономерностей, допущений, справедливых (по крайней мере валидированных) в ограниченной области значений своих параметров. Вполне может случиться, что данные закономерности будут выполняться и вне границ установленной области применимости, но это не может быть гарантировано. Следовательно, еще одним источником модельной неопределенности может быть использование модели за рамками области ее применимости [11].

Использование в моделях различных подходов к описанию моделируемых физических явлений, учет в них различного числа действующих факторов и другое в совокупности создают часто

встречающуюся ситуацию альтернативности, когда для описания одно и того же явления предложено множество (порой десятки) различных моделей. Таким образом, именно модельная разновидность неопределенности оценивает эту альтернативность.

Происхождение *параметрической неопределенности* связано с тем, что всякая математическая модель, реализованная в виде системы математических уравнений, неизбежно включает набор количественных параметров, характеризующих различные свойства моделируемого объекта и окружающей его среды. Значения этих «входных» параметров модели по ряду причин объективного и субъективного свойства всегда обладают неопределенностью.

Объективный фактор (aleatory, стохастическая неопределенность) в данном случае обусловлен либо изменчивостью со временем свойств моделируемого объекта и/или окружающей его среды, либо учетом индивидуальных различий таких объектов в рассматриваемой выборке. Эта вариабельность объективна, носит стохастический, а в некоторых случаях — случайный характер. В общем случае количественно она может быть задана интервалом значений между нижней и верхней границами величины параметра, а при наличии статистической устойчивости — распределением вероятности. Подобный тип неопределенности характерен и для величины эффекта реакции человека на действие поражающих факторов аварии. Люди разные, их чувствительность, например, к токсичным продуктам горения, тепловому излучению и т.д. различается, причем очень существенно.

Субъективный (epistemic) фактор параметрической неопределенности заключается в нехватке или низком качестве информации, используемой разработчиком модели при присвоении параметру модели численного значения. Как известно, в общем случае значения исходных параметров модели могут быть приняты по:

- результатам собственных экспериментов;
- чужим экспериментальным данным;
- литературным (в частности, справочным) данным;
- методом аналогии, результатам обработки экспертных суждений [11].

В некоторых ситуациях величина параметра может обладать неопределенностью, обязанной одновременно объективному и субъективному факторам, например, содержащиеся в различных химических справочниках значения одних и тех же физико-химических свойств нефтепродуктов. Стохастический фактор здесь заключается в объективном различии свойств сырья (сырой нефти разных месторождений), эпистемический фактор объясняется различиями эксперимента (средств

измерений, методик, мастерства персонала, т.е. измерительной неопределенностью типа В).

А поскольку качество подобной информации нередко оказывается недостаточным, наличие параметрической неопределенности неминуемо сказывается на величине неопределенности результата моделирования.

В завершении рассмотрения вопроса о роли и происхождении неопределенности результатов моделирования следует напомнить известный парадокс, связывающий параметрическую и модельную неопределенности. Он заключается в том, что далеко не всегда «богатая», физически содержательная модель, учитывающая большее количество действующих факторов, дает результаты с меньшей неопределенностью, чем более простая модель. Это объясняется тем, что сложная модель включает большее число параметров, каждый из которых имеет собственную неопределенность. В итоге неопределенность результата расчета по сложной модели зачастую оказывается большей, чем по простой.

Терминологическая неопределенность (коммуникативная) обусловлена нечетким, неоднозначным определением используемых терминов и понятий, различиями их толкования специалистами. Последнее связано с менталитетом людей — разным уровнем их образования, различными стандартами и стереотипами среды, в которой они живут и работают.

Данный тип неопределенности может быть весьма значимым, поскольку имеет не только качественный, но и количественный аспект — различная трактовка одного и того же понятия (объекта, явления) нередко ведет к тому, что специалисты приписывают его параметрам разные численные значения. Вследствие этого расчеты, выполненные разными специалистами с использованием одних и тех же расчетных моделей, дают различающиеся результаты.

Тщательно выверенные формулировки понятийного аппарата любой научной дисциплины позволяют значительно уменьшить терминологическую неопределенность, но не полностью. На это указал А. И. Кравченко [4] — из-за свойств естественного языка, используемого людьми для выражения и передачи смыслов, всегда остается некоторая неопределенность, принципиально неустранимая [терминологическая — авт.];

Вычислительная неопределенность. Лишь аналитические расчеты, выполненные «вручную», не обладают неопределенностью. Однако в настоящее время такой тип вычислений практически не используется при математическом моделировании. Системы модельных уравнений решаются приближенными методами на ЭВМ. При этом применяются числа с плавающей запятой, выполняется округление, ограничивается

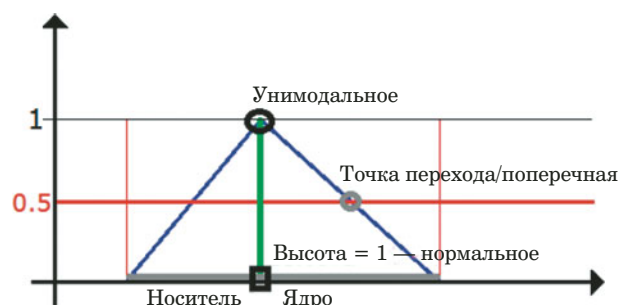
число членов математических рядов, итерации прерываются на определенном шаге. Все эти особенности расчетов на ЭВМ порождают особую вычислительную неопределенность, из-за которой результатом вычислений вместо точного значения является некоторый интервал.

Следует заключить, что каким бы способом ни был получен научный результат, неопределенность есть атрибут, неотъемлемое его свойство. Следовательно, представление результатов любого научного исследования точечными числами — не что иное как обман (и самообман), неопределенность подобных значений носит скрытый характер, ее сокрытие дезинформирует и дезориентирует научную общественность. Эту традицию в настоящее время следует признать анахронизмом. Учитывая, что в области экспериментальных исследований указание величины измерительной неопределенности давно уже является стандартом, по-видимому, настало время делать это и для результатов теоретических исследований.

Важно подчеркнуть, что неопределенность нельзя путать с ошибкой, которая идентифицируется как таковая именно потому, что об истинном значении величины имеется соответствующая информация.

Количественная оценка неопределенности

Как уже было отмечено, благодаря новому подходу в метрологии к выражению результатов измерений неопределенность приобрела количественный аспект, поэтому логично теперь перейти к рассмотрению вопроса о способах ее количественной оценки (КОН). Выражение величины любых параметров точечными числами на протяжении многих веков человеческой истории было безальтернативным. И так продолжалось до тех пор, пока в течение примерно одного столетия (в VIII – IX веках) плеяда выдающихся математиков, начав с анализа азартных игр, не разработала основы теории вероятности, создавшие альтернативу точечному детерминистическому описанию Природы и социума. В рамках этой альтернативной постановки, предполагающей использование законов распределения вероятности, научный прогноз носит принципиально иной характер — вместо собственно величины параметра прогнозируется доля случаев, в которых она попадет в заданный интервал. При этом величина параметра остается, естественно, точечной, однако по большей части (для непрерывных распределений вероятности) принципиально неизвестной, неопределимой, поскольку вероятность попадания величины в интервал нулевой ширины равна нулю.



Основные элементы нечеткого числа: функция принадлежности, максимальное значение которой равно 1 (синяя линия); носитель — диапазон значений, которые могут быть приписаны величине параметра; ядро — точечное значение, которому соответствует максимум функции принадлежности

Basic elements of a fuzzy number: the membership function is a blue polyline (in the figure it is normal, which means that its maximum value is 1); the carrier is a range of values that can be assigned to the value of the parameter; the core is a point value that corresponds to the maximum of the membership function.

Вероятностный подход в сравнении с классическим дал более адекватное описание реального мира, особенно применительно к таким научным областям, как теория стрельбы, теория надежности, эпидемиология и другим, изучающим массовые объекты и явления макромира, не говоря уже о статистической и квантовой физике, где для описания объектов микромира он является безальтернативным.

Оборотная сторона медали заключается в том, что вероятностная постановка в наше время применяется слишком широко. Особенно это касается областей, где корректность использования понятия вероятности в частотной трактовке Р. фон Мизеса [12], являющейся преобладающей, вызывает сомнения — по причине отсутствия статистической устойчивости свойств объектов исследования. Примером могут служить теории техногенного или экономического риска, объекты которых зачастую либо уникальны, либо представлены очень небольшими сериями, при этом ни о какой массовости речь не идет.

А поскольку нет больших однородных выборок, нет и корректно обоснованных относительных частот событий, получаемых по результатам статистического анализа. Типичный пример — статистика пожаров в школах. Как известно, школьные здания в нашей стране весьма различны — от деревянных довоенных построек с печным отоплением до современных, построенных по последним проектам учебных заведений. Насколько правомерно сводить все пожары в столь разных зданиях в одну группу, «сваливать в одну кучу»? Насколько представительным является полученное точечное значение «относительной

частоты пожара в школе в течение года», не кроется ли за ним на самом деле целый интервал?

В вероятностной постановке неопределенность величины параметра характеризуется шириной интервала, в котором с заданной вероятностью она может находиться.

Во второй половине прошлого века были предложены еще две альтернативы классической детерминистической точечной постановке задачи научного прогноза: нечеткая и интервальная.

Датировать появление «нечеткой» альтернативы довольно просто, она берет начало с работы [13] американского математика российского происхождения Лотфи Заде (Lotfi Zade), вышедшей в 1965 году. «Нечеткая» постановка описания объектов и явлений реального мира основана на использовании нечетких множеств и нечетких чисел. Последние являются обобщением действительных чисел, которым вместо классической функции принадлежности 1,0 соответствует функция принадлежности в виде выпуклой униmodalной функции (см. рисунок, показана синим цветом) [14].

Аппарат нечетких чисел был предложен Л. Заде для оперирования неопределенными или неточными величинами в практических задачах — как написал он в автобиографии, «чтобы преодолеть разрыв между миром математики и реальным миром». Классическая математика оперирует точными величинами, а человеку часто приходится: а) принимать решения на основании неопределенной, неполной, а зачастую и противоречивой информации; б) выполнять разнообразные задачи, не располагая точными значениями параметров.

Для количественной характеристики высказываний типа «холодный, прохладный, теплый, горячий» Л. Заде ввел понятие «лингвистической переменной» и функции принадлежности, которая задавала степень доверия эксперта величине параметра (в рассматриваемом случае — температуры) из некоторого диапазона. Малоизвестный факт — Лотфи Заде не был уверен, что его статья [13] с революционной идеей о нечетких множествах будет принята в печать, поэтому одновременно направил ее в американский журнал «Information and Control», а ее русский перевод (он хорошо знал русский язык, поскольку родился в Баку) — в советский математический журнал.

После выхода статьи в свет усилиями Л. Заде и его последователей была разработана алгебра нечетких чисел — система правил, регламентирующих математические операции над ними. Некоторое ограничение нечеткой постановки состоит в том, что в основном она предназначена для формализации экспертных оценок (суждений экспертов), поэтому из-за произвола задания

вида функции принадлежности, а иногда и носителя нечеткого числа включает в себе существенную субъективную (эпистемическую) неопределенность. В настоящее время «нечеткая» логика — логика, основанная на использовании нечетких чисел, широко используется в процессах управления работой различных технических систем.

В нечеткой постановке неопределенность величины параметра в целом характеризуется шириной интервала, задаваемого носителем, а внутри него — функцией принадлежности.

Сравнивая вероятностный и нечеткий способы количественной оценки неопределенности, можно указать на объединяющее их свойство — оба дают информацию о поведении величины неопределенности внутри соответствующих интервалов. При этом их источники информации различаются принципиально — нечеткая альтернатива сугубо субъективно приписывает каждому значению параметра внутри диапазона носителя некоторый вес, называемый в ее рамках функцией принадлежности, а в альтернативе вероятностной этот вес более объективен по происхождению, он называется плотностью вероятности и обосновывается дедуктивно (постулированием того или иного закона распределения информации) или индуктивно, на базе анализа имеющейся статистической информации.

Датировать появление интервального способа задания неопределенности невозможно, поскольку отдельные идеи интервального анализа высказывались на протяжении едва ли не всей истории математики, начиная с античности, ряд идей был предложен в первой половине прошлого века, в том числе — нашим соотечественником В. М. Брадисом, больше известным как создатель «таблиц Брадиса». Однако основные вехи интервальной постановки связаны с работами математиков Розалинды Янг (Rosalinde Young), опубликовавшей в 1931 г. статью [15], и Рамона Мура (Ramon Moor), автора важнейшей монографии «Интервальный анализ» [16], положившей в 1966 г. начало его современной трактовке.

Немалый вклад в развитие интервального анализа принадлежит российским математикам — С. П. Шарому, автору одной из лучших монографий по «интервальной» тематике [17], А. П. Воцинину, много лет жизни посвятившему задаче интервального анализа данных (можно выделить его статью [18]) и др.

В рамках интервального анализа интервальные числа (отрезки числовой оси) используются для выражения ограниченной по величине неопределенности. Границы этого интервала (нижняя и верхняя) задают диапазон, в котором может находиться принципиально неизвестное, точечное значение величины параметра. Правила матема-

тических операций над интервальными числами обобщают таковые над обычными вещественными числами. По сути, интервальный анализ оперирует величинами неопределенностей параметров, позволяя по известной величине неопределенности исходных параметров математической модели количественно оценить (вычислить) неопределенность результата расчета по данной модели.

Интервальная альтернатива выражения и количественной оценки неопределенности принципиально отличается от вероятностной и нечеткой альтернатив именно отсутствием каких-либо утверждений о величине неопределенности внутри интервала. Единственным требованием является «выпуклость» этого интервала, что означает допущение о принятии величиной параметра любого значения внутри него, без каких-либо исключений.

Следует отметить, что математические операции над интервальными числами имеют ряд негативных особенностей. Первоначальная версия интервального анализа, называемая сегодня «наивной», не умела их подавлять, поэтому выражение неопределенности параметров интервальными числами и вычисления над ними не находили применения на практике. Причина заключалась в том, что в большинстве случаев ширина интервальных чисел — результатов таких расчетов — оказывалась неоправданно большой, переоцененной настолько, что дальнейшие вычисления оказывались невозможными; либо просто непригодной из-за своей чрезмерной величины. Данный эффект не проявлялся лишь в том случае, если интервальное число входило в математическое выражение в первой степени и только один раз.

Отрадно констатировать, что к настоящему времени в рамках интервального анализа разработан ряд методов (Рамона Мура, глобальной оптимизации, аффинное представление интервального числа), позволяющих нивелировать отмеченные негативные его свойства. Метод, названный первым, является таковым и в историческом плане, но на сегодняшний день он имеет скорее методическое значение.

Для возможности выполнения количественной оценки неопределенности результатов модельных вычислений в интервальной постановке не только специалистами-математиками, но и представителями инженерного корпуса важно сообщить о наличии специализированных программных продуктов. Один из них — приложение (toolbox) INTLab, работающее в среде MATLAB или GNU Octave (свободно распространяемое программное обеспечение, в отличие от коммерческого MATLAB). INTLab разработан и

постоянно развивается профессором Гамбургского университета Зигфридом Румпом.

Заключение

Представлены качественный и количественный аспекты неопределенности, присущей результату любого исследования — экспериментального и теоретического. Исследователю важно не только понимать ее происхождение, источники, но и уметь количественно оценивать величину этой неопределенности.

В настоящее время наиболее популярно выполнение количественной оценки неопределенности в вероятностной постановке, имеющей самую длительную историю и рекомендуемой МАГАТЭ при проектировании объектов ядерного цикла. Выполняется она обычно методами статистического моделирования, более известными как методы Монте Карло. Однако у вероятностной постановки есть ряд серьезных ограничений, описанных в статье.

Наиболее перспективным представляется всемерное развитие и использование интервальной постановки задачи количественной оценки неопределенности. Главное ее достоинство — отсутствие необходимости допущений (зачастую весьма произвольных) о поведении величины внутри интервала неопределенности, при интервальном подходе в этом просто нет нужды. Причем, как описано в [17], при наличии соответствующей статистической информации ширина интервала неопределенности может быть существенно уменьшена.

ЛИТЕРАТУРА

1. <https://en.wikipedia.org/wiki/Uncertainty>.
2. IAEA safety series # 100. evaluating the reliability of prediction made using environmental transfer models — IAEA, Vienna, 1989.
3. Draft guidance document on characterizing and communicating uncertainty in exposure assessment. — IPCS, World health organization, 2006.
4. **Кравченко А. И.** Тезисы о неопределенности / Universitates. 2014. № 4. С. 14 – 19.
5. **Giacomo P.** News from the BIPM / Metrologia. 1981. Vol. 17 N 2. P. 69 – 74.
6. Guide to the Expression of Uncertainty of Measurement. First edition. — Genève: ISO, 1993.
7. International vocabulary of metrology. Basic and general concepts and associated terms (VIM). 3rd edition. — JCGM, 2008.
8. РМГ 91–2009 ГСИ. Совместное использование понятий «погрешность измерения» и «неопределенность измерения». Общие принципы.
9. JCGM 100:2008 GUM 1995 with minor corrections Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement. — Genève, 2008.
10. **Колесников Е. Ю.** Об оценке неопределенности результатов анализа техногенного риска / Проблемы анализа риска. 2012. Т. 9. № 4. С. 8 – 46.
11. **Колесников Е. Ю.** Количественное оценивание неопределенности техногенного риска. Часть 2 / Проблемы анализа риска. 2013. Т. 10. № 3. С. 8 – 31.
12. **von Mises R.** Probability, Statistics and Truth. 2nd Edition. — New York, 1957.
13. **Lotfi Z.** Fuzzy sets / Information and Control. 1965. N 8. P. 338 – 353.
14. **Дьяконов А. Г.** Теория нечетких множеств (МГУ, 2015). <https://alexanderdyakonov.files.wordpress.com> (дата обращения: 18.01.2023).
15. **Young R. C.** The algebra of many-valued quantities / Mathematische Annalen. 1931. Vol. 104(1). P. 260 – 290.
16. **Moor R.** Interval Analysis. — Englewood Cliff, NJ, USA: Prentice Hall, 1966.
17. **Шарый С. П.** Конечномерный интервальный анализ. — Новосибирск: XYZ, 2021 <http://www.nsc.ru/interval/?page=Library/InteBooks> (дата обращения: 21.02.2023).
18. **Вощинин А. П.** Интервальный анализ данных: развитие и перспективы / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2002. Т. 68. № 1. С. 118 – 126.
19. **Колесников Е. Ю., Теляков Э. Ш.** Терминологическая неопределенность: опыт количественной оценки / Безопасность труда в промышленности. 2016. № 7. С. 82 – 88.

REFERENCES

1. <https://en.wikipedia.org/wiki/Uncertainty>.
2. IAEA safety series # 100. evaluating the reliability of prediction made using environmental transfer models — IAEA, Vienna, 1989.
3. Draft guidance document on characterizing and communicating uncertainty in exposure assessment. — IPCS, World health organization, 2006.
4. **Kravchenko A. I.** Theses on uncertainty / Universitates 2014. N 4. P. 14 – 19 [in Russian].
5. **Giacomo P.** News from the BIPM / Metrologia. 1981. Vol. 17 N 2. P. 69 – 74.
6. Guide to the Expression of Uncertainty of Measurement. First edition. — Genève: ISO, 1993.
7. International vocabulary of metrology. Basic and general concepts and associated terms (VIM). 3rd edition. — JCGM, 2008.
8. RMG 91–2009 GSI. Joint use of the concepts of «measurement error» and «measurement uncertainty». General principles [in Russian].
9. JCGM 100:2008 GUM 1995 with minor corrections Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement. — Genève, 2008.
10. **Kolesnikov E. Yu.** On assessing the uncertainty of the results of the analysis of technological risk / Probl. Anal. Riska. 2012. V. 9. N 4. P. 8 – 46 [in Russian].
11. **Kolesnikov E. Yu.** Quantitative assessment of the uncertainty of technogenic risk. Part 2 / Probl. Anal. Riska. 2013. Vol. 10. N 3. P. 8 – 31 [in Russian].
12. **von Mises R.** Probability, Statistics and Truth. 2nd Edition. — New York, 1957.
13. **Lotfi Z.** Fuzzy sets / Information and Control. 1965. N 8. P. 338 – 353.
14. **Dyakonov A. G.** Theory of fuzzy sets (MSU, 2015). <https://alexanderdyakonov.files.wordpress.com> (accessed 18.01.2023) [in Russian].
15. **Young R. C.** The algebra of many-valued quantities / Mathematische Annalen. 1931. Vol. 104(1). P. 260 – 290.
16. **Moor R.** Interval Analysis. — Englewood Cliff, NJ, USA: Prentice Hall, 1966.
17. **Sharyy S. P.** Finite-dimensional interval analysis. — Novosibirsk: XYZ, 2021. <http://www.nsc.ru/interval/?page=Library/InteBooks> (accessed 21.02.2023) [in Russian].
18. **Voshchinin A. P.** Interval data analysis: development and prospects / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2002. Vol. 68. N 1. P. 118 – 126 [in Russian].
19. **Kolesnikov E. Yu., Telyakov E. Sh.** Terminological uncertainty: experience of quantitative assessment / Bezopasn. Tr. Prom. 2016. N 7. P. 82 – 88 [in Russian].