АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XVII 1971 Вып. 4

УДК 534.79

К ВОПРОСУ О БИНАУРАЛЬНОЙ СУММАЦИИ РАЗЛИЧНО КОРРЕЛИРОВАННЫХ ШУМОВ

Н. А. Дубровский, Р. И. Черняк, В. М. Шапиро

Представлены результаты психофизических экспериментов, в которых исследовано отношение громкостей отдельных компонентов сложного шумового образа, соответствующего коэффициенту интерауральной корреляции шума (r) $1 > r > 0$, а также измерены психофизические функции при $r = 0$ и $r = 1$. Получены значения r, при которых наблюдается равенство громкости образа одного из независимых шумов и образа коррелированного шума. Обсуждаются гипотезы о бинауральной суммации громкости.

Известно, что звук, воспринимаемый двумя ушами, кажется более громким, чем тот же самый звук, воспринимаемый одним ухом. Это явление называется бинауральной суммацией громкости.

В 1933 г. Флетчер и Мансон впервые измерили, насколько уровень звукового давления тона, предъявляемого бинауурально, меньше уровня звукового давления равногромкого тона, предъявляемого монауурально [1]. Они нашли, что тон, слышимый бинауурально, кажется в два раза более громким, чем тон, слышимый монауурально, независимо от уровня последнего.

В 1960 г. Стивенс и Рейнольдс показали, что бинауральная громкость широкополосного шума растет как $p^{0,06}$, а монауральная громкость как $p^{0,54}$. Таким образом, отношение бинауральной громкости к монауральной растет как $p^{0,60}$, причем это отношение становится равным 2 : 1 только в одной точке при уровне звукового давления около 90 *дб*. При более низких уровнях оно меньше, при более высоких — больше [2]. В 1961 г. Хеллман и Звислоцкий повторили опыты Стивенса и Рейнольдса для тона частотой 1000 *гц*, используя метод числовой оценки громкости без заранее заданного стандарта для сравнения [3]. Они получили результаты, указывающие на отсутствие зависимости отношения бинауральной громкости к монауральной от уровня звукового давления тона 1000 *гц*. Бинауральную суммацию, при которой происходит простое сложение громкостей звуков, поданных на левое и правое уши, Хеллман и Звислоцкий назвали «совершенной».

В работе Дубровского и Черняк [4] исследовалась бинауральная суммация громкости белого шума при различной интерауральной корреляции. Было показано, что громкость шума при бинауральном слушании не зависит от коэффициента интерауральной корреляции r, т. е. от соотношения коррелированных и независимых частей шума на каждом ухе. Из этого факта следовало, что бинауральная суммация является одинаковой как для полностью независимых, так и для полностью коррелированных шумов. В связи с этим авторы предложили гипотезу о бинауральной суммации, которую они назвали статистической. В этой гипотезе предполагается, что поскольку статистически независимые шумы могут суммироваться только энергетически, то и шумы с единичной интерауральной корреляцией также должны суммироваться энергетически. Для проверки этой гипотезы было

проведено сравнение громкости составных частей сложного шумового образа [4]. Шумовой образ при интерауральной корреляции шума $1 > r > 0$ представляет собой сложный комплекс, состоящий из отдельных образов [5]. При $r = 1$ имеется только центральный образ, который представляет собой слитный звуковой образ, соответствующий двум когерентным стимулам в правом и левом ухе; при $r = 0$ имеются два боковых образа, каждый из которых соответствует одному из независимых стимулов, действующих на правое или левое ухо, но центральный образ отсутствует. При частично коррелированном шуме имеются все три образа и каждый из них изменяется при изменении соответственной доли шума. Слушатели могут фиксировать внимание на каждом из этих образов в отдельности и оценивать соответствующую ему величину ощущения или громкость.

Поддерживая постоянным суммарное эффективное напряжение шума, экспериментатор в работе [4] изменял в случайной последовательности величину r, изменяя долю интерурально коррелированных и независимых шумов на каждом телефоне. Слушатели сравнивали максимум ощущения центрального образа с максимумом ощущения одного из боковых и определяли, который из двух максимумов больше. Опытные данные позволили определить значения коэффициента интерауральной корреляции шума r', при которых максимумы ощущения центрального и одного из периферических образов казались равными друг другу. Эти коэффициенты r' оказались равными для 5 испытуемых соответственно 0,22; 0,25; 0,26; 0,27 и 0,31 [4], в то время как согласно гипотезе о статистической суммации коэффициент r' должен был равняться 0,33 независимо от уровня звукового давления.

Авторы предположили, что расхождения экспериментальных фактов с теорией могли быть обусловлены тем обстоятельством, что при использовавшейся методике сравнивались, по существу, громкости не полных образов, а лишь областей с максимальной величиной ощущения.

Если рассматривать громкость шумового образа как некоторый объем в субъективном звуковом пространстве [6], то максимум ощущения будет соответствовать при таком рассмотрении «высоте». При этом равенство «высот» двух образов будет означать равенство объемов, т. е. громкостей, только при полном подобии образов. Так как периферический образ более диффузен, то в результате могли быть получены несколько преуменьшенные оценки коэффициента корреляции r'.

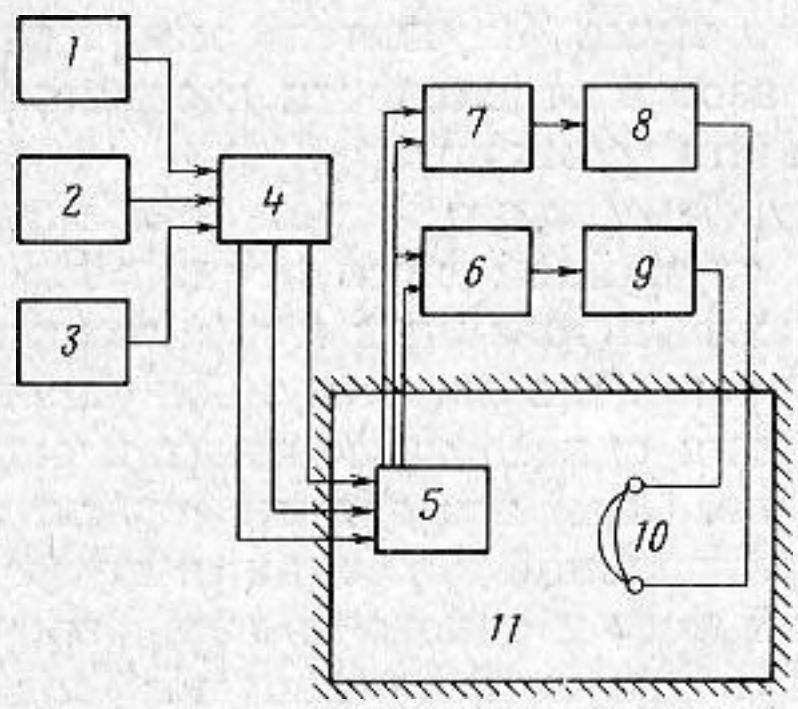
Однако уверенного подтверждения гипотезы о статистической суммации в работе [4] получено не было. Проверка этой гипотезы и явилась целью данной работы.

Мы провели ряд опытов по сравнению громкости центральной и одной из боковых частей сложного шумового образа с использованием другой методики. Испытуемый должен был находить такое соотношение между коррелированной и независимой частями шума, при котором громкость центрального субъективного шумового образа казалась равной громкости одного из боковых образов.

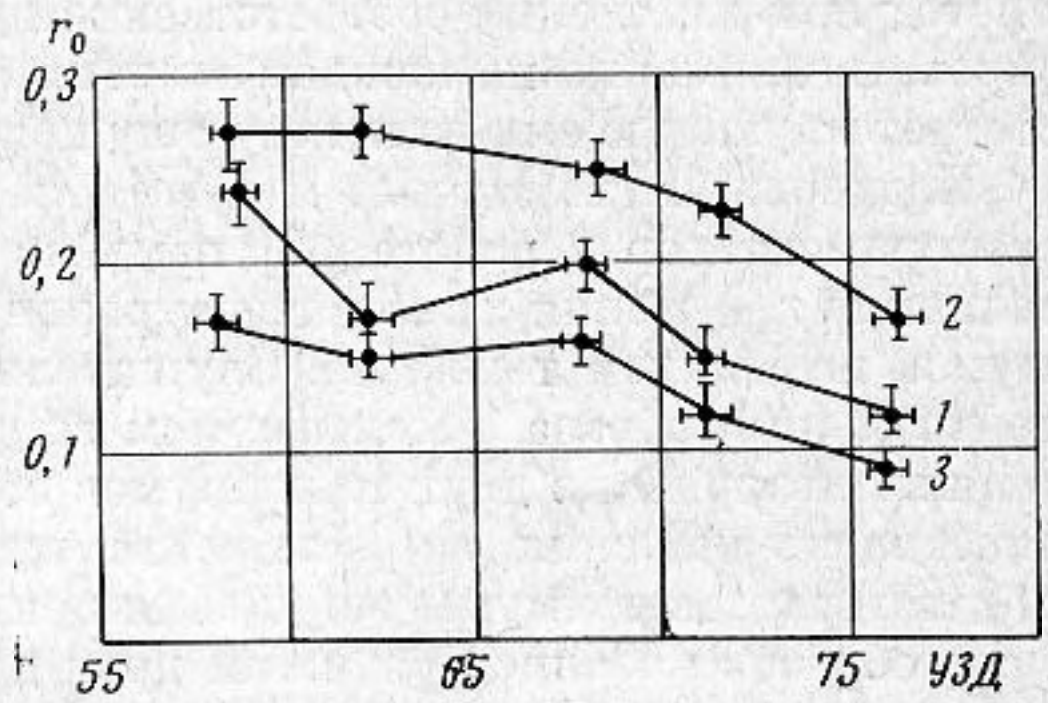
Для этой цели слушателю представлялась возможность самостоятельно регулировать громкость одного из сравниваемых образов, тогда как другой образ задавался экспериментатором; уровень его изменялся в случайном порядке от одного предъявления стимула к другому. При изменении громкости бокового образа суммарный уровень звукового давления шума на левом ухе поддерживался равным суммарному уровню на правом ухе.

Блок-схема установки, использованной в этих опытах, приведена на фиг. 1. В качестве источников шума применялись три генератора белого шума Г2-12 *1*, *2* и *3*. Выходы этих генераторов через две системы потенциометров *4* и *5* поступали на входы двух сумматоров *6* и *7*. Системы потенциометров позволяли экспериментатору и испытуемому регулировать уровень звукового давления коррелированной и некоррелированной частей стимула по отдельности. После сумматоров сигналы поступали на катодные

повторители *8* и *9*, служившие для согласования выходного сопротивления сумматоров с импеданцем телефонов *10*. Полоса частот шумового стимула составляла 500 — 8000 *гц* и определялась применявшимися телефонами. Каждый телефон был связан со своим индивидуальным источником шума, и кроме того, имелся общий генератор для обоих телефонов, что соответствовало способу получения шума с произвольным коэффициентом интерауральной корреляции, предложенному в 1948 г. Ликлайдером и Дзендоле [7]. Телефоны на левом и правом ушах были включены в одинаковой по-



Фиг. 1



Фиг. 2

лярности. Опыты проводились в звукоизолированной камере *11* в отдельности с каждым из трех испытуемых.

Задача последних состояла в отыскании положения потенциометра *5*, при котором боковой и центральный шумовые образы казались равногромкими. Уровни шума, соответствующие коррелированной и некоррелированной частям стимула, измерялись после ответа слушателя и по формуле $r_0 = p_1^2 / (p_1^2 + p_0^2)$, где p_1 — звуковое давление коррелированной части шума, а p_0 — звуковое давление независимой части, вычислялся коэффициент корреляции r_0. Символом r_0 в отличие от r' мы обозначаем коэффициент корреляции, при котором кажутся равногромкими центральный и один из боковых образов полностью, а не их максимумы, как в работе [4].

Результаты этих опытов показаны на фиг. 2. По оси абсцисс отложены суммарные уровни звукового давления шума. По оси ординат — средние значения коэффициента корреляции r_0. Вертикальными и горизонтальными отрезками указаны среднеквадратичные ошибки измерений соответственно r_0 и уровня звукового давления. Кривые *1*, *2*, *3* соответствуют результатам испытуемых Б., Р., Ф. Графики показывают, что r_0 различен для разных испытуемых и спадает с увеличением уровня звукового давления стимула. Во всех случаях $r_0 < 0{,}33$.

В этих экспериментах слушателям представлялась возможность изменять коррелированную часть стимула. Для того, чтобы выяснить, не внесло ли это в опытные данные систематической ошибки, с одним из испытуемых был проведен контрольный опыт, в котором он изменял некоррелированную часть стимула. Полученные данные практически совпали с аналогичными данными, полученными на этом же испытуемом, когда последний мог варьировать коррелированную часть шума. Это указывает на отсутствие систематической ошибки.

Таким образом, результаты наших экспериментов не подтверждают предсказания статистической гипотезы, согласно которой коэффициент корреляции r_0 должен равняться 0.33 для всех испытуемых независимо от уровня звукового давления.

Полученное противоречие между опытом и гипотезой статистической суммации вынуждает внести такое изменение в указанную гипотезу, которое позволило бы объединить два полученных экспериментальных факта: факт независимости суммарной громкости шума от коэффициента интера-

уральной корреляции и факт уменьшения величины r_0 с ростом уровня звукового давления. Первый факт можно описать следующим образом: $L_\Sigma = L(p_0^2 + p_1^2)$, где L_Σ — суммарная громкость сложного шумового образа.

Известно, что громкость полностью коррелированного шума подчиняется степенному закону Стивенса [8 — 10]. В силу независимости L_Σ от r, громкость при всех коэффициентах корреляции должна подчиняться этому закону: $L_\Sigma = k(p_0^2 + p_1^2)^{\frac{n}{2}}$. При этом k — некоторая константа, зависящая от свойств стимула, метода измерения L_Σ и индивидуальных особенностей слушателей, n — положительный показатель степени.

Вид функции L_Σ подсказывает нам, что на первых этапах преобразования стимула в слуховой системе, вероятно, происходит оценка энергии (интенсивности) звука. Это, в частности, подтверждается тем, что для значительного диапазона интенсивностей микрофонный потенциал улитки линейно связан с интенсивностью стимула [11, 12]. Кроме того, опыты показывают, что в пределах критической полосы энергия суммируется линейно [13, 14]. Можно предположить, что на периферии слухового пути преобразование интенсивности является линейным. На дальнейших этапах преобразования стимула начинают сказываться рефрактерность нервов и другие эффекты, приводящие к уменьшению нервного отклика и к дальнейшему преобразованию его в соответствии с законом Стивенса.

Характер бинауральной суммации должен существенно зависеть от того, на каком этапе происходит суммация сигналов, приходящих от левого и правого ушей *). В связи с этим можно выделить две возможности для описания механизма бинауральной суммации. Первая из этих возможностей соответствует гипотезе о статистической суммации. Она предполагает, что после энергетического преобразования стимула на монауральном уровне сразу происходит бинауральная суммация, а затем уже преобразование, соответствующее закону Стивенса. Вторая возможность преобразования сигнала, которую мы вслед за Хеллман и Звислоцким [3] назовем гипотезой о совершенной суммации, предполагает, что бинауральное сложение происходит на более высоком уровне, уже после преобразования сигнала по закону Стивенса.

Обе эти гипотезы дают нам возможность предсказать результат уравнивания громкостей бокового и центрального образов. Как уже отмечалось, гипотеза статистической суммации предсказывает, что $r_0 = 0{,}33$, независимо от уровня звукового давления [4]. Гипотеза совершенной суммации дает нам другое значение для этого коэффициента. В самом деле, условие равенства громкостей центрального (L_1) и одного из периферических (L_0) образов может быть записано в следующем виде: $L_1(p_1^2) = L_0(p_0^2)$. Так как $L_1 = L_{1п} + L_{1л}$, где $L_{1п}$ — вклад в L_1 от правого уха, а $L_{1л}$ — вклад в L_1 от левого уха, то $2kp_1^n = kp_0^n$. Используя последнее выражение, получаем

$$r_0 = \frac{p_1^2}{p_0^2 + p_1^2} = \frac{1}{1 - \sqrt[n]{4}}. \qquad (1)$$

Из этой формулы видно, что если r_0 уменьшается с ростом уровня звукового давления, то должно уменьшаться и значение n. На возможную причину уменьшения n с ростом уровня звукового давления указывают Трайсман и Ирвин [18]. Они считают, в частности, что при решении различных задач нервная система использует различные представления стимула, реализуемые на последовательных этапах его преобразования в слуховой системе. Авторы, в частности, вводят периферическую «дискриминационную» шкалу громкости E, подчиняющуюся закону Стивенса $L = kp^n$, где p — звуковое давление и где n уменьшается с ростом p. Они считают, что такого

* Нейрофизиологические исследования [15, 16, 17] показывают, что эта суммация, вероятно, происходит в дополнительном ядре верхнего оливарного комплекса и в других частях среднего и продолговатого мозга.

типа шкалу можно получить, например, в опытах по уравниванию монауральной и бинауральной громкостей. Представление об иерархической структуре слуховой системы и о возможности обращения человека к различным ее ступеням широко распространено и имеет экспериментальное обоснование [19].

В связи со сказанным выше значительный интерес представляло измерение показателя степени n психофизической функции в зависимости от уровня звукового давления. Эксперименты проводились на той же установке и с теми же испытуемыми, что и в предыдущей группе опытов. При снятии психофизических кривых использовался метод шкалирования, предложенный Хеллман и Звислоцким [3]. Как оказалось, этот метод дает минимальное систематическое смещение. Он похож на обычный метод оценки психологической величины ощущения, но отличается от него отсутствием заранее заданного стандарта и отказом от нормировки шкалы к определенному уровню. Испытуемые должны были оценивать величину своего ощущения числами, которые, как им казалось, лучше всего соответствуют громкости данного уровня шума.

Испытуемым предъявлялись в случайном порядке 12 уровней шума в диапазоне уровней звукового давления от 50 до 80 *дб*. Шум имел коэффициенты корреляции, равные 0 и 1. Результаты этих опытов приведены на фиг. 3 — 5. Координаты графиков на этих фигурах одинаковы. По оси абсцисс отложены уровни звукового давления. По оси ординат в логарифмической шкале отложены усредненные численные значения ответов испытуемых. Вертикальными отрезками указаны среднеквадратичные ошибки измерений громкости. Индексом 1 отмечены кривые, полученные для полностью коррелированного шума, а индексом 2 — для независимого шума. Каждая фигура иллюстрирует результаты одного из испытуемых. На фигурах хорошо заметно отклонение полученных характеристик от прямых линий. Как и ожидалось, значение n, определяющее наклон кривых, уменьшается с ростом уровня звукового давления. Видно также, что психофизические функции, соответствующие $r = 1$ и $r = 0$, отличаются друг от друга незначительно. Нижнюю часть кривой при небольших уровнях можно приблизить прямой. Наклон этой прямой дает нам значение n, характеризующее психофизическую функцию на низких уровнях звукового давления. Измеренные в опыте по уравниванию громкостей и вычисленные по психофизической функции значения r_0 приведены в табл. 1. В верхней строке буквами указаны инициалы испытуемых; во второй строке — показатели степени психофизических функций при низких уровнях звукового давления; в третьей строке — значения r_0, вычисленные по формуле (1), и в нижней строке — значения r_0, определенные в опытах по уравниванию громкости (фиг. 2) при уровне звукового давления 57 — 58 *дб*. В таблице указаны также среднеквадратичные ошибки измерений n и r_0.

Таблица 1

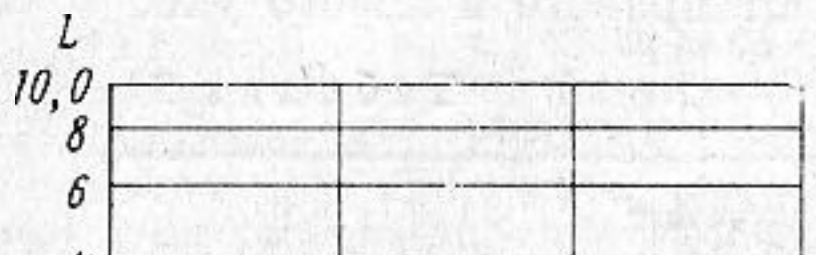
	Испытуемые		
	Б	Р	Ф
n	1,18±0,02	1,58±0,04	0,88±0,05
r_0 по ф-ле (1)	0,24±0,01	0,29±0,01	0,18±0,01
r_0 эксп.	0,24±0,03	0,27±0,03	0,17±0,02

Из таблицы видно, что наблюдается хорошее совпадение величин, полученных двумя различными способами.

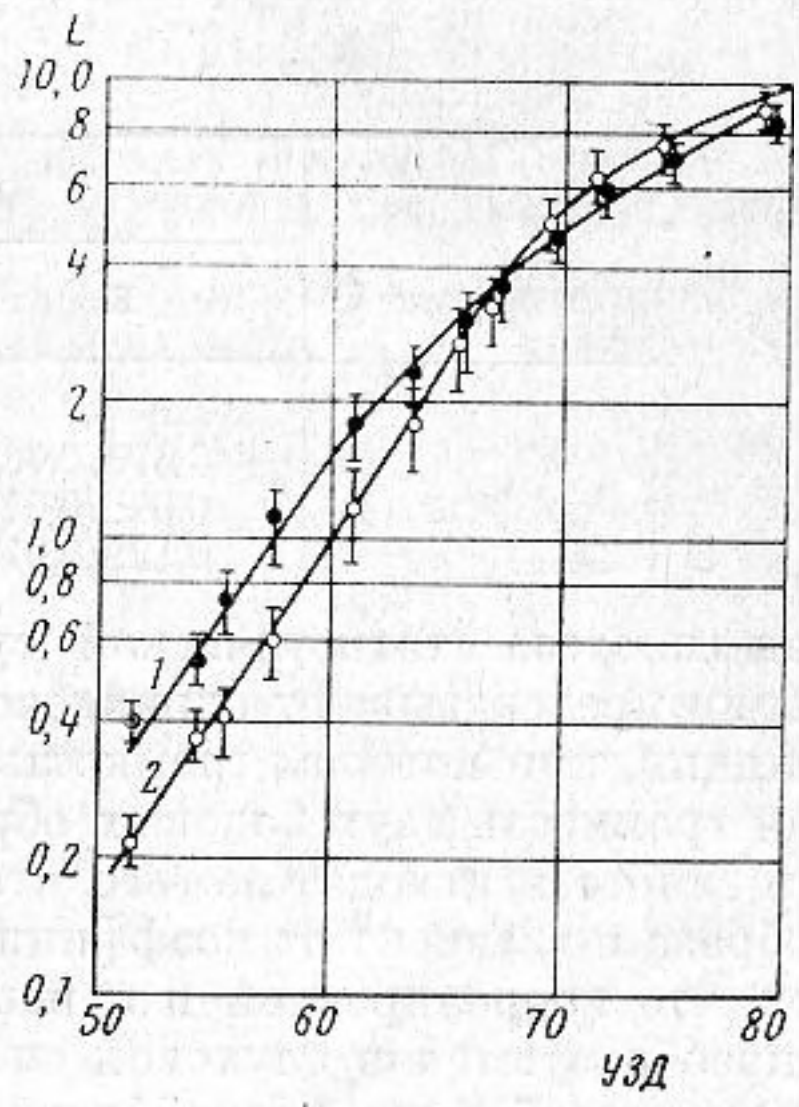
Верхнюю часть полученной психофизической кривой также можно аппроксимировать прямой линией. Ее наклон позволяет нам приближенно

вычислить значение n, характеризующее нашу функцию на более высоком уровне звукового давления. Результаты такой аппроксимации приведены в табл. 2.

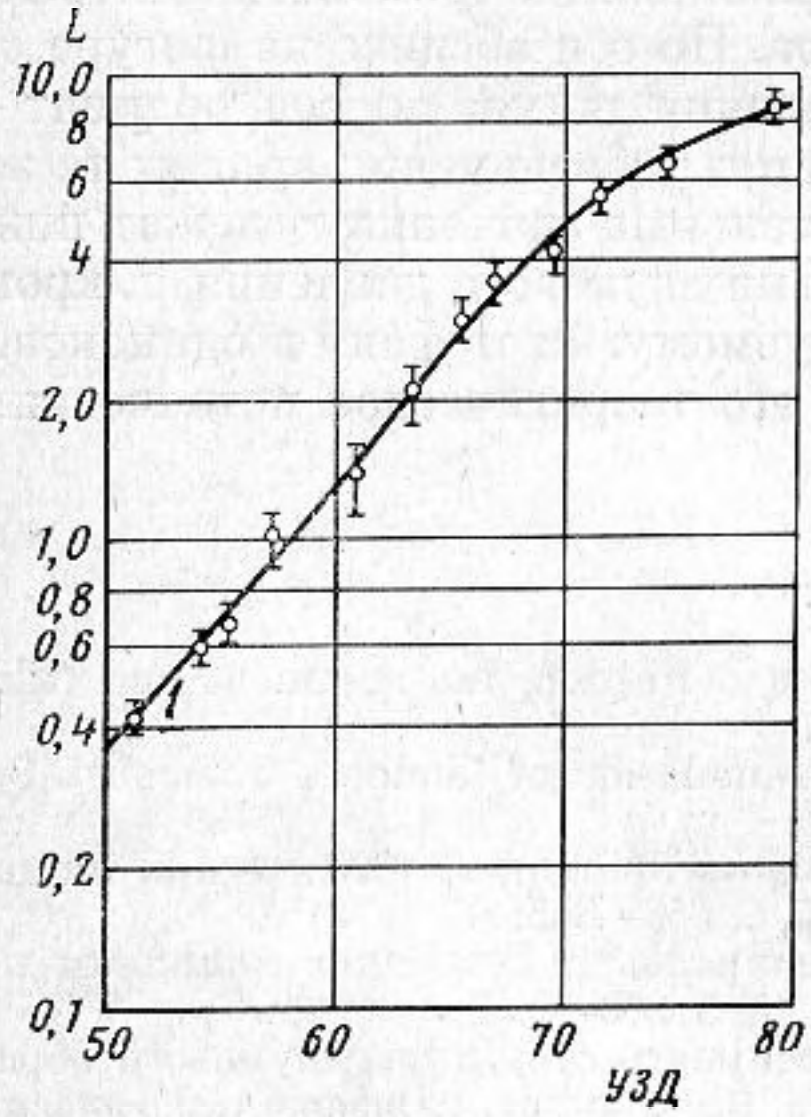
Мы опять получаем хорошее совпадение значений r_0, вычисленных по формуле (1) и полученных экспериментально. Значения r_0 в этих экспериментах также, как и в работе [4], меньше 0,33, т. е. значения, соответствующего требованиям гипотезы статистической суммации.



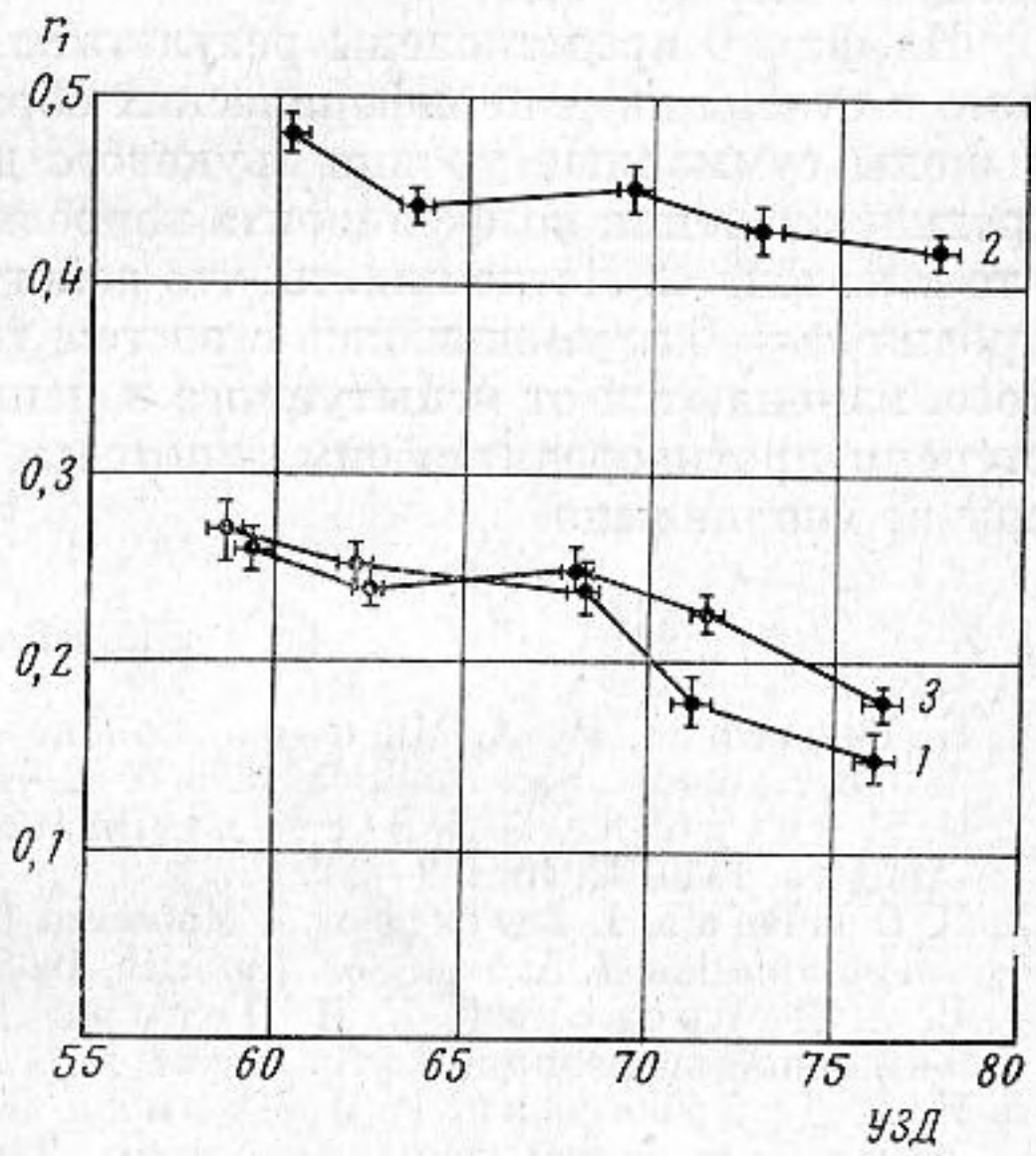
Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6

Совпадение значений для r_0, полученных из эксперимента, и вычисленных по формуле (1), позволяет отдать предпочтение гипотезе совершенной суммации. Как уже отмечалось выше, эта гипотеза в нашем толковании состоит в том, что коррелированная и независимая компоненты шума, подаваемые на каждый телефон, суммируются энергетически на периферии слуховой системы. На более высоких уровнях происходит нелинейное преобразование суммарной интенсивности стимула от каждого уха и образо-

вание громкости. Непосредственная же бинауральная суммация громкости осуществляется путем простого алгебраического сложения громкостей стимула от обоих ушей. Нужно отметить, что гипотеза совершенной суммации, сформулированная Хеллман и Звислоцким касалась чистых тонов, и вопрос о сложении различно коррелированных стимулов в их работе не рассмотрен. Говоря о гипотезе совершенной суммации, мы имеем в виду заключенную в ней идею о том, что при бинауральной суммации происходит простое алгебраическое сложение громкостей от правого и левого уха.

Таблица 2

	Испытуемые		
	Б	Р	Ф
n	0,61±0,03	0,65±0,04	0,58±0,05
r_0 по ф-ле (1)	0,09±0,01	0,11±0,01	0,09±0,02
$r_{0\ эксп.}$	0,12±0,01	0,17±0,02	0,09±0,01

Как гипотеза статистической суммации, так и гипотеза совершенной суммации предсказывают одинаковое значение $r_1 = 0{,}5$ для коэффициента корреляции, при котором громкость центрального шумового образа и суммарная громкость двух боковых образов кажутся равными. В самом деле, обе эти гипотезы исходят из того, что суммарная громкость сложного шумового образа не зависит от коэффициента корреляции. Поэтому они предполагают, что коррелированная и некоррелированная части стимула одинаково преобразуются в слуховой системе. Отсюда следует, что для равенства громкостей этих частей необходимо равенство их уровней, откуда следует, что $r_1 = 0{,}5$.

На фиг. 6 представлены результаты уравнивания громкости центрального и суммы двух периферических образов. По оси абсцисс на фигуре отложены суммарные уровни звукового давления шума, по оси ординат — средние значения коэффициента корреляции r_1. Обозначения кривых те же, что и на фиг. 2. Легко видеть, что действительные значения r_1 лежат ниже уровня $r_1 = 0{,}5$, уменьшаясь с ростом уровня звукового давления и, кроме того, изменяются от испытуемого к испытуемому. Этот факт в одинаковой степени противоречит обеим гипотезам и его теоретическое истолкование еще не вполне ясно.

ЛИТЕРАТУРА

1. H. Fletcher, W. A. Munson. Loudness, its definition, measurement and calculation. J. Acoust. Soc. America, 1933, 5, 82—108.
2. G. S. Reynolds, S. S. Stevens. Binaural summation of loudness. J. Acoust. Soc. America, 1960, **32**, 10, 192—205.
3. R. Hellman, J. Zwislocki. Monaural loudness function at 1000 cps and interaural summation. J. Acoust. Soc. America, 1963, **35**, 6, 856—865.
4. Н. А. Дубровский, Р. И. Черняк. Бинауральная суммация громкости при различной корреляции шума. Акуст. ж., 1968, **14**, 3, 390—398.
5. Н. А. Дубровский, Р. И. Черняк. Зависимость структуры шумового образа от интерауральной корреляции шума. Тр. VI Всес. акуст. конфер. Акустический институт АН СССР, М., 1968, ИШ2.
6. S. S. Stevens, M. Guirao, A. W. Slawson. Loudness is a product of density times volume. The sixty-seventh meeting of the Acoustical Society of America. 6—9 May 1964. Session M. M7. New York city.
7. I. C. R. Licklider, E. Dzendolet. Oscillografhic scatterplots illustrating various degrees of correlation. Sci., 1948, 107, 2770, 121—124.
8. S. S. Stevens. The measurement of loudness. J. Acoust. Soc. America, 1955, **27**, 5, 815—829.
9. S. S. Stevens. On the psychophysical law. Psychol. Rev., 1957, **64**, 153—181.
10. S. S. Stevens. On the new psychophysics. Scand. Rev. Psych., 1960, 1, 27—35.
11. M. Lawrence. Dinamic range of the cochlear transducer. Cold. Spring. Harbor Symp. Quant. Biol., 1965, **30**, 159—167.

12. E. G. Wever. Theory of hearing. John Wiley and sons. New York, 1949, 141—147.
13. E. Zwicker, G. Flottorp, S. S. Stevens. Critical band width in loudness summation. J. Acoust. Soc. America, 1957, **29**, 5, 548—557.
14. D. D. Greenwood. Auditory masking and the critical band. J. Acoust. Soc. America, 1961, **33**, 4, 484—502.
15. R. Galambos, I. Schwartzkopf, A. Rupert. Microelectrode study of superior olivary nuclei. Amer. J. Physiol., 1959, **197**, 527—536.
16. G. Moushegian, R. Rupert, M. A. Whitcomb. Medial superior — olivarunit response patterns to monaural and binaural clicks. J. Acoust. Soc. America, 1964, **36**, 1, 196—202.
17. J. E. Rose, N. B. Gross, C. D. Geisler, J. E. Hind. Some neural mechanisms in the inferior colliculus of the cat which may be relevant to localization of a sound source. J. Neurophysiol., 1966, **29**, 288—314.
18. M. Treisman, R. J. Irwin. Auditory intensity discriminal scale. I. Evidence derived from binaural intensity summation. J. Acoust. Soc. America, 1967, **42**, 3, 586—592.
19. В. И. Галунов, Л. А. Чистович. О связи моторной теории с общей проблемой распознавания речи. Акуст. ж., 1965, **11**, 4, 417—426.

Акустический институт АН СССР
Москва

Поступила в редакцию
22 января 1970 г.