

О ЗНАЧЕНИИ ВРЕМЕННЫХ ФАКТОРОВ ДЛЯ ВОСПРИЯТИЯ СЛОЖНЫХ ЗВУКОВ

Л. А. Чистович

Исследуется различение человеком сложного звукового сигнала при наличии сложной помехи. Демонстрируется ведущее значение временных факторов в процессе различения полезного сигнала от помехи.

В естественных условиях человеческой деятельности условными звуковыми сигналами являются, как правило, сложные звуки. Для того чтобы звуковой анализатор мог «измерить» сложный звуковой сигнал, определить его тембр, громкость, пространственную локализацию и т. д., этот сигнал должен быть, очевидно, прежде всего выделен как отдельный самостоятельный сигнал из массы обычно действующих одновременно с ним сложных звуковых раздражений. Возникает вопрос, за счет каких механизмов, по каким законам происходит выделение отдельных сложных сигналов из того сложного суммарного воздействия, которое существует в каждый момент времени у входа в слуховой проход, и составляется всей массой одновременно действующих на человека шумов и звуков (речь, музыка, производственные шумы и т. д.).

Очевидно, что это выделение сигналов принципиально не может быть обеспечено периферическим частотным анализом, за счет которого достигается, согласно современным представлениям о работе слуховой системы, трансформация спектра воздействия в пространственно распределенный узор возбуждения и торможения в нейронах слуховых путей [1]. Для того чтобы выделение могло произойти, необходимо существование каких-то дополнительных механизмов, благодаря которым возбуждение одних групп нейронов объединилось бы в одну систему (образно говоря, поступило бы на один канал), а возбуждение, одновременно существующее в других группах, объединилось бы в другую систему (поступило бы на другой канал).

Первым этапом изучения этих предполагаемых механизмов должно явиться выяснение тех условий, при которых сложные звуки воспринимаются как один сигнал и при которых они разлагаются на отдельные сигналы. Некоторые факты, известные из практической жизни, позволяют предполагать, что существенным условием объединения звуков (или составляющих тонов) в один сигнал является одновременность изменения их интенсивностей.

Так, известно, что как единичный сигнал мы воспринимаем звуки из одного источника (звуки речи, произносимые человеком, крик животного и т. д.), когда по самим условиям возникновения звука интенсивности составляющих его изменяются синхронно. Напротив, как отдельные сигналы мы воспринимаем звуки из разных источников, которые в силу независимости источников изменяются во времени независимо друг от друга. Целью экспериментов, изложенных в настоящей работе, являлась проверка этого предположения, т. е. исследование разницы в восприятии сложных звуков в условиях их синхронного (одновременного) включения и в тех условиях, когда один звук присоединяется к другому через определенный интервал времени. Опыты производились со слож-

ными звуками, имеющими дискретный спектр (приближающимися к гласным звукам), и с шумовыми сигналами (две полосы шума).

В первой серии опытов перед испытуемым ставилась задача выделить заранее известный ему сложный сигнал из суммарного воздействия. Во второй серии опытов испытуемый должен был определить характер звучания (тембр) суммарного воздействия.

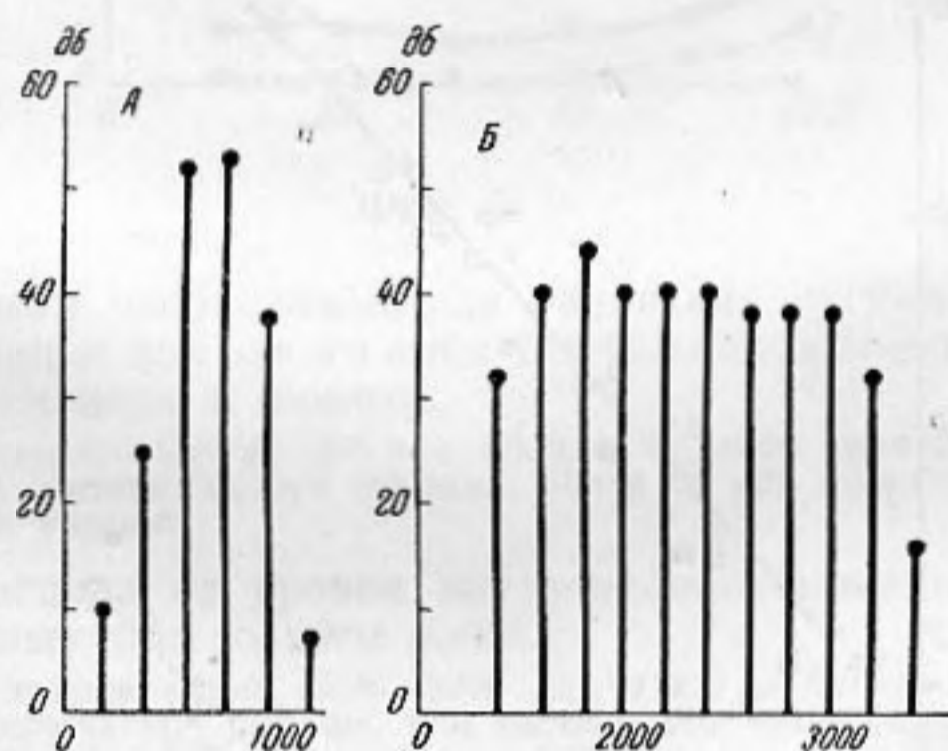
В первой серии опытов сложными звуковыми сигналами служили две группы гармоник основной частоты 200 гц или две полосы шума. Для получения групп гармоник использовался генератор остроконечных импульсов*, включенный на две линии, состоящие из полосных фильтров и аттенюаторов. Генератор импульсов состоял из нелинейного усилителя (по триггерной схеме) и дифференцирующей цепочки. Две выходные цепи генератора были разделены при помощи катодных повторителей. Частота следования импульсов задавалась звуковым генератором ГЗ-2. Спектр применявшихся нами групп гармоник представлен на фиг. 1.

Для получения двух шумовых сигналов использовался шумовой генератор ЛИГ-24. При помощи полосных фильтров из спектра шума вырезались две частотные полосы (500—1000 гц и 1500—3200 гц), уровень шума в которых регулировался при помощи аттенюаторов. Напряжение с обеих линий подавалось на один и тот же электродинамический телефон. Для обеспечения нормальной выходной нагрузки аттенюаторов в цепь телефона были включены дополнительные сопротивления.

Во второй серии опытов были использованы сложные звуки с дискретным спектром, весьма близкие по своему звучанию к гласным *и* и *а*. Первый из них, близкий к *и*, представлял собой группу убывающих по интенсивности гармоник основной частоты 200 гц, расположенную в полосе 3000—8000 гц. Вторым звук, близкий к *а*, представлял собой тон 1000 гц, амплитудно модулированный с частотой 200 гц. Для получения его использовался балансный кольцевой модулятор с возможностью пропускания на выход несущей частоты и регулировки ее амплитуды. Глубина модуляции контролировалась по осциллоскопу и устанавливалась около 100%. Оба сложных сигнала подавались, каждый через свой аттенюатор, на один общий телефон. Опыты были поставлены на 12 испытуемых с нормальным слухом.

Целью первой серии опытов являлось сравнение возможности выделения сложного сигнала в условиях его одновременного включения с другим сложным сигналом (назовем последний условно «помехой») и в условиях их разновременного включения («помеха» включается несколько раньше, затем к ней присоединяется «сигнал»).

Для того чтобы количественно характеризовать возможность выделения сигнала в указанных выше условиях, мы воспользовались определением кривых зависимости между уровнем интенсивности помехи и уровнем интенсивности сигнала, необходимым для его распознавания. И сигнал и помеха являлись сложными звуками, представляли собой или группы гармоник одной и той же основной частоты, или полосы шума. Сигнал был всегда ниже по частоте, чем помеха (см. фиг. 1).



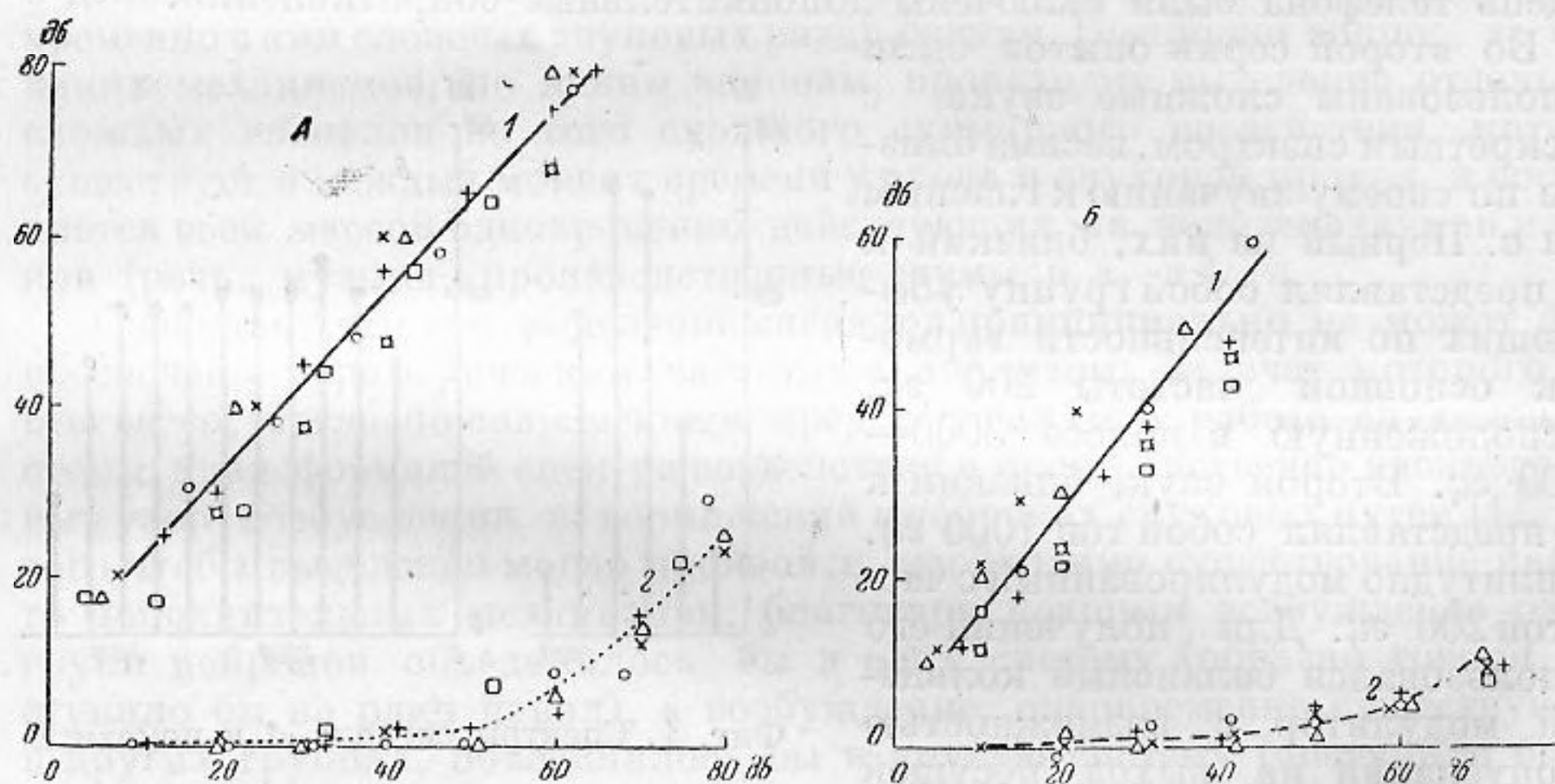
Фиг. 1. Спектры сигнала *A* и помехи *B*

* Разработанный инженером Сороко.

Применялась следующая постановка опыта: испытуемому объяснили, что он должен будет выделить определенный сигнал и в сложном звуке. Этот сигнал нужно запомнить; как только наблюдатель его обнаружит и узнает, он должен об этом сообщить. Инструкция пояснялась предъявлением звуков. Далее определялись пороги узнавания сигнала и помехи, и начинался опыт. Для облегчения задачи раздражения наносились парами: сначала на 0,7—1,0 сек предъявлялся сигнал, после перерыва длительностью 0,6—0,8 сек включались одновременно сигнал и помеха (на 0,7—1,0 сек).

В других опытах включение сигнала и помехи производилось не одновременно (помеха включалась на 0,6 сек раньше). Длительность сигнала равнялась 0,7—1,0 сек. Уровень помехи в опытах варьировался в пределах от 10 до 80 дб над порогом. При каждом заданном уровне помехи определялся тот минимальный уровень сигнала, при котором испытуемый в семи случаях из десяти отвечал, что он узнал сигнал. Данные были получены на семи испытуемых с нормальным слухом, четверо из которых были длительно тренированы в слуховых измерениях.

Результаты опытов представлены на фиг. 2, А и Б. Из них следует, что соотношения уровней сигнала и помехи, необходимые для узнавания сигнала, оказываются совершенно различными в том случае, когда сигнал и помеха включаются одновременно (сплошная кривая), и в том случае, когда между включением сигнала и включением помехи имеется



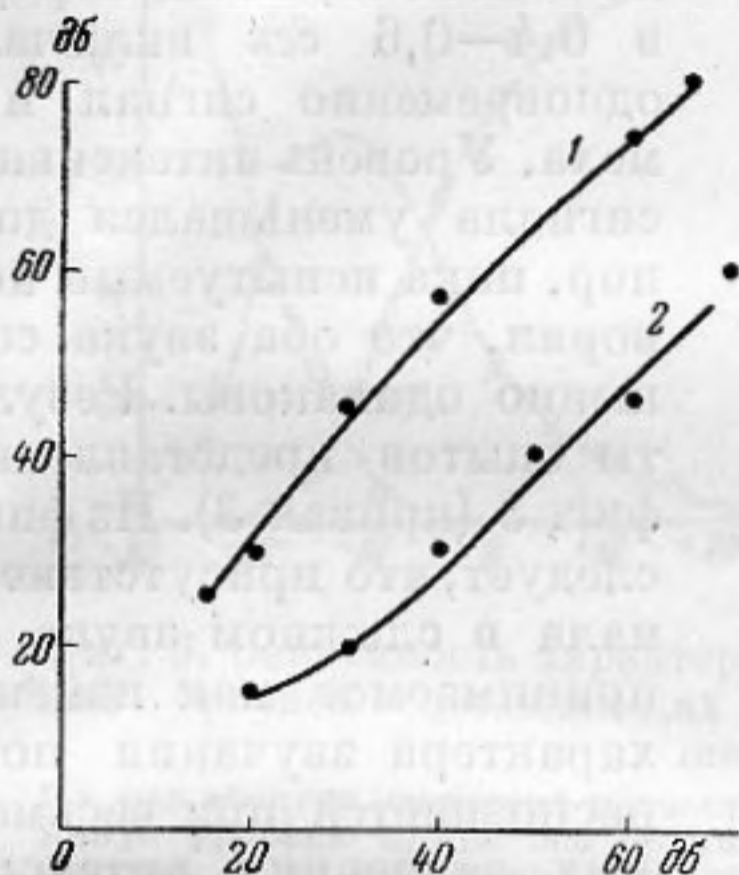
Фиг. 2. Зависимость порога узнавания сигнала от уровня интенсивности помехи. Данные для шести испытуемых.

1 — сигнал и помеха включаются одновременно, 2 — помеха включается раньше, чем сигнал. По оси абсцисс нанесен уровень интенсивности помехи, по оси ординат — уровень интенсивности сигнала, оба в дб от порога узнавания в тишине. А — сигнал и помеха — группы гармоник. Б — сигнал и помеха — полосы шума

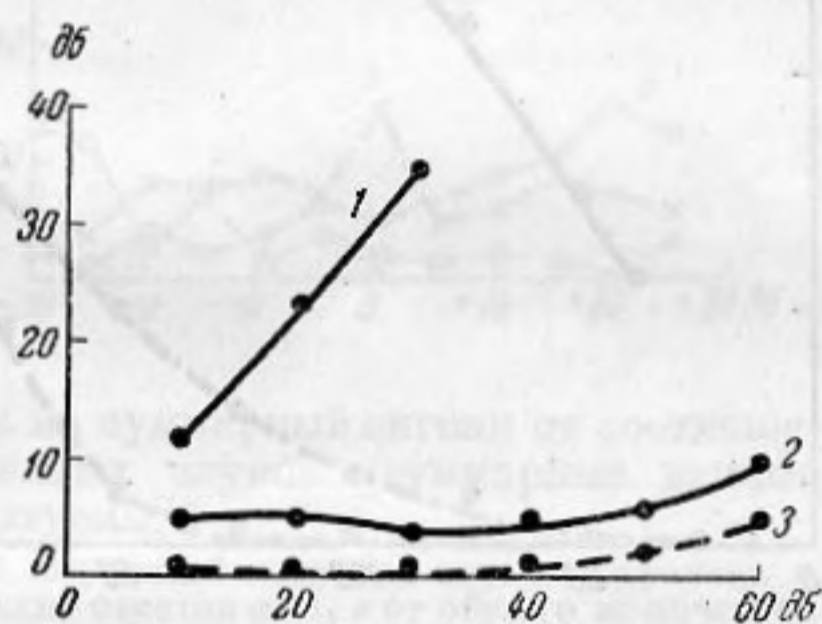
временное отставание (пунктирная кривая). В случае одновременного включения для узнавания сигнала необходимо, чтобы уровень его интенсивности превышал уровень помехи, в случае временного отставания сигнал узнается при уровне его интенсивности, значительно меньшем, чем уровень интенсивности помехи.

Совершенно различен и отчет испытуемого в этих двух случаях. Сообщая, что он узнал сигнал при одновременном включении сигнала и помехи, испытуемый поясняет, что был один звук, очень похожий по характеру звучания на сигнал. В случае временного отставания испытуемый говорит, что было два звука — один посторонний, на его фоне появился сигнал. Характер ответов испытуемых позволяет предполагать, что различный ход кривых маскировки в случаях одновременного и отстающего включений обусловлен тем, что при одновременном включении

двух раздражений не осуществляется расчленение их на сигнал и помеху, и звуковое раздражение воспринимается как один звук, приближающийся по своему звучанию то к сигналу, то к помехе. Очевидно, что если это предположение правильно, то появление возможности узнать сигнал (при одновременном его включении с помехой) должно сопровождаться потерей возможности узнать помеху. Для проверки этого предположения были поставлены опыты, в которых определялся порог узнавания помехи при одновременном ее включении с сигналом (фиг. 3, кривая 2). Из этой фигуры следует, что действительно при тех соотношениях уровней интенсивности сигнала и помехи, при которых испытуемый узнает сигнал (кривая 1), помеха не узнается. Для узнавания помехи необходимо, чтобы уровень ее интенсивности превышал уровень интенсивности сигнала (кривая 2).



Фиг. 3



Фиг. 4

Фиг. 3. Соотношения уровней сигнала и помехи, необходимые для узнавания сигнала и для узнавания помехи. Индивидуальные данные для одного лица. Случай одновременного включения сигнала и помехи.

Сигнал: 1—6 гармоники 200 гц, помеха: 7—17 гармоники 200 гц. По оси абсцисс нанесен уровень интенсивности помехи, по оси ординат — уровень интенсивности сигнала, оба в дБ над порогом узнавания в тишине

Фиг. 4. Зависимость порога узнавания сигнала от уровня интенсивности помехи. Индивидуальные данные для одного лица.

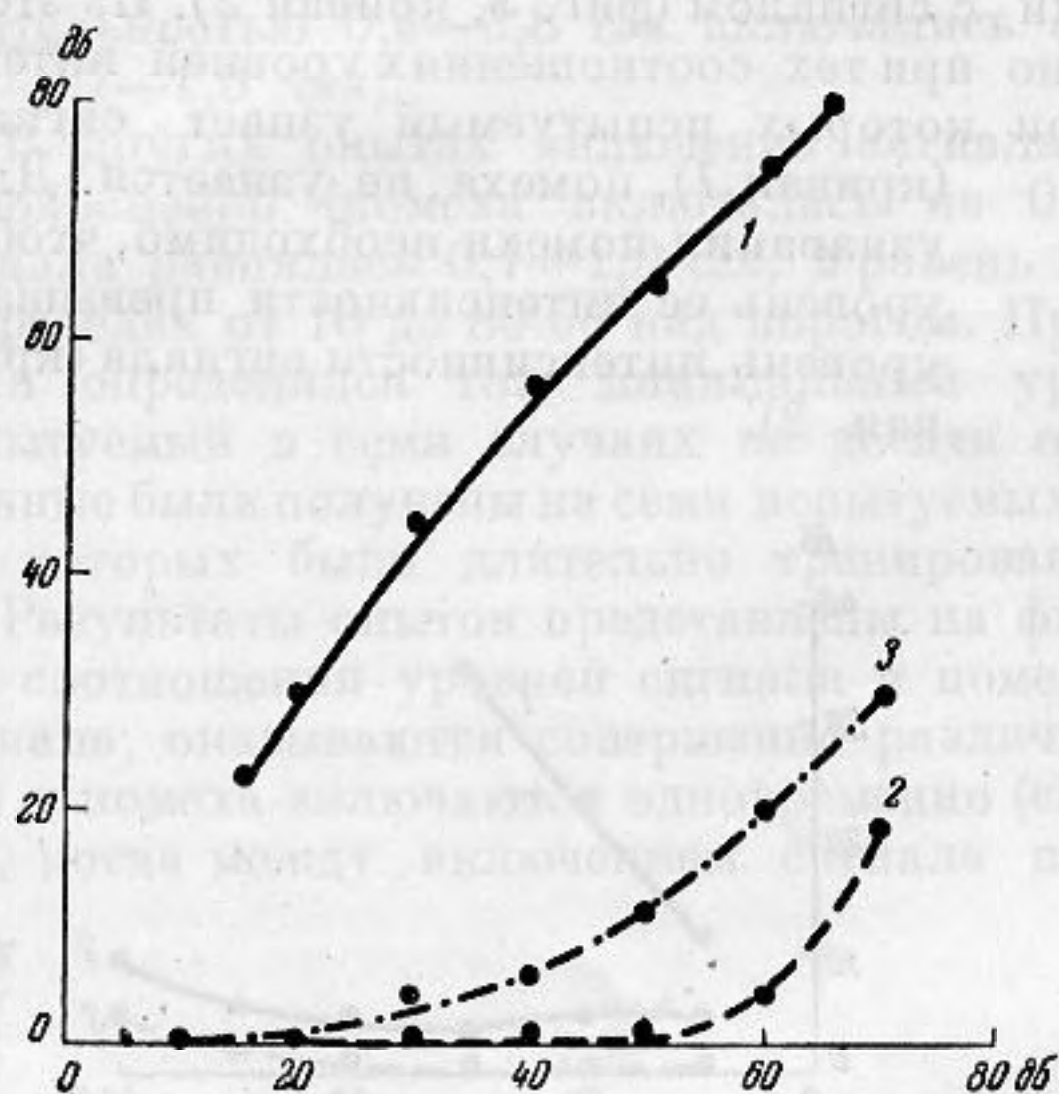
Сигнал — полоса шума 500—1000 гц, помеха — полоса шума 1500—3200 гц; 1 и 2 — сигнал и помеха включаются одновременно, 3 — помеха включается раньше, чем сигнал. По оси абсцисс нанесен уровень интенсивности помехи, по оси ординат — уровень интенсивности сигнала

Невозможность расчленить сложный звук на сигнал и помеху при их одновременном включении была характерна для шести из семи испытуемых, и только одной из испытуемых, после длительной тренировки удалось выполнить эту задачу. Данные опытов на этой испытуемой представлены на фиг. 4. Кривая 1 показывает, что первоначально эта испытуемая, так же как и остальные, узнавала сигнал (низкая полоса шума) только при уровне его интенсивности, большем, чем уровень интенсивности помехи. Однако затем она начала выделять его при одновременном включении (кривая 2) почти так же хорошо, как и при временном отставании (кривая 3).

Описывая прием, при помощи которого это ей удалось, испытуемая говорит, что она старалась продолжить в уме звучание сигнала после его выключения так, чтобы он как будто продолжался до того времени, когда он снова включался вместе с помехой. Это описание чрезвычайно близко совпадает с описанием приема выделения отдельных составляющих в сложных звуках, предложенного Гельмгольцем [2]. Следует отметить, что попытки применения этого приема другими испытуемыми не увенчались успехом.

Во всех приведенных выше экспериментах мы требовали от испытуемых, чтобы они отвечали о сигнале только тогда, когда обнаружат его

как таковой, т. е. услышат звук, по своим свойствам соответствующий сигналу. Было совершенно очевидно, что чрезвычайно большая маскировка в случае одновременного включения обусловлена невозможностью разделить сигнал от помехи, но отнюдь не невозможностью обнаружить его присутствие. Для того чтобы определить пороги обнаружения присутствия сигнала в условиях одновременного включения, мы использовали следующую постановку опыта: испытуемому давалась инструкция



Фиг. 5. Соотношения уровней сигнала и помехи, необходимые для узнавания сигнала 1, и для обнаружения его присутствия 3 в условиях одновременного включения. Индивидуальные данные для одного лица. Помеха 2 включается раньше, чем сигнал.

Сигнал 1—6 гармоники 200 гц; помеха 7—17 гармоники 200 гц. По оси абсцисс нанесен уровень интенсивности помехи, по оси ординат — уровень интенсивности сигнала

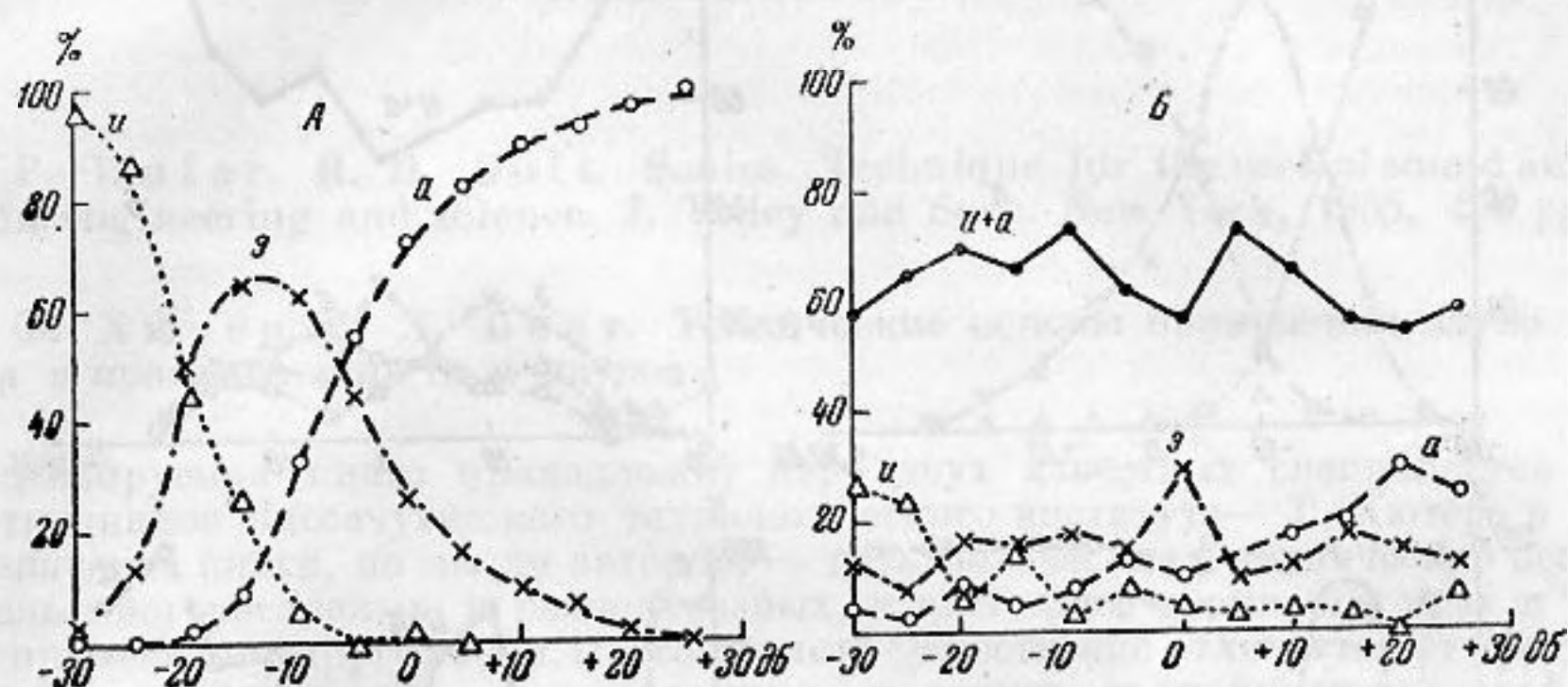
сравнивать помеху с комплексом из сигнала и помехи. Раздражения наносились парами — сначала предъявлялась помеха, после перерыва в 0,4—0,6 сек включались одновременно сигнал и помеха. Уровень интенсивности сигнала уменьшался до тех пор, пока испытуемый не говорил, что оба звука совершенно одинаковы. Результаты опытов представлены на фиг. 5 (кривая 3). Из фигуры следует, что присутствие сигнала в сложном звуке, воспринимаемое как изменение характера звучания помехи распознается при весьма малых значениях интенсивности сигнала, превышающих, однако, на 10—15 дБ значения интенсивности сигнала, при которых он узнается в случае его оставленного включения.

Результаты первой серии опытов свидетельствовали о том, что при одновременном включении двух сложных звуков они воспринимаются как какой-то третий результирующий сигнал, характер звучания которого определяется соотношением уровней их интенсивностей. Задачей второй серии опытов являлось сравнение возможности определить характер звучания (тембр) результирующего сигнала в условиях одновременного включения составляющих его звуков и в условиях их отстающего включения (один звук включался раньше, затем к нему присоединялся второй). Для того чтобы облегчить испытуемым возможность оценки, мы воспользовались сложными звуками, близкими к гласным *a* и *и*. Эти два звука дают при совместном звучании, при соответствующе подобранных уровнях третий сигнал, определяемый большинством испытуемых как звук, похожий на *э*. Опыты ставились следующим образом. Сначала, при одновременном включении обоих звуков, определялась зависимость характера ответов (*a*, *и* или *э*) от соотношений уровней составляющих сложных звуков. Затем переходили к условиям отстающего включения. Испытуемый предупреждался, что сначала появится один звук, затем к нему присоединится второй и дальше они будут звучать вместе. Испытуемый должен был сосредоточить внимание во время совместного звучания и определить, какой сигнал он слышит, т. е. на какую гласную он больше всего похож. Испытуемому предъявлялись звуки, в половине случаев начинавшиеся с *a*, а в половине случаев — с *и*. Второй звук присоединялся через 0,5—0,7 сек после включения первого, затем через 1,0—1,3 сек

сравнивать помеху с комплексом из сигнала и помехи. Раздражения наносились парами — сначала предъявлялась помеха, после перерыва в 0,4—0,6 сек включались одновременно сигнал и помеха. Уровень интенсивности сигнала уменьшался до тех пор, пока испытуемый не говорил, что оба звука совершенно одинаковы. Результаты опытов представлены на фиг. 5 (кривая 3). Из фигуры следует, что присутствие сигнала в сложном звуке, воспринимаемое как изменение характера звучания помехи распознается при весьма малых значениях интенсивности сигнала, превышающих, однако, на 10—15 дБ значения интенсивности сигнала, при которых он узнается в случае его оставленного включения.

Результаты первой серии опытов свидетельствовали о том, что при одновременном включении двух сложных звуков они воспринимаются как какой-то третий результирующий сигнал, характер звучания которого определяется соотношением уровней их интенсивностей. Задачей второй серии опытов являлось сравнение возможности определить характер звучания (тембр) результирующего сигнала в условиях одновременного включения составляющих его звуков и в условиях их отстающего включения (один звук включался раньше, затем к нему присоединялся второй). Для того чтобы облегчить испытуемым возможность оценки, мы воспользовались сложными звуками, близкими к гласным *a* и *и*. Эти два звука дают при совместном звучании, при соответствующе подобранных уровнях третий сигнал, определяемый большинством испытуемых как звук, похожий на *э*. Опыты ставились следующим образом. Сначала, при одновременном включении обоих звуков, определялась зависимость характера ответов (*a*, *и* или *э*) от соотношений уровней составляющих сложных звуков. Затем переходили к условиям отстающего включения. Испытуемый предупреждался, что сначала появится один звук, затем к нему присоединится второй и дальше они будут звучать вместе. Испытуемый должен был сосредоточить внимание во время совместного звучания и определить, какой сигнал он слышит, т. е. на какую гласную он больше всего похож. Испытуемому предъявлялись звуки, в половине случаев начинавшиеся с *a*, а в половине случаев — с *и*. Второй звук присоединялся через 0,5—0,7 сек после включения первого, затем через 1,0—1,3 сек

оба звука одновременно выключались. Соотношения уровней a и u , так же как и в опытах с одновременным включением, изменялись в случайном порядке, ступенями по 5 дб. Каждое соотношение уровней повторялось в опыте 10 раз. Опыты были поставлены на шести испытуемых, четверо из которых были длительно тренированы в различного рода слуховых измерениях. Суммарные результаты опытов на всех шести испытуемых представлены на фиг. 6 (А — одновременное включение, В — отстающее включение). Из фиг. 6, А видно, что при одновременном вклю-



Фиг. 6. Зависимость характера ответов на суммарный сигнал от соотношений уровней составляющих его сложных звуков (суммарные данные шести испытуемых)

По оси абсцисс нанесена разность уровней ощущений сложных звуков (уровень a минус уровень u), по оси ординат — процент ответов a , u , $э$ от общего количества ответов. А — оба сложных звука включаются одновременно, В — один сложный звук включается раньше другого

чении зависимость между характером ответов на звук и соотношением уровней его составляющих вполне отчетлива и закономерна. При преобладании составляющих, соответствующих u , весь звук опознается как u , при преобладании составляющих, соответствующих a , звук опознается как a . Если уровень ощущения составляющих u на 10—15 дб превышает уровень составляющих a , звук в большинстве случаев опознается как $э$.

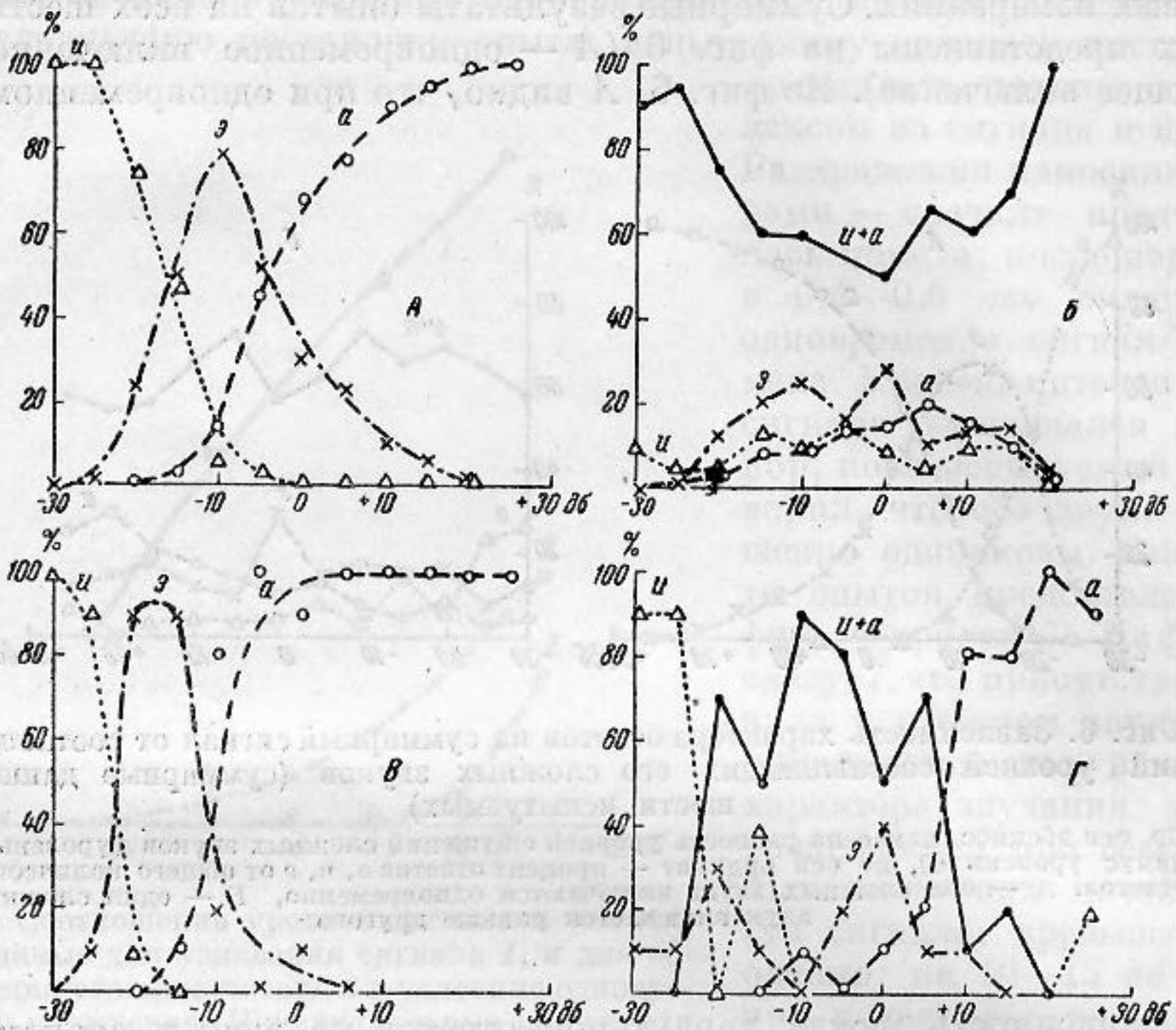
Иная картина наблюдается при отстающем включении. Испытуемые в большинстве случаев отвечают, что было два различных звука: a и u , один из которых звучал на фоне другого (фиг. 6, В, кривая $u+a$). В тех случаях, когда испытуемым удается, по их мнению, услышать один результирующий сигнал, они вместе с тем не могут однозначно определить характер его звучания. Один и тот же звук обозначается то как u , то как a , то как $э$.

Это отчетливо видно также на индивидуальных кривых отдельных испытуемых (фиг. 7). Одни из них утверждают, что при отстающем включении звуки легче всего воспринимаются как один сигнал тогда, когда они близки по интенсивности (фиг. 7, В), другие же говорят, что услышать один сигнал можно лишь при том условии, если один звук значительно громче другого (7, Г). В последнем случае может создаться впечатление, что испытуемые довольно хорошо оценивают характер результирующего звука, однако фактически оказывается, что они просто принимают за результирующий звук тот, который был более громким, и игнорируют более слабый сигнал.

Результаты опытов показали, что в зависимости от того, как включаются сложные звуки — одновременно или с некоторым временным отставанием — они или воспринимаются как один сигнал, или разделяются на два независимых сигнала. При одновременном включении человек слышит один сигнал, тембр которого он может весьма точно определить. Выделение в суммарном воздействии одного из составляющих сложных

звук оказывается в случае одновременного включения чрезвычайно трудным. Оно удалось в наших опытах только одной из семи испытуемых.

В случае отстающего включения испытуемые слышат два независимых сигнала, причем второй по времени сигнал может быть узан при уровне



Фиг. 7. Зависимость характера ответов на суммарный сигнал от соотношений уровней составляющих его сложных звуков, индивидуальные данные для двух лиц.

Обозначения те же, что на фиг. 6

его интенсивности, значительно меньшем, чем уровень интенсивности первого звука. Несмотря на то, что после присоединения второго звука два раздражения звучали совместно в течение весьма длительного времени (1,0—1,3 сек), услышать их как один сигнал испытуемым не удалось — они не могли однозначно определить тембр результирующего звука. Эти факты позволяют считать, что в процессе разделения сложного звукового воздействия на отдельные сложные сигналы решающая роль принадлежит временным факторам. Детальное исследование временных характеристик процесса, т. е. определение того минимального времени отставания, при котором происходит разделение на сигналы, выяснение значения скорости включения второго сигнала и т. д., должно, очевидно, способствовать выяснению тех механизмов, при помощи которых этот процесс осуществляется.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. Galambos. Neural mechanisms of audition. *Physiol. Rev.*, 1954, 34, 3, 497—529.
2. Г. Гельмгольц. Учение о слуховых ощущениях. 1875.

Институт физиологии
им. И. П. Павлова АН СССР
Ленинград

Поступила в редакцию
18 мая 1955 г.