

## О СЕМИНАРЕ «МЕТРОЛОГИЯ ВЕЛИЧИН, КОТОРЫЕ МОГУТ БЫТЬ ПОДСЧИТАНЫ»

Ричард Дж. К. Браун, Бернд Гюттлер, **Павел Неежмаков**, Майкл Сток, Роберт И. Вельгош, Штефан Кюк, Константина Василатоу

### 1. Введение

С тех пор, как впервые был рассмотрен анализ размерности, величины с единицей один, обозначение 1, неизменно представляли сложный вопрос для метрологии, даже после документального оформления Международной системы единиц (SI) [1]. Это, чаще всего, производные величины, для которых размерности основных единиц СИ, охватывающих величину, взаимно сокращаются, например, м/м, либо величины, которые вовсе нельзя выразить в основных единицах СИ и которые вместо этого выражают число (количество) объектов, например, число клеток, электронов, атомов.

Споры о том, как рассматривать величины с единицей один в рамках СИ, разгорелись в ходе подготовки пересмотра СИ в 2019 году. В первую очередь, это дискуссия о статусе угла в рамках СИ [2], является ли он производной или основной единицей. Так как консенсус по этому вопросу не был достигнут, то в 9-ом издании Брошюры СИ был сохранен статус-кво, а также, отмечен определенный прогресс в понимании как можно было бы смягчить последствия возможной путаницы, связанной с выражением угла и других величин соотношений. Тем не менее, было понятно, что величинам, связанным с величинами, которые можно подсчитать (число объектов, процессов или других явлений) было уделено недостаточно внимания, а между тем эти величины становились все более значимыми в метрологии по двум причинам. Во-первых, переопределение моля способствовало уделению более пристального внимания понятию числа объектов, поскольку новое определение опирается на это понятие непосредственно (а не косвенно, как это было до 2019 года) [3]. Во-вторых, использование величин «число объектов» быстро расширяется по мере того, как метрология все больше внедряется в биологические или экологические измерения, такие как концентрация числа частиц в выхлопных газах двигателей. В Брошюре СИ уже признается значимость «величин, которые нельзя описать в терминах семи основных величин СИ и которые имеют природу подсчета» с соответствующей

единицей один. Это может быть истолковано несколькими способами и поднимает вопрос о том, как единица один признается и реализуется в рамках системы СИ. Вопрос осложняется бесконечным множеством величин, которые могут быть выражены как число объектов (например, молекулы, циклы или копии). Отсутствие конкретного руководства в этой области потенциально имеет далеко идущие последствия. Пока еще неясно, может ли и должен ли результат таких величин быть выражен в терминах СИ и распространяется ли на эти величины понятие прослеживаемости к СИ. Это касается и вопроса о том, какие сообщества и Консультативные комитеты Международного комитета мер и весов должны отвечать за стандартизацию измерений для таких величин [4].

В результате, для обсуждения этих вопросов и предложений возможных путей улучшения понимания таких величин, Консультативным комитетом по единицам измерений (CCU) совместно с Консультативным комитетом по количеству вещества (CCQM) был организован семинар. Цели семинара:

- Инициировать дискуссию по подсчету и величине «число объектов» по всему метрологическому сообществу, с тем чтобы достичь общего понимания подсчета.
- Подготовить предложения для четкого разграничения:
  - величин, которые можно выразить только как подсчитанное число объектов;
  - величин, для которых подсчет включен в процесс измерения, но результаты не выражаются как подсчитанное число объектов;
  - величин, для которых подсчет не включен в процесс измерения, но результаты выражаются как подсчитанное число объектов.
- Предоставить руководящие указания в отношении:
  - более точной номенклатуры для подсчитываемых величин;
  - лучшего метрологического понимания подсчетов и их прослеживаемости;
  - ответственности за предоставление прослеживаемости для таких величин.

Семинар проходил в онлайн формате 28-30 марта 2023 года. Каждый день сессии были посвящены разным темам. Первая сессия включала знакомство с темой мероприятия и представление теоретических аспектов подсчета и единицы один. На второй сессии основное внимание уделялось предметным исследованиям подсчета объектов из метрологии электричества, массы, химии и биологии. На последней сессии рассматривались иные процессы в метрологии и их связь с подсчетом, в конце семинара были озвучены заключительные замечания и сформулированы итоги. В трех сессиях всего приняли участие 314 человек. Справочную информацию по семинару, повестку и слайды презентаций, которые читателю следует изучить заранее, чтобы данный доклад оказался как можно более полезным, см. в ссылке [5].

## 2. Резюме презентаций

### 2.1. День 1

2.1.1. «Приветствие и предпосылки для проведения семинара» Павел Неежмаков (ННЦ «ИМ», Украина)

В вводной части отмечено, что, в то время как подсчет и величина «число объектов» рассматриваются в рамках всего метрологического сообщества, особенно в области химии и биологии, до сих пор не найден консенсус в отношении того, как эти величины следует определять, описывать и обсуждать. Некоторые предлагают представлять величину «число объектов» при помощи положительного целого числа и описания подсчитываемых объектов. Другие утверждают, что поскольку требуется полное определение характеристик того, что подсчитывается, эти величины непротслеживаемы к СИ. Таким образом, цель проведения семинара состоит в том, чтобы достичь общего понимания величины «число объектов», подсчета и связанных с ним процессов. Это должно привести к более четкому разграничению подсчета как процесса измерения и величины «число объектов» как результата измерения, а также к более точному стандартизованному словарю по этим темам. У метрологического сообщества должна появиться четкая стратегия и понимание того, как можно достичь прослеживаемости к величинам «число объектов».

2.1.2. «Какие вопросы затрагиваются в семинаре?» Бернд Гюттлер (РТВ, Германия)

Какие величины можно подсчитать? Такие величины, как количество вещества, электрический ток, масса или сила света, основаны на квантованных величинах, процессах или других явлениях, которые, по крайней мере теоретически, могут быть измерены путем подсчета. В этом состоит отличие от величин, постоянных (или аналоговых)

по своей природе (насколько нам известно на данный момент), таких как длина и время.

Почему мы выполняем подсчеты? Количественная оценка на основе подсчета отдельных объектов (например, элементарных частиц, таких как атомы, молекулы и электроны) или квантованные процессы и другие явления приобретают все большее значение в метрологии из-за все возрастающей потребности в более точных измерениях. Это может быть связано с технологическими дисциплинами, например, квантовыми технологиями, с экологическими измерениями и измерениями в области здравоохранения на уровне неопределенности или чувствительности обнаружения анализируемого вещества, что делает рассмотрение квантованной природы величины неизбежным.

Что такое подсчет? Определения подсчета встречаются не так часто. В энциклопедии «Британика» приводится следующее описание: «В совокупности (наборе) объектов (или элементов) процедура определения числа представленных объектов называется подсчетом». Такое объяснение оставляет неопределенной «процедуру» подсчета и не охватывает подсчитываемые процессы и явления, например, колебание маятника или радиоактивный распад. Отсутствует комплексная оценка подсчета. Так, понятие подсчета в научной литературе используется по-разному. Даже в литературе, разъясняющей систему СИ, нет согласованного объяснения подсчета. Неясно, что можно подсчитать или должны ли результаты «определения числа представленных объектов» быть выражены с использованием какой-либо основной единицы СИ или путем подсчета с единицей один, обозначение 1.

Как мы выполняем подсчет? Термин «подсчет» использовался, например, в связи с повторным определением постоянной Авогадро. Предварительным условием для переопределения единиц СИ в 2019 году было повторное определение постоянной Авогадро с достаточной точностью для предполагаемого использования. Этого добились путем определения число атомов  $^{28}\text{Si}$  в отдельной кристаллической сфере  $^{28}\text{Si}$  с использованием, наряду с другими методами, дифракции рентгеновских лучей и интерферометрии для величин в микроскопическом и макроскопическом масштабе. «Определение числа представленных объектов» (т.е. в этом случае атомов  $^{28}\text{Si}$  в сфере) осуществлялось с неопределенностью, «которая допускает переопределение моля в терминах точного числа элементарных частиц» (число Авогадро) [8]. Эта «процедура определения числа представленных объектов» (так называемый эксперимент Авогадро или XRCD [9]) часто рассматривается как подсчет объектов, которые были активны в определенном поле. Аналогичным образом, био-

химические измерения (например, ddPCR и точная цитометрия), измерения электрического тока и силы света направлены на «определение числа представленных объектов». В настоящее время вопрос о том, что следует и что не следует принимать за подсчет, остается спорным.

При использовании моля необходимо определить элементарные частицы (например, атомы  $^{28}\text{Si}$  в случае эксперимента Авогадро) [8]. Аналогичным образом, в метрологии нет однозначного понимания, что при использовании подсчета необходимо определить, что подсчитывается. Очевидно также, что такое требование не ведет к подсчету идентичных объектов/процессов/явлений (например, электронов) во всех случаях или группы объектов/процессов/явлений с установленными идентичными свойствами (например, все изотопы одного и того же элемента) или свойства с диапазоном результатов в рамках заданных предельных значений (например, диапазон размеров в случае частиц). Также непонятно, когда результат можно выразить с использованием основной единицы СИ, единицы один или вообще не в рамках системы СИ.

С учетом изложенного, выступающим предложены вопросы, которые должны быть рассмотрены при подготовке презентаций:

- Какие величины в рамках вашей технической дисциплины связаны с подсчетом?
- Какие технические сложности возникают при измерении этих величин, например, идентификация или определение того, что подсчитывается, работа с очень малыми числами и вычисление неопределенности?
- Вы выражаете результаты своего измерения с использованием единицы один или одной из семи основных единиц СИ? Чем вы это аргументируете? Что можно было бы усовершенствовать для уточнения статуса и прослеживаемости единицы один в рамках СИ?

### 2.1.3. «Понятия постоянных величин, счетных совокупностей и номенклатуры» Чарльз Эрлих (NIST, США)

В выступлении рассматривались концептуальные различия и пересечения смыслов понятий «измерение постоянных величин» и «подсчет совокупностей различных видов объектов», при этом особое внимание уделялось терминологическим аспектам, главным образом, в Международном словаре по метрологии (VIM) и Брошюре СИ. Также рассматривались связанные с этим понятия «безразмерных величин» и «величин единицы один», была представлена идея различения понятий «величины без размерности» и «величины без единицы измерения», наряду с идеей введения обозначения «С» для подсчитанного числа в «раз-

мерности». Вместе с тем подчеркивалось различие между «размерностью», «единицей измерения» и «числом».

В Брошюре СИ говорится значительно больше о подсчете, чем в VIM, но ни в одном из этих документов не сказано достаточно. VIM предполагает, что у подсчета и измерения есть что-то общее, и возможно даже, что подсчет является формой измерения. Ни VIM, ни Брошюра СИ не дают определения подсчета. Высказано предложение разработать строгую систему понятий для «подсчета» параллельно с системой понятий для «измерения» в VIM и, возможно, в будущем добавить новый раздел в VIM под названием «Подсчет», как сейчас добавляется новый раздел «Качественные свойства».

Обсуждался вопрос о том, следует ли считать понятие «счетных совокупностей объектов» «величинами» в таком же, более современном смысле понятия и термина, которого придерживался Максвелл в 1873 году и который был выработан де Буром в середине 1990-х. Были исследованы несколько толкований того, что Максвелл сказал и что он предполагал, включая то, что подразумевалось под обозначениями в известном равенстве  $Q = \{Q\} \cdot [Q]$ . Первый символ, «Q», обозначает то, что Максвелл впервые называет «величиной» и что в VIM определено как характеристика или свойство. В зависимости от родного языка, некоторые люди считают «величину» «количественной характеристикой свойства», различая понятие «свойства» и его «количественной характеристики». «[Q]» обозначает единицу измерения, например, «метр», для основной величины, соответствующей свойству (количественная характеристика) расстояния между двумя точками в пространстве. «{Q}» обозначает то, что Максвелл называет «числовым значением», которое для длины представляет количественную характеристику физического расстояния относительно единицы измерения «метр».

Определение единицы измерения «метр», разумеется, является вопросом соглашения. Если бы мы хотели пообщаться с нашими галактическими соседями о длине вещей, нам пришлось бы описать им, как мы создали «метр» на основе свойств природы, таких как свет и атомы цезия. Однако то же самое нельзя сказать о подсчете. Подсчету необязательно произвольно приписывать единицу измерения, как это требуется для длины с «метром», поскольку самих по себе цифр достаточно для сообщения числа совокупностей объектов. Несомненно, следует также сообщить, что из себя представляют объекты.

С точки зрения метрологии существует принципиальное концептуальное различие между «непрерывными величинами» и «счетными совокупностями». Вопрос в том, необходимо ли понятие

«счетная единица», и, если да, должна ли это быть цифра 1, или подсчитываемый объект, или даже что-то другое.

#### 2.1.4. «Величины с единицей один» Питер Блаттнер (METAS, Швейцария)

Выступление посвящено понятию единицы один, с предоставлением исторической справки. В сменяющихся друг друга изданиях Брошюры СИ рассматривалась трактовка величин с единицей один, при этом использовались разные термины, такие как соотношение двух сопоставляемых величин и безразмерные величины. Трактовка с годами менялась, подчеркивая возможное изменение мышления с течением времени, отсутствие единой истины и наличие соглашения вместо нее. До седьмого издания в Брошюре СИ понятие «подсчет» не было представлено.

Рассмотрено определение единицы измерения и величины в текущей версии VIM [12]. Если бы величину можно было бы выразить как число и основу для сравнения, какой была бы основа для сравнения для числа объектов – единица один или основа для сравнения, связанная с тем, что подсчитывается? Для величин соотношения можно было четко выделить единицы измерения, чтобы дать некоторое представление об описываемой величине. Этого нельзя сделать для величин, связанных с числом объектов. По многим из этих тем Брошюра СИ и VIM не полностью гармонизированы, но уже предпринималось несколько попыток в рамках Консультативного комитета по единицам измерений (CCU) и рабочей группы по VIM (JCGM-WG2:VIM) Объединенного комитета по руководствам в области метрологии (JCGM). В итоге метрологические понятия были проверены относительно величин с единицей один. Прежде всего рассматривалась калибровка. VIM подразумевает калибровку, для которой требуется эталон – понятие, неясное для числа объектов. Аналогичным образом, в отношении метрологической прослеживаемости VIM ссылается на основу для сравнения, и снова это понятие неясно для числа объектов и с большой вероятностью определяется специальными методами. Ситуация ничем не отличается для калибровки величин соотношения, таких как соотношения мощностей, где требуется только «определение характеристик» (например, получение линейности средства измерений). В этой связи возникает ряд вопросов о том, какова роль НМИ для величин с единицей один, если требуется только «определение характеристик». В качестве решений по обсуждаемым вопросам предложена гармонизация определений и их согласованное использование в официальной литературе, при этом НМИ должны предложить наименьшие возможные неопределенности, по-

зволяющие потребителям проверить реализации и всем заинтересованным сторонам избежать недоразумений, предоставив полное описание рассматриваемых величин.

#### 2.1.5. «Подсчет и чем он отличается от определения количества вещества» Ричард Браун (NPL, Соединенное Королевство)

В презентации рассмотрена величина «число объектов», чем она отличается от количества вещества, величины, для которой основной единицей является моль. В то время как подсчет как процесс измерения известен на протяжении многих тысяч лет, метрологическое сообщество только недавно стало рассматривать его всерьез как процесс измерений. Было высказано предположение, что одной из основных причин этого стала путаница в этой области между процессами измерений (примером которых является подсчет) и результатами измерений (примером которых является выражение величины «число объектов»). В качестве аналогии, хотя интерферометрия представляет собой процесс измерений, в ходе которого определяют длину, мы не называем длину интерферометрической величиной. Это различие было недавно подчеркнуто в определении моля 2019 года, которое теперь связало количество вещества непосредственно с числом объектов, при этом постоянная Авогадро являлась постоянной пропорциональности между этими двумя величинами. Дополнительная сложность с величиной «число объектов» заключается в требовании достаточно точного указания того, что именно подсчитывалось – проблема идентичности. Обобщенное понятие «число» или «количество вещества», означает меньше, чем «длина». Мы должны указать «количество никеля» или «число рыб». Даже в этом случае «число рыб» требует какого-то уточнения, которое не требуется для «количества никеля». Это грустные рыбы, старые, красные или обладающие другими свойствами? Прежде чем считать «что-то», мы должны решить, что считается этим «чем-то». Стандартизация таких характеристик, вероятно, приведет к их определению специальными методами. Это подчеркивает различие между количеством вещества и другими величинами «число объектов».

В 1971 году на 14-й Генеральной конференции по мерам и весам моль принят в качестве седьмой основной единицы СИ. Это событие не только официально включило химию в рамки СИ, но также дало количеству вещества его собственную размерность и обеспечило точно определенное основание для различения количества вещества и числа. Определение моля было понятным: среди его важнейших составляющих было то, что оно относится к «элементарным частицам», которые

являются частью «какой-либо системы». Рассмотрение только «элементарных частиц» (атомов, молекул, ионов, электронов и т.д.) означает, что опасения идентичности отсутствуют: атомы никеля все идентичны, плюс-минус изотопы никеля, которые могут быть также однозначно определены в любом случае. Понятие «какой-либо системы» предполагает, что рассматриваемые элементарные частицы должны быть расположены достаточно близко друг к другу, чтобы теоретически они могли бы стехиометрически реагировать друг с другом. Так, моль используется, когда элементарные частицы полезно и целесообразно рассматривать в системе. Полезно означает, что выражение в терминах количества вещества дает информацию или контекст для другого свойства, которое представляет интерес. Ничто не мешает выражению с использованием «числа атомов/молекул и т.д.», но при этом теряются преимущества размерности количества вещества. Тем не менее, обратное неверно: число неэлементарных частиц (например, яблок, планет, клеток и т.д.) нельзя выразить в терминах количества вещества.

#### 2.1.6. Резюме обсуждений в 1-й день

Основными вопросами обсуждения стали отношение между молем и числом объектов и, что немаловажно, различие между подсчетом, как процессом измерений и величинами, которые представляют число объектов. Моль был определен как особый случай, когда число объектов, которые могут рассматриваться, представляло собой особый подвид чего-то, что можно подсчитать, т.е. только элементарные частицы. Во многих случаях сообщество пользователей хочет знать «число объектов», а не количество. Определенную поддержку также получили «псевдо-единицы» (использование названия подсчитываемого объекта в качестве единицы измерения), которые представляют собой заполнители для единицы один; обсуждалось, как они могут помочь стандартизации и использованию нижнего уровня СИ. И наоборот, использование «1» в этих случаях могло бы выглядеть странно и вводить в заблуждение. Также был затронут аспект идентичности и конкретики при идентификации того, что подсчитывается. Это, естественно, привело к появлению требований в отношении стандартизации понятий и часто означало, что величины «число объектов» рассматривались как «измеряемые величины, определяемыми специальными методами». Тем не менее, величины «число объектов» считаются нейтральными величинами в рамках СИ, и то, что они определяются специальными методами, не сказывается на согласованности результатов измерений. Обсуждалось, что моль становится менее полезным, чем дру-

гие единицы, из-за того, что химия переходит в биологию, и в тех случаях, возможно, когда молекулы становятся такими большими, что не являются идентичными, или когда другие свойства, такие как масса или биологическая активность, становятся более важными. Рассмотрение размерностей величин с единицей один проблематично, поскольку существует опасность ошибочного сравнения несравнимых величин, если нет точного описания рассматриваемой величины. В то время, как здравый смысл и контекст описываемой величины могут решить многие из проблем измерений при взаимодействии между людьми, эти вопросы все еще вызывают трудности у компьютеров. Легкого решения здесь нет и не будет до тех пор, пока компьютеры не смогут в полном объеме толковать описания величин.

#### 2.2. День 2

2.2.1. «Подсчет электронов для метрологии электрических токов» Ханс Вернер Шумахер (PTB, Германия)

Ампер определяется путем установления числового значения элементарного заряда,  $e$ . Поскольку все электроны несут одинаковый заряд, «их подсчет» может дать в результате измерение силы тока и действительно, на практике отмечается возможность реализации ампера с использованием устройства одноэлектронного транспорта. Одноэлектронные насосы не подсчитывают электроны непосредственным образом, а многократно «всасывают» электроны с частотой накачки. Эта частота должна быть высокой, чтобы создавать ощутимый ток с малой неопределенностью, и быть лучше старой реализации ампера (примерно 3 части в 10<sup>7</sup>). Полупроводниковые одноэлектронные насосы представляют технологию, использующую квантовые точки GaAs/AlGaAs. Туннелирование электронов носит стохастический характер, ошибки возникают при обратном туннелировании или при одновременном туннелировании двух или более электронов. Эти ошибки необходимо контролировать и подсчитывать. Эти устройства на данный момент продемонстрировали неопределенность 1,6 частей в 10<sup>7</sup>. Это свидетельствует о большей точности одноэлектронных насосов, чем при реализации ампера в старой СИ.

Подсчет отдельных электронов на данных устройствах дает возможность количественной оценки ошибок и статистики накачки (т.е. не накачено ни одного электрона, накачка одного электрона, двух электронов и т.д.) как функции напряжения. Было продемонстрировано, что после 10<sup>6</sup> циклов накачки не наблюдалось ошибок. По мере увеличения частоты накачки (возможно, до 10<sup>8</sup> электронов в секунду) становится легче

подсчитывать ошибки (возможно, 103 – 104 в секунду), чем подсчитывать электроны. Метод обнаружения ошибок связан с использованием последовательно включенных электронных насосов на основе корреляции сигналов между ними. Это дает статистику подсчета ошибок и, таким образом, неопределенность силы тока. Это первые шаги в создании самореферентного (самокалибрующегося) квантового источника тока. Произведенный таким способом ток имеет силу всего несколько аттоампер. Как вариант, данная технология приведет к меньшим неопределенностям при реализации токов менее 100 пА, тем самым подтверждая, что подсчет электронов является ключевым инструментом в метрологии слабых токов.

#### 2.2.2. «Подсчет атомов Si в кремниевой сфере» Олаф Ринитц и Аксель Праманн (ПТВ, Германия)

Процесс «подсчета» атомов в кремниевой сфере использовался при переопределении моля и килограмма в 2019 году с использованием метода измерения рентгеновской плотности кристалла в «проекте Авогадро» [18]. В эксперименте было проведено четыре ключевых измерения: во-первых, объема макроскопической кремниевой сферы ( $V$ ); во-вторых, объема элементарной ячейки, содержащей 8 атомов Si ( $a^3$ ); в-третьих, массы кремниевой сферы ( $m$ ); и в-четвертых, молярной массы кремния в сфере ( $M(\text{Si})$ ). Тогда значение постоянной Авогадро задается следующей формулой:  $N_A = (8V/a^3) (M(\text{Si})/m)$ . Определение молярной массы кремния являлось ограничивающим фактором в точности общего определения. У кремния три природных изотопа, и, хотя кремниевая сфера была высоко обогащена  $^{28}\text{Si}$ , для других изотопов требовались точные измерения в шесть порядков от величины  $^{28}\text{Si}$  (распространенность  $\geq 99,99\%$ ) до  $^{30}\text{Si}$  (распространенность  $\leq 0,00004\%$ ). Для этого применен новый аналитический подход под названием «виртуальная масс-спектрометрия изотопного разбавления элемента». По сути, это означало, что для определения общей молярной массы измерялись только изотопы  $^{29}\text{Si}$  и  $^{30}\text{Si}$  и предполагалось, что оставшимся изотопом был  $^{28}\text{Si}$ . Измерения выполнялись с относительной неопределенностью  $\leq 5 \times 10^{-9}$ , что не имеет аналогов в аналитической химии, при этом неопределенность была проверена при помощи сличения CCM-P160. Данная работа сыграла ключевую роль в пересмотре моля и килограмма. Обсуждены величины, определяемые в ходе экспериментов. Многие из них были величинами соотношений с единицей один (массовая доля, соотношение изотопов, количественная доля и соотношение интенсивностей). Отмечено, что для элементного анализа и определения со-

отношения изотопов не требуются специальные величины или единицы измерения, связанные с подсчетом, хотя впоследствии обсуждалось, что фактически «количество атомов» и другие свойства атома, например, «объем на атом», были ключевыми входными величинами в уравнении измерения.

#### 2.2.3. «Количественная оценка нуклеиновых кислот путем подсчета» Инчул Янг (KRISS, Республика Корея)

Есть много биологических объектов, которые можно было бы подсчитать. Некоторые невооруженным глазом, для некоторых необходимо увеличение и подсчет с помощью микроскопа, для некоторых необходимо увеличение числа, чтобы их можно было подсчитать, например, бактерии или ДНК. Отмечено, что в биологии количественная оценка по числу объектов более значима, чем измерение массы или описания количества. Для количественной оценки требуется, во-первых, выделить и разделить объекты, а во-вторых, обеспечить их обнаруживаемость. Этим процессам препятствуют проблемы с выборкой, объемом, невозможностью обнаружения, а также наличие примесей. (В результате началось обсуждение что считать «измеряемой величиной» на примере яблока: целое яблоко, половинка яблока или заплесневелое яблоко). Отмечен процесс цифровой полимеразной цепной реакции (ПЦР), который предполагает несколько этапов: введение смеси ПЦР, разделение, усиление, флуоресцентное детектирование, анализ данных и окончательная интерпретация для предоставления результата в виде «копий» на объем. Преимуществами цифровой ПЦР являются высокая чувствительность и высокое разрешение (потенциально вплоть до отдельных молекул), высокая устойчивость к ингибиторам и фоновым нуклеиновым кислотам, абсолютные методы количественной оценки без необходимости выполнения калибровки, высокая пропускная способность и возможность провести количественную оценку многочисленных ДНК-мишеней в одном анализе. Это означает, что у цифровой ПЦР множество применений, включая количественную оценку ДНК, сертификацию стандартных образцов нуклеиновой кислоты, обнаружение патогенов, соотношения генов (например, в генетически модифицированных организмах), а также характеристика связи в ДНК и поломки ДНК. До настоящего времени CCM провел семь международных сличений по цифровой ПЦР в нескольких областях применения, при этом в большинстве случаев измеряемой величиной была «копия/мл». Также с использованием цифровой ПЦР было сертифицировано несколько стандартных образцов. В презентации сделан

вывод, что подсчет представляет собой простой и прямой подход к реализации прослеживаемого измерения биологических объектов (в частности клеток, вирусов, нуклеиновых кислот и протеинов). Цифровая ПЦР является ключевым инструментом в выполнении таких измерений благодаря ряду преимуществ в чувствительности, воспроизводимости, пропускной способности и широкой применимости. Она также имеет потенциал стать основным методом для количественной оценки нуклеиновых кислот. Докладчику были заданы вопросы: как термины, не входящие в систему СИ, такие как «копии», должны трактоваться в литературе (в отчетах о сличениях ССQM, связанных с ними публикациях и литературе в заинтересованных сообществах) и какие будут рекомендации для выражения этих измеряемых величин (возможные варианты: копии/мл, 1/мл, /мл, мл<sup>-1</sup> и т.д.).

#### 2.2.4. «Подсчет клеток» Джонатан Кэмпбелл (LGC, Соединенное Королевство)

Презентация началась с обсуждения биологической сложности. Имеется несколько классических методов подсчета прокариотов для определения количества жизнеспособных клеток, включая увеличение их числа при помощи питательного бульона и последующий подсчет, как «колониобразующих единиц». Ситуация с эукариотами более сложная, поскольку в таком случае существует требование определить, что представляет собой клетка (возможно, двумя определяющими факторами являются непрерывная клеточная мембрана и зародыш). Была отмечена сложность определения характеристик, которая становится еще больше из-за того, что многие из свойств объекта являются больше непрерывными, чем дискретными: это усложняет классификацию. Во-первых, надо отделить клетки от среды и имеющихся примесей. Во-вторых, возникает сложность с идентификацией (в терминах и биомаркеров, и морфологии). И наконец, требуется определить жизнеспособность клеток. Все эти характеристики необходимо оценить до начала подсчета. Для подсчета клеток можно использовать множество методов. Те, которые применяются для непосредственного подсчета (взаимодействуют с отдельными клетками, например, подсчет вручную или автоматизированная микроскопия) и те, которые применяются для косвенного подсчета (рассматривающие популяцию клеток).

Затем обсуждались исследуемые величины. К ним относятся общее число клеток и дифференциальное число клеток (подмножество рассматриваемых клеток), выраженные как «число клеток» с единицей 1. Есть также несколько производных величин, например, концентрация кле-

ток и поверхностная плотность клеток, выраженные как «число клеток на объем» и «число клеток на площадь» соответственно. Клеточные фракции можно выразить как «число рассматриваемых клеток», деленное на «общее число клеток». Существуют также другие величины, особенно для прокариотов, например, «число колониобразующих единиц на объем» и «число бляшкообразующих единиц на объем». Подчеркнута важность соответствующего практического обращения с материалом для подсчета клеток. Сюда относятся разбавление материала для получения оптимальной концентрации, важно также недопущение повреждения клеток и обеспечение однородности. Техника подсчета клеток вручную требует высокой квалификации оператора, так как некоторые принимаемые решения субъективны. В микроскопии с автоматизированной системой получения изображений использует алгоритмы подсчета, которые позволяют дифференцировать клетки по факторам, которые невозможны при простом наблюдении. Разработка надежных алгоритмов машинного обучения – важный аспект данной технологии, которая все же требует участия оператора, чтобы решить, что «считать» клеткой. Это подчеркивает важность определения измеряемой величины при подсчете клеток и роль экспертизы при определении номинального свойства (например, жизнеспособности клеток). Было задано несколько нерешенных вопросов в области клеточного анализа в отношении подсчета принципиально отличающихся объектов, понимания измеряемой величины для подсчета клеток, присвоения значений клеткам и свойствам клеток, а также роли экспертизы (как человеком, так и цифровым устройством) в клеточном анализе.

#### 2.2.5. «Подсчет частиц в воздухе» Константина Василатоу (METAS, Швейцария)

В презентации продемонстрирована важность определения числа взвешенных в воздухе частиц в контроле выхлопов наземных транспортных средств и воздушных судов, мониторинге биоаэрозолей, исследовании влияния аэрозолей на здоровье или климат и изготовлении продукции в чистых помещениях. Результаты измерений приводятся в терминах концентрации числа частиц (PNC), как правило, выраженной в см<sup>-3</sup> или м<sup>-3</sup> (и иногда также 1/см<sup>3</sup>, 1/м<sup>3</sup> и т.д.). Также используется обозначение #/см<sup>3</sup>, хотя и не так широко. Предельные значения концентрации числа частиц (PNC), выбрасываемых наземными транспортными средствами, закреплены в ЕС в законодательном порядке, и сейчас обсуждается вопрос о включении в Директиву Европейского союза по качеству окружающего воздуха

целевых значений концентрации числа частиц также для ультрадисперсных частиц. Средства для измерения PNC делятся на две категории: средства, которыми измеряют концентрацию общего числа частиц, например, оптические и конденсационные счетчики частиц, и средства, которыми можно дополнительно определять виды частиц, такие как мониторы биоаэрозолей, соединенные со средствами машинного обучения. Как правило, работа таких средств измерений заключается в «подсчете» отдельных частиц.

Прослеживаемость для концентрации общего числа частиц установлена в диапазоне от  $0,1 \text{ см}^{-3}$  примерно до  $60000 \text{ см}^{-3}$  через различные международные взаимные сличения, с расширенными (доверительный интервал 95%) неопределенностями измерений приблизительно до 2%. При PNC более  $1000 \text{ см}^{-3}$  конденсационные счетчики частиц калибруют по электрометру с цилиндром Фарадея, в то время как при более низких концентрациях для калибровок используют изготовленные на заказ оптические счетчики частиц или струйный аэрозольный генератор. Оптические и аэродинамические счетчики частиц и спектрометры для анализа размера частиц могут прослеживаться по изготовленным на заказ оптическим счетчикам частиц или струйному аэрозольному генератору в диапазоне размера частиц 100 нм – 15 мкм. Национальные метрологические институты в настоящее время работают над расширением диапазона прослеживаемости до более высоких значений PNC, актуальных для контроля выхлопов наземных транспортных средств и воздушных судов. Новое поколение счетчиков частиц, в сочетании с аналитическими методами, такими как лазерно-индуцированная флуоресценция, голография/микроскопия и машинное обучение, открывают новые возможности в области науки об аэрозолях, но на данный момент им не хватает прослеживаемости. Эти средства измерений в первую очередь разработаны для мониторинга пылицы, т.е. размеров частиц в диапазоне выше 15 мкм, для которых еще не существует первичных эталонов. Еще одна проблема связана с подготовкой алгоритмов машинного обучения, которые сейчас ограничены небольшим, но растущим числом видов пыли. Для достижения полной прослеживаемости к СИ, т.е. измерения количественной концентрации различных классов частиц, желательно международное сотрудничество между учеными в области аэрозолей и специалистами по обработке и анализу данных.

#### 2.2.6 Резюме обсуждений во 2-й день

В эксперименте с кремниевой сферой использованы атомные величины, например, «объем на атом», и поскольку «атом» был исключен

из выражения единицы измерения, существует опасность, что этот аспект будет забыт. Для обеспечения согласованности с Брошюрой СИ необходимо использовать только единицы СИ, что ограничивает использование единицы один для таких величин «число объектов». Тем не менее, должно быть описание того, что подсчитывается (например, численная концентрация). Вариант, предпочтительный с точки зрения СИ, заключается в полном описании этого в величине, в не во введении новых «единиц измерений». Еще один вариант – использовать «псевдоединицы» для указания того, что выражается, например, «копии/мл» для копий на миллилитр. Отмечалось, что заинтересованное сообщество использует многие из этих «псевдоединиц» по-разному и в нестандартизованном виде. В таких случаях должна быть ясность и согласованность в отношении того, какие «псевдоединицы» используются и для чего. Это легче осуществить в некоторых областях химии и биологии, где теоретически необходимо стандартизировать намного меньший установленный набор названий единиц измерений. Состоялось дальнейшее обсуждение количественной оценки неопределенности величин, выражающих число объектов. Частично эта неопределенность связана с неоднозначностью в определении самой измеряемой величины, а частично – с процедурой измерений.

Обсуждался вопрос, что должно произойти, чтобы реализация слабых токов с использованием одноэлектронных насосов была такой же удачной, как с использованием эффекта Джоулисона и квантового эффекта Холла. Это зависит от диапазона силы тока. При силе тока менее 100 пА насосы, вероятно, показали лучшие результаты, но на более высоких частотах их характеристики ухудшаются, что затрудняет работу при большей силе тока. Способом достижения более высоких токов может быть работа насосов параллельно с криогенными компараторами токов.

Реализация килограмма с использованием кремниевой сферы обсуждалась с точки зрения структуры и загрязнения поверхности. Важно максимально очищать поверхность, в полной мере определять ее характеристики и выполнять измерение в вакууме.

Вопрос идентификации измеряемой величины важен для подсчета частиц в воздухе, так как частицы имеют разную форму, состав и флуоресцентные свойства, и на данный момент средства измерений не могут их различать, измеряется средний оптический или аэродинамический диаметр.

#### 2.3. День 3

2.3.1. «Метрология величин, которые можно подсчитать в метрологии радионуклидов» Райан Фицджеральд (NIST, США)

В презентации охвачены вопросы распространности, философии и практической применимости подсчета в метрологии радионуклидов. Производная единица СИ беккерель (Бк) эквивалентна единице в секунду (1/с). К измеряемым величинам в метрологии радионуклидов относятся активность радионуклида (выраженная в Бк), удельная активность радионуклида в выборке, вероятность эмиссии, эффективность обнаружения. Методы измерений часто включают в себя подсчет. Во избежание двусмысленности для вероятности и эффективности требуются точные определения.

Существует фундаментальная связь между измерениями активности и измерениями количества вещества, поскольку для заданного радионуклида в определенной выборке и в определенный момент времени активность ( $A$ ) связана с числом атомов ( $N$ ) формулой  $A = N\lambda$ . Данное соотношение применяется для измерения постоянной распада ( $\lambda$ ) радионуклида посредством измерения количества и активности в одной и той же пробе. Интересно, что измерение количества может основываться на масс-спектрометрии, которая сама по себе является методом подсчета.

Одна из проблем касается неправильного представления результатов, с использованием Гц вместо 1/с в качестве единицы для скорости непериодического подсчета. Другой вопрос – смешение определения измеряемой величины с единицей измерений, например, использование «подсчетов в секунду» (cps) или «распадов в минуту» (dpm) в качестве единиц измерения.

Если измеряемыми величинами являются вероятность эмиссии частиц или эффективность обнаружения, может возникнуть двусмысленность, особенно в отношении знаменателя (нормировки) величины. В данном случае поможет точное определение уравнения измерений. Дополнительная неясность имеет место в случаях, когда значения вероятности выражены в процентах, и неопределенности также выражены в процентах.

Были упомянуты такие технические сложности, как наложение устройств обнаружения и время простоя из-за вероятностной природы распада радионуклидов, спектроскопические помехи, которые вызывают неясность в отношении того, какой распад радионуклида подсчитывают. Была подчеркнута необходимость согласования метрологического стандарта и практического применения. Консультативный комитет по ионизирующим излучениям (CCRI) работает над распространением в соответствующей области знаний по надлежащему использованию СИ.

2.3.2. «Измерение путем подсчета в метрологии длины» Алессандро Балсамо (INRIM, Италия)

В выступлении приведены примеры измерения длины путем подсчета. В интерферометрии длина измеряется путем «подсчета» периодов интенсивности сигнала. Можно привести подсчет из других данных, например, посредством калибровки концевых мер с использованием интерферометра Физо. В этом примере подсчет непосредственно не выполняется, поскольку порядок интерференции оценивается без подсчета. Примером является использование кодирующих устройств в промышленной метрологии, которыми измеряют положения посредством периодического сигнала, практически как в интерферометрии. Подсчитываются «циклы» и измеряется фаза внутри цикла. Ещё пример – подсчет межатомного расстояния и шагов в решетке Si, который используется в качестве вторичной реализации метра, применяемой в нанометрологии.

В презентации рассматривалось важное разграничение между «подсчетом» как процессом измерения (интерференционных полос, циклов сигнала или атомных слоев), и «исчисляемым» как характеристикой величины (число людей на данном семинаре, число молекул в ящике, число атомов в кремниевой сфере). Для подсчета требуется разделение объектов. Это разделение выполняют на основе пороговых значений (уровня сигнала для ускорения подсчета, контрастности изображения для подсчета пятен на изображении, или между различными людьми, которые садятся на самолет, посредством визуального осмотра или турникета). Пороговая чувствительность может быть или не быть единицей. Если она составляет единицу, неопределенность подсчета может приближаться к нулю. Если нет, подсчет может быть возможен только для скоплений или совокупностей. С другой стороны, исчисляемые величины по своей природе не зависят от того, как они измеряются. Они имеют конечную мощность множества, которая может быть связана один к одному с натуральными числами, и являются дискретными по своей природе. Неисчисляемые величины имеют бесконечную мощность множества (хотя размер физических объектов можно рассматривать как дискретную величину, так как объекты выполнены из отдельных атомов и молекул). Нет неопределенности в отношении определения, связанного с исчисляемыми величинами как таковыми, но может иметься некоторая неопределенность, связанная с определением объектов, которые подсчитываются, как упоминалось в предыдущих презентациях.

Данный тезис был кратко изложен с помощью четырех возможных состояний, возникающих в связи с этим. Во-первых, исчисляемые величины,

измеряемые путем подсчета (например, число людей, которые садятся на самолет, подсчитанное на входе). Во-вторых, неисчисляемая величина, измеряемая путем подсчета (например, длина, измеренная путем подсчета полос интерферогаммы). В-третьих, исчисляемая величина, не измеряемая путем подсчета (например, число номинально идентичных элементов в наборе, измеренных путем взвешивания отдельного элемента, а затем всего набора). И наконец, неисчисляемая величина, не измеряемая путем подсчета, считается «обычным случаем» и не рассматривается отдельно на данном семинаре. Была высказана рекомендация, что различие между подсчетом как процессом измерения и «исчисляемым», как характеристикой величины, в будущем должно быть определено точнее.

### 2.3.3. «Секунда СИ как подсчет колебаний и многого другого» Элизабет Донли (NIST, США)

С 1960 и по 1967 годы секунда определялась, как доля тропического года для 1900 года, но с 1967 года был принят определение, которое связывало секунду с продолжительностью нескольких периодов частоты сверхтонкого расщепления  $^{133}\text{Cs}$ . Возможно, выглядит так, что секунда реализуется путем подсчета периодов, в то время как наоборот она больше связана с частотой измерения. Изменение формулировки определения в 2019 году ясно показало, что частота важна. Секунда СИ необходима для реализации определения всех остальных основных единиц СИ, кроме моля. В настоящее время секунда может быть реализована с неопределенностью 1 часть в  $10^{16}$ , в то время как оптические частоты можно сравнить с неопределенностью 6 частей в  $10^{18}$ . Эталоны атомной частоты используют резонансное электромагнитное поле, чтобы вызвать переходы между уровнями энергии электронов. Частота генератора «эталона» — это частота поля, которая вызывает переходы между показаниями «часов». Оптические часы в Боулдер-сити используют оптические частоты (которые больше не являются «исчисляемыми», даже если в теории таковыми были микроволновые частоты) для различных атомов. Стремительный прогресс в оптических часах стал возможным благодаря достижениям в технологии гребенок оптических частот. Эталоны оптической частоты сейчас имеют точность, намного превышающую точность эталонов микроволновых частот, что вероятно, повлечет за собой уточнение определения секунды в ближайшем будущем. Измерения оптической частоты уже возможны при неопределенностях в несколько частей в  $10^{18}$ . Приведен пример, в котором два независимых оптико-электронных делителя частоты производили микроволновые волны частотой 10 ГГц и фа-

зой, точно отслеживающей собственные Yb часы и дающей нестабильность абсолютной частоты, равную 1 части в  $10^{18}$  в электронной области. Микроволновая частота составляла всего  $10^{10}$  Гц, но она измерена до  $10^{18}$ , так как при измерении отслеживалась фаза и не считались циклы. Вышеизложенное подтверждает вывод, что эта техническая область не подсчитывает периоды излучения, но вместо этого частотные коэффициенты измерялись через синтез частот.

### 2.3.4. «Кандела — путем подсчета фотонов?» Штефан Кюк (PTB, Германия)

Кандела (кд) является единицей СИ силы света в заданном направлении. Ее определяют, приняв заданное числовое значение  $K_{\text{cd}}$  световой эффективности монохроматического излучения частотой  $540 \cdot 10^{12}$  Гц, равным 683, при выражении в единице измерения  $\text{лм} \cdot \text{Вт}^{-1}$ , равной  $\text{кд} \cdot \text{ср} \cdot \text{Вт}^{-1}$ , или  $\text{кд} \cdot \text{ср} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^3$ , где килограмм, метр и секунду определяют в терминах  $h$ ,  $c$  и  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ . Это означает, что кандела соответствует интенсивности излучения 1/683 ватт настерадиан для монохроматического излучения частотой  $540 \cdot 10^{12}$  герц. Измеренные величины в фотометрии следует рассматривать как спектрально интегрированные величины, при этом интеграция выполняется по произведению радиометрической величины и функции световой эффективности. Наиболее важной из этих функций является функция фотопической световой эффективности для светоадаптированного глаза  $V(\lambda)$ , которую определяет МКО по длине волны от 360 нм до 830 нм с интервалом 1 нм.

При выражении канделы в числовом виде интенсивность излучения 1/683 Вт/ср соответствует  $4,091942356 \dots \cdot 10^{15}$  фотонов/(ср·с) при частоте  $540 \cdot 10^{12}$  Гц. Однофотонные детекторы, такие как кремниевые однофотонные лавинные диоды (SPAD), могут измерять более низкие интенсивности излучения, например,  $4,091942356 \dots \cdot 10^6$  (фотонов/(ср·с)), что соответствует 1 нКд; однако прослеживаемость к классическим радиометрическим методам в настоящее время является более точной, чем к квантовым подходам. Генерация отдельных фотонов — еще один перспективный метод в области фотонных методов, при котором используются такие ресурсы, как полупроводниковые квантовые точки, отдельные молекулы или центры окраски в алмазах. Тем не менее, на точность измерения влияет внутренняя квантовая эффективность и эффективности улавливания фотонов. Важно отметить, что кандела является единицей силы света, поэтому должна включать в себястерадиан, который иногда опускается в ходе таких рассмотрений. Реализация канделы путем подсчета или генерации

отдельных фотонов на данном этапе не настолько точная, как классический метод с использованием криогенного радиометра.

Несмотря на ограничения, однофотонные источники находят применение в квантовой метрологии, в частности, в квантовой радиометрии и метрологии субдробового шума. Они предлагают субпуассоновскую статистику фотонов и демонстрируют эффект антигруппирования, который для классических источников света или лазеров недостижим. Однофотонные источники могут быть особенно полезными, если они используются вместе с цифровыми детекторами, такими как SPAD диоды.

В данной презентации также исследовались отношения между канделой и молям. В принципе моль может заменить число фотонов и выразить канделу как  $6,794830142 \cdot 10^{-9}$  (моль/ср)/с при  $540 \cdot 10^{12}$  Гц. Примечательно, что моль является единицей количества вещества, а фотоны иногда ведут себя как частицы. В садоводстве фотоны и моль объединяются в такие величины, как PPFD (плотность фотосинтетического фотонного потока) с единицей измерения ( $\mu\text{моль}/\text{м}^2/\text{с}$ ). Однако недостаточно знать только число фотонов: понимание спектра фотонов и спектра действий приемника также важны.

Таким образом, хотя подсчет фотонов может быть полезен во многих применениях, реализация канделы путем подсчета фотонов на данный момент не является оптимальной. Развивающиеся области, такие как освещение для садоводства, подчеркивают важность сочетания фотонов и моля. Вопрос о том, может ли число фотонов описываться как количество вещества, остается открытым для обсуждения.

### 2.3.5. Резюме обсуждений в 3-й день

Состоялась дискуссия о «пороговом значении», необходимом для подсчета чего-либо, является ли это формой калибровки или просто вопросом определения. В некоторой степени это зависит от рассматриваемого явления. Было отмечено, что в случае кремниевой решетки эти «пороговые значения» можно было легко выделить.

Были заданы дальнейшие вопросы о различии между Гц и  $\text{с}^{-1}$ . Это вернуло разговор к вопросам о псевдоединицах, в особенности об использовании «цикла». Отмечалось, что в своей текущей деятельности Целевая группа по углу и безразмерным величинам в Брошюре СИ (TG-ADQSIB) Консультативного комитета по единицам измерений (CCU) изучает некоторые из этих вопросов.

Было также указано, что подсчет фотонов имеет большую неопределенность, чем текущие методы реализации фотометрических величин, и, если эти методы можно будет улучшить, это может привести к новому определению канделы.

### 2.3.6. «Заключительные замечания: как должно отреагировать метрологическое сообщество»

Сан-Райул Парк (Президент CCQM, KRISS, Республика Корея) и Йоахим Ульрих (Президент CCU, PTB, Германия)

Сан-Райул Парк уделил внимание вопросам, которые возникают у CCQM. Он рассуждал об обязанности метрологии защищать от ошибок или путаницы при выполнении измерений. Было отмечено, что достижения в области технологий открыли гораздо более широкий диапазон измеряемых величин, которые можно измерить путем подсчета или выразить как величину «число объектов». Было предложено, чтобы специальная рабочая группа по молю CCQM могла вести обсуждения данной темы и осуществлять любые решения в рамках CCQM, и в этом могли бы быть задействованы все соответствующие технические рабочие группы CCQM. Такая работа будет тесно связана с CCU.

Йоахим Ульрих представил некоторые предварительные идеи в отношении того, как рассматривать темы, поднятые на семинаре. Первая идея заключалась в предоставлении отчета о семинаре с основными выводами. В качестве второй идеи было предложено существующей Целевой группе TG-ADQSIB Консультативного комитета по единицам измерений (CCU), которая изучает угол и безразмерные величины в целом, расширить сферу своей деятельности и членский состав, чтобы решить вопросы улучшения формулировок в Брошюре СИ в отношении подсчета и величин «число объектов». Далее было высказано предложение о том, чтобы рабочая группа WG-CMT CCU, которая занимается определением основных метрологических терминов, также могла бы рассмотреть определения, относящиеся к темам, которые обсуждались на семинаре и далее достигли бы рабочей группы JCGM-WG2:VIM.

Йоахим Ульрих поделился более общими мыслями о необходимости цифровизации и установлении требований для четкого межмашинного взаимодействия. Такие соображения важны для цифровизации терминов, связанных с подсчетом и величинами «число объектов». В частности, важно признать, что метрология величин, которые можно подсчитать, прекрасно вписывается в общие понятия метрологии, поскольку эти величины представляют собой всего лишь подмножество всех величин. Кроме того, единица один является необходимой составляющей любой системы единиц. Вновь было подчеркнуто, что важно различать подсчет как процесс измерения, величины, которые могут быть реализованы путем подсчета, и величины, которые выражают число объектов.

### 3. Выводы и последующие шаги

Председатель объявил заседание закрытым, заявив, что был достигнут значительный прогресс по обсуждаемым темам. Очевидно, что в результате дискуссии сделаны некоторые выводы и сформулированы предложения по последующим шагам.

В ходе обмена информацией было предложено следующее:

1. Необходимо провести четкое различие между «подсчетом» как процессом измерения, и «числом объектов», как выражением количества.

2. Поскольку в рамках СИ для описания величин, связанных с числом объектов, имеется только единица один, важно всегда использовать точное словесное описание рассматриваемой величины.

3. В некоторых случаях была бы полезна стандартизация номенклатуры для величин «число объектов» и некоторых соответствующих «псевдовеличин» нижнего уровня СИ, особенно для цифровизации.

В отношении прослеживаемости и принадлежности было предложено следующее:

4. Для прослеживаемости величин «число объектов» не требуется эталон; она устанавливается посредством соответствующих валидированных методик измерения (так же, как и для величин соотношения).

5. Такое отсутствие эталона может вызвать проблемы, связанные с иерархией измерений и определением основы для сравнения наивысшего уровня (поскольку эти величины часто будут определяться специальными методами).

6. НМИ/НИ должны поддерживать прослеживаемость для важных величин «число объектов», при этом методы, применяемые в НМИ/НИ, считаются основой для сравнения наивысшего уровня в рамках иерархии калибровки. Многие такие величины будут относиться к области химии и биологии.

Кроме того, отмечалось, что предстоит выполнить дальнейшую работу над пониманием вычисления неопределенности для величин «число объектов», а также над различием сложностей определения и измерения этих величин в физических, химических и биологических дисциплинах.

После семинара участникам было направлено электронное письмо от имени Руководящего комитета, в котором было изложено, как полученные результаты будут воплощаться в жизнь, и намечены соответствующие действия для метрологического сообщества.

«Недавно проведенный семинар CCU/CCQM на тему «Метрология величин, которые можно подсчитать» имел большой успех у докладчиков, которые обсуждали аспекты подсчета и величин «число объектов» во многих различных областях метрологии. В этих трех сессиях участвовало 314 человек. Были определены некоторые вопросы, требующие разъяснения, связанные с трактовкой подсчета как процесса измерения и описанием величин «число объектов» в Брошюре СИ и в VIM.

В рамках последующей деятельности по итогам семинара существующая Целевая группа по углу и безразмерным величинам в Брошюре СИ Консультативного комитета по единицам измерений (CCU) создаст фокус-группу, в том числе из участников Консультативных комитетов, которые определили конкретные вопросы для рассмотрения (например, CCQM, CCRI и CCPR). Фокус-группа должна представить предложение в CCU о том, как уточнить текст Брошюры СИ в отношении подсчета и величин «число объектов». После согласования предложенных изменений в Брошюру СИ Консультативные комитеты могут основываться на них при пояснении аспектов, связанных с подсчетом при практическом применении для соответствующих областей. Трактовка подсчета и величин «число объектов» в VIM будет реализовываться отдельно рабочей группой JCGM-WG2:VIM, многие представители которой присутствовали на семинаре».

Более долгосрочной целью, не упомянутой в данном письме, является подготовка официального стандарта, в котором будут каталогизированы и установлены определенные «псевдоединицы», которые можно использовать вместо единицы один для указания рассматриваемых объектов при выражении величин «число объектов». Вероятно, внимание будет сосредоточено на области биологии и химии.

УНИКАЛЬНОЕ ПРЕДЛОЖЕНИЕ НА РЫНКЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛУГ



## МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АУДИТ

Республиканское унитарное предприятие «Белорусский государственный институт метрологии»  
Старовиленинский тракт, 93, г. Минск, Республика Беларусь, 220053

Производственно-методический отдел общей метрологии Телефон: +375 17 363 57 99 E-mail: po@belgim.by

[www.belgim.by](http://www.belgim.by)