



ВЫБОР МЕРЫ ФИЗИЧЕСКОГО СТИМУЛА И УРАВНЕНИЯ В ПСИХОФИЗИКЕ

ПАХОМОВ А. П., Российский университет дружбы народов, Москва

В статье проверяется предположение о том, что функции, полученные в психофизическом эксперименте, зависят от меры, выбранной для репрезентации величины физического стимула.

Ключевые слова: психофизическое шкалирование, кривые Фехнера и Стивенса, отношение Вебера, мера физического стимула.

Измерение физического стимула обычно имеет несколько альтернатив, следовательно, выбор шкалы стимула может определять: а) величину экспоненты в показательной функции; б) величину константы k в логарифмической функции (функции Фехнера); в) форму психофизической функции (показательная, логарифмическая или какая-либо иная); г) величину отношения Вебера и степень его постоянства; д) междименсиональные корреляции между показателем степенной функции и динамическим диапазоном стимула.

Чаще всего психофизическое шкалирование может быть описано как метод, предназначенный для продуцирования шкалы отношений или, по крайней мере, шкалы равных интервалов субъективных величин (Stevens, 1951) при связывании их со шкалированными величинами соответствующих физических измерений стимула. То есть целью психофизического шкалирования является определение природы функции, связывающей субъективную величину (ψ) с физической величиной (ϕ) в формуле $\psi = f(\phi)$.

Классическим решением проблемы шкалирования является закон Фехнера (Fechner, 1860). Поскольку на нескольких сенсорных измерениях были получены доказательства того, что для получения ЕЗР в ψ требуется примерно постоянное относительное или пропорциональное изменение в ϕ (закон Вебера), то Фехнером был сформулирован принцип, согласно которому последовательное с равными интервалами увеличение ϕ соответствует увеличению с равными отношениями в ψ . Таким образом, закон Фехнера гласит, что субъективные величины являются линейной функцией логарифма соответствующих физических величин стимула (т.е. $\psi = k \log \phi$).

В настоящее время закон Фехнера повсеместно вытесняется законом Стивенса как результатом применения альтернативного метода психофизического шкалирования. В ходе экспериментальных исследований с применением методов «прямого» шкалирования (когда испытуемые самостоятельно измеряют свои ощущения, выносят оценку наблюдаемому физическому событию, либо определяют численные значения физических величин, т.е. устанавливают связь или определяют отношения между наблюдаемыми физическими величинами) Стивенс обнаружил, что субъективные величины на так называемых протетических сенсорных континуумах и величины на соответствующих измерениях физического стимула связаны между собой функцией общего вида $\psi = k \phi^n$, где ψ – субъективная величина; k – константа, зависящая от различных линейных преобразований единиц измерения ψ и ϕ ; n – показатель, определяющий форму показательной функции и определяемый эмпирически для данной измерения ощущения.



Целью настоящей работы является привлечение внимания к тому факту, что физические стимулы обычно могут измеряться более чем одним способом, что может оказаться критическим для описания феноменов в психофизике. Стимулами в психофизике являются основные физические величины – длина, масса, время, вес, плотность, частота стимула, сила, энергия и т.д., т.е. такие величины, изменения которых можно описать через базисные величины с помощью простых математических функций. Приписывание чисел основным физическим величинам в общем случае трактуется как пример экстенсивного измерения (Krantz et al., 1971).

И шкалирование по Фехнеру, и «прямые» методы Стивенса можно рассматривать как процедуры приписывания чисел субъективным величинам. По Стивенсу, связь субъективных величин с приписываемыми числами в случае экстенсивного измерения определяется установлением единицы измерения и абсолютным нулем, что приводит к построению шкалы отношений, которую, наряду с номинальной, порядковой, интервальной шкалами, выделял Стивенс. В многочисленных теоретических работах, посвященных данной тематике, подробно рассматривалась суть измерения физических величин, а также его связь с измерением психологических и субъективных величин (Krantz et al., 1971). В то же время тематика основной части научных работ по проблемам психофизического шкалирования касалась свойств функции, связывающей субъективные шкалы с физическими, а измерению физического стимула внимания уделялось значительно меньше.

Как показано в работе А. Майерса (Myers, 1982), построение психофизической функции зависит от измерения самого физического стимула. Ведет ли «прямое» психофизическое шкалирование к построению показательной, логарифмической или любой другой функции, может определяться тем, какое из свойств стимула выбрано для описания его «интенсивности». Кроме того, в зависимости от принятой меры физического стимула может меняться величина экспоненты в показательной функции, построенной по результатам «прямого» шкалирования, а в случае логарифмической функции Фехнера будет меняться величина константы k в выражении $\psi = k \log \phi$.

Кроме того, если представить величину отношения Вебера как функцию величины приращения раздражителя, то можно заметить, что отношение Вебера является константой при одном варианте шкалирования ϕ , но изменяется систематическим образом при переходе к другим вариантам шкалирования ϕ при той же модальности ощущения. Следовательно, решение вопроса о том, каким образом могут быть представлены закономерности, сформулированные Фехнером, – в виде логарифмической зависимости или какой-либо иной функции, – также может зависеть от меры методов, единиц и критериев измерения стимула.

Большая часть изложенного ниже материала имеет отношение к исследованиям Стивенса. Это связано с тем, что: во-первых, показательный закон можно считать общим принципом, который является одинаково приложимым ко всем интенсивным измерениям ощущения: «В каждой сенсорной модальности ощущение является степенной функцией стимула» (Stevens, 1966). Во-вторых, степенная функция является наиболее предпочтительной функцией для описания психофизических закономерностей. В-третьих, в работах Стивенса было исследовано и введено в единую понятийную систему значительно большее число различных сенсорных измерений, чем в работах какого-либо другого исследователя. И наконец, в-четвертых, Стивенс придавал большое значение не только репрезентативности метода определения психофизической функции для протетического континуума, но и расчету абсолютной величины экспоненты для выбранной димензии ощущения.



Рассмотрим некоторые димензии ощущений, при работе с которыми во многих работах получались и анализировались психофизические показательные функции с эмпирически установленными значениями показателей степени n . Итак, значение показателя степени дает информацию об основных свойствах системы «вход/выход» для различных сенсорных димензий (Stevens, 1966). Оно характеризует пропорциональность, с которой выход системы, обозначенный как ψ , изменяется как функция входа стимула ϕ . Например, в одной из работ Стивенса представлены 14 сенсорных димензий, имеющих значения показателя степени в диапазоне от 0,33 для яркости как функции светлости однородной светящейся стимульной поверхности до 3,5 для субъективной величины ощущения как функции электрического раздражения пальцев руки (Stevens, 1966). Значения этих показателей степеней рассматриваются как характеристические параметры тех или иных систем, которые дают важную информацию о лежащих в их основании механизмах опосредования сенсорной интенсивности (Stevens, 1966). Показатель степени, равный 1,0, указывает на прямую пропорциональность между ощущением и стимулом. Считается, что малые значения показателя степени для громкости ($n < 1,0$) означают, что ухо действует как «компрессор», т.е. происходит сжатие, а большие значения показателя степени в случае удара электрическим током предполагают действие некоторого «расширителя» (Stevens, 1959 а).

Однако нет смысла сравнивать показатели степени в психофизических функциях для таких параметров раздражителя, как громкость, яркость, сила электрического удара, тяжесть, если нет приемлемой классификации методов шкалирования ощущений при различных димензиях физического стимула. Существуют альтернативные способы шкалирования физического стимула, однако не всегда ясно, что именно может конституировать эквивалентное шкалирование стимула в различных сенсорных димензиях. Данный вопрос можно прояснить, если рассмотреть, как использовались физические шкалы измерения в различных задачах психологического шкалирования, и увидеть, как это может влиять на психофизические уравнения.

Предпочтительнее начать анализ указанных проблем с рассмотрения ощущений яркости и громкости, так как именно эти случаи являются, вероятно, наиболее простыми и наглядными в силу того, что меры соответствующих стимулов, обычно используемые для этих димензий, могут быть прямо связаны с мощностью стимула или пропорцией потока энергии. Рецепторы являются преобразователями энергии стимула в нейронную активность. При шкалировании яркости светлота используется обычно как мера интенсивности стимула. Независимо от используемых единиц измерения светлота (яркость) описывается следующей формулой: $L = dE/d\Omega \cos\theta$, т.е. представляет собой отношение освещенности (светового потока) E в точке плоскости, перпендикулярной направлению на источник, к элементарному телесному углу, в котором заключен световой поток, создающий эту освещенность. Другими словами, если считать постоянным распределение спектральной энергии, тогда светлота прямо пропорциональна энергии стимула. Однако чаще встречаются описания интенсивности видимого электромагнитного излучения не в терминах его плотности мощности, а в терминах интенсивности собственно электромагнитного поля. Если распространить такой метод (который стал общепринятым при измерении полей радиочастоты) на измерение света, то тогда светлоту (яркость) можно описать как в виде линейной функции мощности (энергетического потока излучения), так и через интенсивность, пропорциональную квадрату амплитуды поля (когда мы имеем дело с затуханием поля, что, собственно, здесь и предполагается).



С позиций измерения оптической интенсивности как мощность электромагнитного поля, так и его интенсивность могут быть одинаково информативны, но с точки зрения психофизического шкалирования различия состоят именно в том, какая мера используется. И здесь мы еще раз отметим, что если ψ является показательной функцией одной шкалы стимула ϕ и если необходимо сохранить показательную функцию второй шкалы стимула ϕ^* , то эти две шкалы стимулов должны быть показательными трансформациями друг друга, т. е.:

$$\text{если } \psi = a \phi^n \text{ и } \psi = b (\phi^*)^m,$$

$$\text{то тогда } \phi^* = [(a/b) \phi^n]^{1/m} \text{ или (принимая, что } a/b = c) \phi^* = c \phi^{n/m}.$$

Тот же вывод вытекает из следующей логической цепочки: если две альтернативные шкалы измерения свойств стимула, между которыми существует простая связь, являются показательными трансформациями друг друга, а психофизическая показательная функция ψ была вычислена для одной из шкал измерения свойств стимула, то та же ψ должна являться показательной функцией для другой шкалы измерения свойств стимула ϕ^* и при этом отношение двух значений показателей степени должно равняться значению показателя степени трансформации экспоненциальной связи между этими шкалами стимула.

Простым примером этого положения является случай, когда имеются описания мощности светового поля (светлота) и интенсивности электромагнитного поля, которые и можно считать альтернативными трансформациями экспоненциальной связи между двумя признаками интенсивности стимула. При анализе результатов эксперимента, проведенного на материале оценки испытуемыми светящихся кругов малого размера (Stevens, 1966), был сделан вывод о том, что яркость является показательной функцией светлоты вида $\psi = k \phi^{0,33}$. Но если интенсивность стимула связана с интенсивностью электромагнитного поля, а не с мощностью, тогда показатель степени должен быть равен 0,66, а не 0,33, так как мощность пропорциональна квадрату напряженности (или интенсивности) электрического поля. Если психофизическая функция действительно является показательной, то тогда она должна оставаться показательной независимо от того, какая из измерительных шкал используется, поскольку они являются степенными трансформациями друг друга, однако так или иначе значение показателя степени будет зависеть от используемых мер стимула.

Интересно упомянуть о возможностях использования шкалы дБ в качестве абсолютной шкалы измерения интенсивности визуальных стимулов, которая в данном случае имеет характер показательной шкалы и применяется для измерения отношения (в единицах децибелов) величины энергии измеряемого стимула с величиной энергии некоторого референтного стимула (обычно величиной абсолютного порога). Причем единицы измерения величины энергии зрительного стимула могут быть также преобразованы в дБ, если эти величины измеряются в единицах мощности поля: число децибелов просто удваивается.

О существовании шкал, относящихся как к измерению энергии, так и к измерению интенсивности стимула, вероятно, лучше знают те экспериментаторы, которые работают в области исследования слуха (используя и ту, и другую шкалы), нежели те, кто работает в области исследования зрения. Если взять за основу предположение о том, что среда имеет постоянную величину акустического затухания (как это принято в исследованиях психофизических характеристик слуха), тогда можно считать мощность звуковой волны пропорциональной квадрату акустического давления.

Если принять, так же как в случае шкалирования яркости, что громкость является показательной функцией акустической интенсивности, тогда показатель степени должен быть удвоен при условии, что ϕ в формуле $\psi = k \phi^n$ является акустическим давлением, а



не акустической мощностью. Этот факт используется в некоторых работах Стивенса по шкалированию громкости (Stevens, 1966). В одних работах он определяет стимул просто как акустическое давление и приводит значение показателя степени, равное 0,6 (Stevens, 1959a); в других работах он определяет стимул как акустическую мощность и приводит значение показателя степени, равное 0,3 (Stevens, Galanter, 1957); кроме того, в некоторых своих работах он переходит от одного значения к другому (Stevens, 1966).

В этом отношении димензия величины удара электрическим током вызывает особый интерес. При сравнении показательных функций различных димензий ощущение сила электрического удара всегда имеет самое крайнее значение показателя степени, равное примерно 3,5 единицы. Эти графики и таблицы многократно повторяются во всех учебниках и обычно сопровождаются утверждениями о том, что значение показателя степени (или наклон функции) указывает на пропорцию, с которой параметры выхода системы (ощущение) возрастают как функция параметров входа системы (физическая интенсивность). Значение функции для электрического удара является наибольшим по сравнению с другими значениями. Но что является входом системы? В экспериментах Стивенса физическим стимулом является раздражение пальцев испытуемого электрическим током (I) в миллиамперах (Stevens, 1959b), что и явилось димензией стимула, использованной в большинстве психофизических работ по измерению данного вида раздражителя (Hawkes, 1960).

Начиная с исследования, проведенного в 1959 году, Стивенс стал использовать шкалу дБ для измерения интенсивности электрического удара так же, как это он делал для света и звука (Stevens, 1959a). Хотя и не было показано, как именно единицы измерения величины удара преобразуются в дБ, однако из приведенных описаний исследования следует, что дБ электроудара должны быть подсчитаны как $\text{дБ} = 10 \log (I_a^2 / I_b^2)$, где I_a является током удара, который должен быть выражен в дБ, а I_b является величиной тока референтного стимула. Можно только догадываться о причинах высказанного Стивенсом предположения о том, что квадрат величины тока пропорционален величине мощности стимула и, следовательно, для того чтобы применить величину, предназначенную для измерения силы электроудара и выражающуюся в дБ, к измерению также в дБ звуковых и световых величин, его надо отнести к мощности стимула. Но интересно, что, предварительно выбрав I^2 как меру, в наибольшей степени сходную с величинами мощности света и звука, он, видимо, не посчитал необходимым использовать I^2 для шкалирования ϕ в психофизических экспериментах при вычислении показательных функций субъективной интенсивности электроудара. Если бы ϕ было шкалировано в I^2 , а не в I , то тогда показатель степенной функции имел бы меньшее значение и был бы равен 1,75, а не был бы самым большим и равным 3,5. В действительности существуют весомые доказательства того, что при работе с обычными электродами в процедурах электрической стимуляции импеданс (сопротивление) человеческой ткани постоянно изменяется как функция величины тока и потому I^2 не является точной величиной мощности стимула. По этой же причине, когда величина стимула определяется через приложенное напряжение (U), то не существует простой связи между величиной и мощностью стимула, приводящего к стимуляции нервных тканей. При средней константе импеданса мощность прямо пропорциональна U^2 .

Этот факт был принят во внимание в работе, в которой импеданс кожи контролировался таким образом, что могли быть вычислены психофизические функции для измерения величин тока или мощности. В работе делается вывод о том, что величина субъектив-



ного ощущения силы электроудара является показательной функцией величины стимульного тока и имеет значение показателя степени, примерно равное 2,26. При этом субъективная величина электроудара является показательной функцией мощности стимула со значением показателя степени примерно вдвое меньшим. Это единственное исследование, в котором показано, что различные способы шкалирования величины воздействия электрического тока результируются в различные функции ощущения.

Рассмотрим величину интенсивности вибрации как функцию амплитуды вибристимула (A). Единицы измерения этой шкалы стимулов Стивенс также конвертировал в дБ. И снова в сообщении о проведенных экспериментах (Stevens, 1959c) не содержится ясного описания такого вида преобразования. Правда, оказывается возможным определить это косвенно, на основании приводимых в тексте сообщения данных, и тогда при проведении вычислений получается, что $\text{дБ} = 10 \log (A_a^2/A_b^2)$, где A_a – измеряемый стимул, A_b – референтный стимул. Таким образом, в этой своей работе Стивенс так или иначе оговаривает, что физическая величина стимула должна быть в данном случае отнесена к мощности, собственно, в этом случае мы и получаем возможность преобразовать ее значения в единицы дБ, и тогда мощность вибрации будет пропорциональна A^2 (Stevens, 1959c). Однако также необходимо учесть, что при подсчете значения показателя степени в психофизической функции для этой модальности Стивенс использует просто амплитуду стимула, т. е. A вместо A^2 .

Основываясь на примере рассмотрения таких физических величин, как громкость, яркость, электрический заряд и вибрационное ускорение, методов их шкалирования, основанных на унификации единиц измерения и преобразования их в единицы измерения мощности, а также на вычислении психофизических показательных функций с определением значений показателя степени, попытаемся экстраполировать полученные закономерности на другие сенсорные димензии. Можно напомнить, что при этом в упомянутых выше четырех модальностях осуществлялась попытка шкалирования в единицах дБ (Stevens, 1966). В качестве примера можно рассмотреть эксперименты с регистрацией и шкалированием субъективного ощущения тяжести при измерении веса предмета. В классических экспериментах с поднятием тяжестей применялся метод установления отношений и был сделан вывод о том, что тяжесть является показательной функцией веса, а также сообщалось о значении показателя степени, равном 1,45 (Stevens, 1966). Тем не менее, остается открытым вопрос о том, почему именно вес должен быть использован в качестве меры стимула при шкалировании тяжести? Могут ли быть единицы измерения веса соизмеримыми с единицами измерения стимула, используемыми при шкалировании звуковых и световых зрительных стимулов?

В психофизических исследованиях с поднятием тяжестей дело обстоит куда сложнее, так как в оценку тяжести, видимо, вовлечен более чем один тип рецепторов. Поэтому есть некоторые основания полагать, что психофизическая функция, связывающая тяжесть с весом, является сравнимой с аналогичной функцией, связывающей яркость со светлотой. Поскольку не имеется никаких оснований полагать, что величина энергии, преобразуемой релевантными рецепторами тяжести, прямо пропорциональна величине оцениваемого веса, шкалу веса при оценке тяжести можно рассматривать как эквивалентную шкале светлоты при оценке яркости.

Относительно других димензий можно лишь добавить, что найти основания для сравнения результатов шкалирования физических стимулов в этих случаях еще труднее. Каким образом, например, следует сравнивать частоту появления стимула в исследованиях зре-



ния и слуха, длину линии, численность точек на карте, силу сжатия, шероховатость поверхности и концентрацию пахучего вещества (и это далеко не полный список)? Если значения этих модальностей могут быть описаны различными функциями «входа/выхода», то как узнать, что эти различия не определяются в большей степени лишь различиями в способах определения величины стимула для каждой из них?

Работа Стивенса, посвященная шкалированию субъективной шероховатости и гладкости, также показывает возможность использования альтернативных измерений стимула. Стимулами в данном случае стали различные виды наждачной бумаги; испытуемый должен был оценить каждый из представленных образцов на предмет шероховатости, грубости поверхности бумаги и пронумеровать образцы в соответствии со степенью выраженности данного признака. В результате проведенных измерений был получен показатель степени, равный 1,5. В работе уточняется, что «для выполнения целей исследования номер образца наждачной бумаги может рассматриваться как соответствующий определенному диаметру зерна». Теперь предположим, что стимулы будут прошкалированы в соответствии с плотностью частиц материала, т. е. по числу частиц на единицу площади, тогда величина плотности будет пропорциональна квадрату диаметра соответствующей частицы (если допустить, что песчинки различных размеров расположены настолько плотно, насколько это возможно, на поверхности бумаги). В этом случае значение показателя степени для плотности частиц должно быть 0,75, т. е. быть в половину меньше своего заявленного значения в 1,5 единицы.

Приведенный выше пример является случаем, когда одна величина стимула соответствует значению показателя степени, большему 1, что в работах Стивенса обычно интерпретируется как наличие класса «расширителей» сенсорных преобразований, а другая величина соответствует значению показателя степени, меньшему 1,0, что интерпретируется как «сенсорная компрессия» (Stevens 1959a, 1966).

Основная часть изложенного выше материала относилась к обсуждению различных методов и результатов шкалирования физического стимула с точки зрения определения степенной функции. Однако остается также важным вопрос о том, является ли психофизическая функция в действительности показательной, логарифмической или какой-либо еще.

Даже решение такой кажущейся на первый взгляд простой задачи определения концентрации вещества, которая является стимулом в экспериментах со вкусовыми раздражителями, может иметь важные последствия для формулирования общих уравнений. И здесь можно сослаться на известную работу Стивенса, посвященную определению субъективной интенсивности вкуса некоторых растворенных в воде веществ. Авторы исследования ввели новую единицу вкусового ощущения – «густ» – для измерения субъективной интенсивности вкуса и получили результаты, свидетельствующие о том, что интенсивность вкуса является степенной функцией для величины стимула, которая описывается как «отношение растворимого к растворителю» (Stevens, 1957), причем растворы состояли из 100 куб. см воды, в которую было добавлено определенное число граммов растворимого вещества (поваренной соли, сахара, сульфата хинина и т. д.), а величина интенсивности стимула определялась в граммах растворимого вещества (при 100 куб. см воды). В других аналогичных работах по изучению интенсивности вкусовых раздражителей используется та же единица измерения. Кроме того, в ряде психофизических исследований также сообщается о нахождении показательной функции при шкалировании таких сенсорных стимулов, как концентрация некоего вещества, в системе единиц величины



веса (т.е. вес растворимого/общий вес раствора). Однако такая мера концентрации не может быть описана с помощью степенной функции, и поэтому достаточно сомнительным является факт существования одинаковой показательной функции для той и другой величины меры. То же самое можно сказать и о шкалировании с помощью системы единиц молярной концентрации: молярную концентрацию и вес растворимого вещества относительно веса всего раствора можно считать пропорциональными величинами, однако определять их как показательную функцию двух ранее описанных величин стимула нельзя.

Используя разные единицы измерения, можно получить различные кривые молярной концентрации вещества по причине несходства молекулярных структур растворяемых веществ и их взаимодействия с молекулами воды при получении общего объема раствора. На всем диапазоне концентраций даже при использовании различных видов шкалирования получаются в основном линейные функции, т.е. прямая пропорциональная зависимость между измеряемыми физическими величинами, поскольку так или иначе диапазон стимулов будет ограниченным. Перспективной могла бы стать работа по анализу результатов, получаемых на материале исследования концентраций сахара и сахараина с применением всех трех видов шкалирования стимулов в широком диапазоне от максимального разбавления до 50% от общего веса. Вероятно, что именно в результате таких экспериментов можно выяснить, при каком из методов шкалирования может быть получена показательная функция, определяющая соотношения между измеряемыми величинами, а также выделены наиболее универсальные единицы измерения и построены адекватные математические модели изучаемых психофизических объектов.

В данном контексте нельзя не упомянуть исследования по психофизическому шкалированию интенсивности запахов. Обычно в исследованиях по загрязнению воздуха характеристики загрязнителя воздуха измеряют в частицах-на-миллион (ppm). Иногда использование этого класса единиц можно найти и в ряде работ по шкалированию интенсивности запахов, в то время как в других исследованиях стимулы измеряются в единицах массы пахучего вещества на единицу объема смеси с воздухом (мг на литр) или в единицах давления пара внутри емкости с содержанием пахучего вещества в жидкости, через которую осуществляется вдыхание.

Концентрация «одной частицы-на-миллион» является в своей основе относительным индексом концентрации (т.е. молекулы пахучего вещества/молекулы воздуха), а другие индексы концентрации могут выражаться через пропорцию пахучего вещества в данном объеме газовой смеси (т.е. молекулы пахучего вещества/всего молекул в смеси), что эквивалентно различию между мерой «вес растворителя +100 кубических сантиметров воды» и процентом веса (об этом было сказано выше при рассмотрении видов шкалирования концентрации жидкостей в исследованиях вкусовых ощущений). Переход к этим двум методам оценки концентрации приводит к применению такого вида шкалирования, в результате которого получаются криволинейные интегралы, задающие значения измеряемых физических величин. Остается добавить, что величина концентрации газа в работах по шкалированию запахов бывает столь малой, что различия в шкалированных стимулах не имеют последствий для проведения психофизических измерений.

Существуют также экспериментальные исследования по шкалированию интенсивности как запахов, так и вкуса, в которых мера концентрации не определяется с точностью, достаточной для получения ясного представления об используемой шкале стимулов. Напри-



мер, термин «процентная концентрация» сам по себе является недостаточно детализированным для определения различий между несколькими обсужденными выше мерами. Однако в других исследованиях не только представлены единицы концентрации, но также показана важность проблем шкалирования стимула; в этих исследованиях акцент делается на необходимости введения некоторой унифицированной системы измерений с целью «минимизации любой криволинейности, связанной с произвольным выбором физических единиц измерения».

Можно показать, что использование таких методов «прямого» шкалирования, как оценка величины физического стимула при различных способах его шкалирования, приводит к формулированию различных видов психофизических соотношений. Но это замечание также справедливо и в отношении построения психофизических шкал с использованием логики Фехнера. Предположим: эмпирическим путем было получено, что величины ЭЗР при некоторой интенсивности димензии соответствуют увеличению амплитуды физических изменений стимула в равных соотношениях (т.е. что закон Вебера справедлив), тогда, если принять, что ЭЗР является единицей субъективной интенсивности, будет получена логарифмическая функция для рассматриваемой психофизической димензии.

Когда осуществляется перевод физических величин из одной мерной шкалы в другую (причем зависимости между изучаемыми величинами могут быть описаны показательными функциями в случае использования обеих шкал), логарифмическая психофизическая функция обычно остается таковой, но константа k в формуле $\psi = k \log \phi$ изменяется, т.е.:

$$\text{если } \psi = a \log \phi^* \text{ и } \psi = b \log(\phi^*)^m,$$

$$\text{то тогда } a_n \log \phi = b_m \log \phi^* \text{ и } a \log \phi = b (m/n) \log \phi^*.$$

Например, если яркость рассматривать как логарифмическую функцию светлоты в соответствии с законом Фехнера, то тогда, если стимулы прошкалировать в единицах интенсивности электромагнитного поля, а не светлоты, функция становится логарифмической с величиной $2k$. Такой вывод можно рассматривать как параллель описанному выше примеру показательной функции, когда перевод из одной шкалы в другую шкалу единиц интенсивности электромагнитного поля удваивает показатель степени. Для некоторых случаев нелинейного характера перевода величин из одной шкалы в другую функция перестает быть логарифмической. Например, если интенсивность вкуса является логарифмической функцией интенсивности стимула при его измерении в единицах концентрации стимула, то в случае, когда стимул измеряется в единицах молярной концентрации, функция уже таковой не будет.

Закон Вебера утверждает постоянство относительного дифференциального порога во всем сенсорном диапазоне варьируемого свойства стимула для данной сенсорной димензии. Хотя отношение Вебера и изменяется в широком диапазоне для различных сенсорных модальностей, обычно считается, что наименьшее значение отношения (т.е. наименьшее значение ЭЗР между сигналами) является индикатором наибольшей дифференциальной чувствительности, т.е. чувствительности к изменениям в данной модальности ощущений, и что разрешающая способность различных видов ощущений может быть сравнима путем сопоставления числовых величин их отношений Вебера. В литературе часто встречается ранжирование чувствительности различных сенсорных модальностей, основанное на отношении Вебера.

Иногда полагают, что отношение Вебера представляет собой разновидность взаимоотношения безразмерных величин, не зависящих от шкалируемого стимула: константа Ве-



бера не имеет единиц измерения и потому не зависит от физических единиц, используемых для измерения I и ΔI , следовательно, возможно сравнение отношения Вебера для различных димензий стимула безотносительно к единицам измерения стимульных величин. Данное утверждение является справедливым для простых мультипликативных преобразований, однако оно же является несправедливым для нелинейных трансформаций, а значит, и для линейных трансформаций, при которых значение функции изменяется путем добавления или вычитания значения константы для всех сравниваемых величин.

В этом контексте можно рассмотреть результаты классической работы по различению интенсивности звука для высоты тона в 1000 Гц, увеличенной на 80 дБ по сравнению с пороговой. 80 дБ является акустической мощностью в единицах 0,01 микроватт на квадратный сантиметр. Итак, было обнаружено, что отношение Вебера ($\Delta I/I$) = 0,05 или, в единицах акустической мощности, $(\Delta I/I) = (0,0005 \text{ мкВ/см}^2)/(0,01 \text{ мкВ/см}^2) = 0,05$. Тем не менее, если провести шкалирование того же стимула в единицах акустического давления как ньютон на кв. метр (N/m^2), то соответствующими величинами будут $(\Delta I/I) = (0,0051 \text{ N/m}^2)/(0,204 \text{ N/m}^2) = 0,025$. Преобразование единиц измерения из единиц акустической мощности акустического поля в единицы акустического давления уменьшает числовое значение константы Вебера в два раза. Или если логарифмическое преобразование акустической мощности было выполнено в дБ, то $(\Delta I/I) = 0,21 \text{ дБ}/80 \text{ дБ} = 0,0026$.

Если рассматривать отношение Вебера как выражение общего вида $(a-b)/a$, где a и b положительны и не равны друг другу, тогда можно видеть, что степенная трансформация должна изменять его значение: $(a-b)/a \neq (a^n - b^n)/a^n$ означает, что $(a) a^n - ab^n \neq (a) a^n - ba^n$ или $ab^n \neq ba^n$, что является истинным, пока $a \neq b$ и $n \neq 1$. Если и возможно привести примеры, в которых отношение Вебера является инвариантным при определенных криволинейных трансформациях, то не существует данных о том, что же происходит при многих возможных монотонных преобразованиях шкалы.

Значение отношения Вебера при шкалировании субъективного ощущения тяжести поднимаемого груза равняется примерно 0,02. Является ли дифференциальная чувствительность при различении тяжести лучше или хуже, чем при различении громкости звука? Вопрос лишен смысла до тех пор, пока необходимые преобразования не позволят уравнивать единицы шкалы тяжести с единицами шкалы громкости.

Более того, вид шкалирования стимула влияет на постоянство отношения Вебера. Если это отношение было константным при одном шкалировании стимула, то оно останется постоянным при таких трансформациях шкалы, как простое мультипликативное преобразование. Последнее связано с тем фактом, что логарифмическая психофизическая функция останется таковой при показательной трансформации, однако многие криволинейные монотонные трансформации шкалы могут вызывать изменения $\Delta I/I$ как функции I .

В некоторых исследованиях отмечается, что степенной закон может быть переформулирован в следующем виде: $n = \log R_\psi / \log R_\phi$, где R_ϕ является отношением стимульных величин, а R_ψ является отношением соответствующих субъективных величин. В эксперименте по шкалированию стимулов различных сенсорных модальностей было показано, что полученная для n величина является инвертированно связанной с отношением величин наибольшего и наименьшего стимула. Эти соображения составляют основу гипотезы, согласно которой в различных сенсорных модальностях сохраняется приблизительно равное соотношение максимальной и минимальной субъективной интенсивности, а также, что различ-



ные величины n связаны с различиями в динамическом диапазоне (т.е. в отношении максимума к минимуму физической интенсивности во всем диапазоне ощущения данной модальности).

Была предпринята попытка доказать существование сильной обратной связи между n и динамическим диапазоном (и, следовательно, обратной связи между n и величиной отношения Вебера). Но несмотря на то, что динамический диапазон, несомненно, является неотъемлемой характеристикой сенсорного преобразователя, его числовая величина зависит от метода измерения физического стимула. Возвращаясь к примеру по шкалированию слуховых стимулов, очевидно, что преобразование единиц акустической мощности в единицы акустического давления не только удваивает показатель степени n и делает в два раза меньшим значение отношения Вебера, но также делает числовую величину динамического диапазона равной квадратному корню из того числового значения, которое она имела при шкалировании стимула в единицах энергии. В целом шкальные преобразования, которые увеличивают показатель степени n , также уменьшают величину динамического диапазона (и отношение Вебера) и наоборот. Даже если не существует различий в диапазоне входных интенсивностей, с которыми могут работать два сенсорных преобразователя, различия стимулов, вызванные произвольностью их шкалирования, могут продуцировать различия в величинах их динамических диапазонов. Эти различия инвертированно связаны с появляющимися по указанной причине различиями в значениях показателей степени.

Проведенный анализ не отрицает предположения, согласно которому отношение Вебера подвергается серьезной проверке лишь в том случае, когда различия в значениях показателей степени имеют отношение не к динамическому диапазону, а к произвольному выбору единиц измерения стимула. Всякий раз, когда динамические диапазоны двух сравниваемых сенсорных модальностей считаются равными, возникает вопрос о том, насколько эквивалентны были единицы измерения стимула, использованные для шкалирования этих двух модальностей, однако, как уже было отмечено ранее, этот вопрос часто не имеет готового ответа.

Подводя итог всему вышеизложенному, можно сказать, что в психофизических экспериментах часто используются альтернативные единицы измерения величины физического стимула и соответствующие им альтернативные методы шкалирования могут обуславливать появление важных различий в уравнениях, описывающих психофизические феномены. Если данная субъективная интенсивность рассматривается в принципе как показательная функция стимула, то применение альтернативного шкалирования стимула может иметь своим результатом весьма отличающееся значение показателя степени. Или если психофизическая функция рассматривается как логарифмическая в соответствии с предположением Фехнера, то тогда альтернативные шкалы обуславливают появление новых значений константы k . Смысл сравнивать одну психофизическую функцию с другой имеется только в том случае, когда сравнимыми являются единицы измерения стимула, однако лишь малое число видов ощущений, не считая яркости и громкости, имеет сравнимые единицы измерения физической интенсивности.

Стивенс также придавал значение выбору единиц измерения физического стимула: «В выборе единиц измерения стимула есть много произвольного, что влияет на результаты: если путем введения единиц измерения звукового давления можно получить один показатель громкости, то введение единиц измерения мощности звука приводит к получению вдвое меньшего значения показателя степени. Точно так же, как, определяя видимый раз-



мер в единицах диаметра круга, мы получаем одно значение показателя степени, а измеряя ту же величину в единицах площади круга, получаем другое и т. д.» (Stevens, 1966).

Может показаться примечательным, что показательная функция была найдена для очень разных видов единиц измерения стимула, как об этом сообщается во многих публикациях, однако необходимо помнить о том, что определение той или иной функции, описывающей психофизические явления по показателям, измерение которых может быть зашумлено и подвержено ошибкам, часто осуществляется без необходимой тщательности. На практике уравнение показательной функции должно включать в себя не только константы n и k , но также и оценку величины стимула, соответствующей абсолютному порогу ϕ_0 , т. е. получение уравнения вида $\psi = k (\phi - \phi_0)^n$. Это уравнение предполагает три степени свободы для осуществления подбора кривой. Некоторыми исследователями высказываются критические замечания относительно неправомерности подгона величины ϕ_0 для получения лучшего соответствия показательной функции. В других работах обосновывается применение степенного уравнения для подбора большого числа монотонных функций. И если в большинстве ранних работ по психофизическому шкалированию, за некоторым исключением, и подбор кривых систематически не применялся, и количественные проверки на степень соответствия кривой не проводились, то в более поздних исследованиях этим вопросам стало уделяться значительно большее внимание.

Литература

- Fechner G. T.* Elemente der Psychophysik. Leipzig: Breitkopf & Hartel, 1860.
- Hawkes G. R.* Cutaneous communication: Absolute identification of electrical intensity // Journal of Psychology. 1960. № 49. P. 203–212.
- Kranz D. H., Luce R. D., Suppes P., Tversky A.* Foundations of measurement. New York: Academic Press. 1971.
- Myers A. K.* Psychological scaling and scales of physical stimulus measurement // Psychological bulletin. 1982. V. 92. № 1. P. 203–214.
- Stevens S. S.* Mathematics, measurement, and psychophysics // Handbook of experimental psychology / Ed. S. S. Stevens. New York: Wiley, 1951.
- Stevens S. S.* On the psychophysical law // Psychological Review. 1957. № 64. P. 153–181.
- Stevens S. S.* Decibels of light and sound // Physics Today. 1959a. V. 8. № 10. P. 12–17.
- Stevens S. S.* Cross-modality validation of subjective scales for loudness, vibration and electric shock // Journal of Experimental Psychology. 1959b. № 57. P. 201–245.
- Stevens S. S.* Tactile vibration: Dynamics of sensory intensity // Journal of Experimental Psychology. 1959c. № 57. P. 210–218.
- Stevens S. S.* The psychophysics of sensory function. Mass.: M.I.T. Press, 1961.
- Stevens S. S., Galanter E. H.* Ratio scales and category scales for dozen perceptual continua // Journal of Experimental Psychology. 1957. № 54. P. 377–411.



DEPENDENCE OF PSYCHOPHYSICAL EQUATIONS ON THE CHOSEN SYSTEM OF MEASURE UNITS

ПАХОМОВ А. П., Peoples' Friendship University of Russia, Moscow

This study is dedicated to the verification of the assumption that the functions obtained in the psychophysical experiment, depending on the system of units chosen to represent the magnitude of physical stimulus.

Keywords: psychophysical scaling, curves of Fechner and Stevens, the Weber's ratio, measurement of physical stimulus