

УДК 534.7

**СЛУХОВАЯ АДАПТАЦИЯ И ПОРОГИ ОБНАРУЖЕНИЯ  
АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИИ ©***Бибиков Н. Г., Макеева И. П.*

Методом двухальтернативного вынужденного выбора с адаптивной процедурой определены пороги обнаружения синусоидальной амплитудной модуляции тонального сигнала частотой 1 кГц. Длительность модуляции составляла 0,3 с, тон был либо непрерывным, либо предъявлялся в интервалы наблюдения длительностью по 0,3 с. При уровне несущей 50 дБ УЗД на частотах модуляции 5 и 10 Гц у всех пяти испытуемых пороги обнаружения были достоверно ниже для непрерывного сигнала по сравнению с прерывистым. При уровне несущей 80 дБ УЗД для четырех испытуемых из пяти пороги в адаптированном режиме были ниже на всех исследованных частотах модуляции. Все испытуемые отмечали большую легкость обнаружения модуляции в непрерывном тоне.

Исследование способности человека выявлять изменения уровня звука является одной из наиболее подробно разработанных проблем психофизики и физиологии слуха. Однако до сих пор нет удовлетворительного объяснения способности слуховой системы сохранять высокую дифференциальную чувствительность в динамическом диапазоне, превышающем 100 дБ. Особенно острой эта проблема становится с учетом того, что динамический диапазон реакции волокон слухового нерва редко превышает 30–40 дБ [1–3].

В зрительной системе большой динамический диапазон при высокой дифференциальной чувствительности достигается главным образом за счет многообразных механизмов адаптации, обеспечивающих настройку анализатора на выявление изменений именно того уровня сигнала, который действовал до этого в течение некоторого интервала времени [4]. Аналогичная роль слуховой адаптации до сих пор не продемонстрирована достаточно убедительно. Правда, еще в тридцатые годы Бекеши описал почти десятикратное постепенное снижение порогов обнаружения амплитудной модуляции в процессе действия модулированного тока длительностью одна минута [5]. Однако последующие результаты не были столь определены, и в большинстве случаев при исследовании дифференциальной чувствительности к уровню звука возможное влияние адаптации специально не рассматривалось [8–9].

Прямое сравнение порогов обнаружения синусоидальной амплитудной модуляции в адаптированном и неадаптированном режимах было выполнено только для шумовой несущей [10]. Согласно этим данным, при частотах модуляции выше 20 Гц адаптация не влияет на дифференциальную чувствительность, но при более медленных изменениях амплитуды порог в адаптированном режиме снижался на 3–5 дБ.

Имеются определенные электрофизиологические свидетельства того, что реакция на амплитудную модуляцию должна усиливаться в процессе адаптации. Так, нейроны слухового центра среднего мозга лягушки четко и синхронно реагируют на каждый период 5%-ной модуляции, если до этого в течение длительного времени звучал немодулированный адаптирующий тон. Реакцию этих же нейронов на модулированный и немодулированный тональные отрезки различить было невозможно [11]. Близкие данные были получены для слуховых волокон восьмого нерва золотой рыбки [12]. С другой стороны, по данным Моллера, степень эффективности выделения амплитудной модуляции не зависит от длительности адаптации [13]. Таким образом, и физиологические данные не дают достаточно оп-



ределенного ответа на вопрос о роли адаптации при обнаружении амплитудной модуляции.

В настоящей работе ставилась задача сравнения порогов обнаружения человеком синусоидальной амплитудной модуляции отрезков тона частотой 1 кГц, предъявляемых изолированно или «встроенных» в непрерывный тональный сигнал той же частоты и того же среднего уровня.

Работа была выполнена на пяти студентах в возрасте 19–22 лет и двух экспериментаторах. Трое из студентов приняли участие в измерениях, проведенных при двух уровнях сигнала: 50 и 80 дБ УЗД, остальные — только при низшем из этих уровней. В экспериментах с использованием высокого уровня дополнительно приняли участие двое сотрудников лаборатории. Все испытуемые отрицали наличие слуховых повреждений, и их абсолютные пороги на частоте 1,0 кГц не превышали 15 дБ УЗД.

Слушатели располагались в звукоизолированной камере, а сигналы поступали бинаурально и диотически от телефонов К-160. Несущей всегда являлся тон частотой 1,0 кГц. В адаптированном режиме этот тон длился непрерывно, в неадаптированном режиме с помощью генератора Г5-60 и электронного ключа формировались два отрезка длительностью по 0,3 с с временами нарастания и спада по 3 мс. Отрезки модулирующей синусоиды получали с помощью того же импульсного генератора Г5-60 и генератора сложных сигналов Г6-28. Длительность отрезка модулирующей синусоиды составляла также 0,3 с; модуляция всегда начиналась с нулевой фазы и содержала целое число полупериодов. Для осуществления амплитудной модуляции с варьируемыми параметрами использовали модулятор и децибелный attenuator. Экспериментатор и испытуемый были связаны специальным переговорным устройством и видеоиндикацией.

Определение порогов обнаружения модуляции проводили методом двухинтервального вынужденного выбора с адаптивной процедурой. В каждой попытке посредством зажигания лампочки испытуемому указывали два тестовых интервала длительностью по 0,3 с, разделенных интервалом ширины в 0,2 с. В одном из тестовых интервалов сигнал был модулирован, в другом — нет. В адаптированном режиме акустический сигнал без модуляции представлял собой чистый тон, в неадаптированном — тональный отрезок. Задача испытуемого состояла в определении тестового интервала, в котором присутствовала модуляция. Модуляция в каждом из интервалов появлялась с вероятностью 0,5, причем порядок ее появления задавался специальным устройством, обеспечивающим полную рандомизацию.

Серия обычно начиналась с попытки, в которой глубина модуляции составляла 50% (6 дБ). После двух последовательных правильных ответов испытуемого глубину модуляции снижали, после одного неправильного — повышали. Шаг изменения глубины модуляции до первых трех поворотов составлял 2 дБ, а после этого — 1 дБ. Поворотами называли попытки, после которых направление изменения глубины модуляции менялось от возрастания к уменьшению или наоборот. Каждая серия включала 70–100 попыток и 15–20 поворотов. Порог для серии определяли как среднее арифметическое уровней глубины модуляции всех поворотов, за исключением трех первых. Как известно, такой порог соответствует 70,7% правильного обнаружения [14]. Обратной связи с индикацией испытуемому правильного ответа не применяли.

Каждая попытка в зависимости от скорости ответа испытуемого занимала время 5–7 с, а вся серия около 15 мин. Обычно серии с определением порога в разных режимах адаптации, но при одинаковых остальных параметрах сигнала следовали непосредственно друг за другом. Для всех значений параметров получали не менее трех-четырёх таких пар серий. Дополнительные серии проводились в тех случаях, когда разброс порогов при идентичных условиях превышал 3 дБ.

Исследования выполнялись в диапазоне частот модуляции 5–40 Гц. Нижняя граница диапазона определялась длительностью отрезков (1,5 периода), верхняя — стремлением исключить спектральные признаки разли-



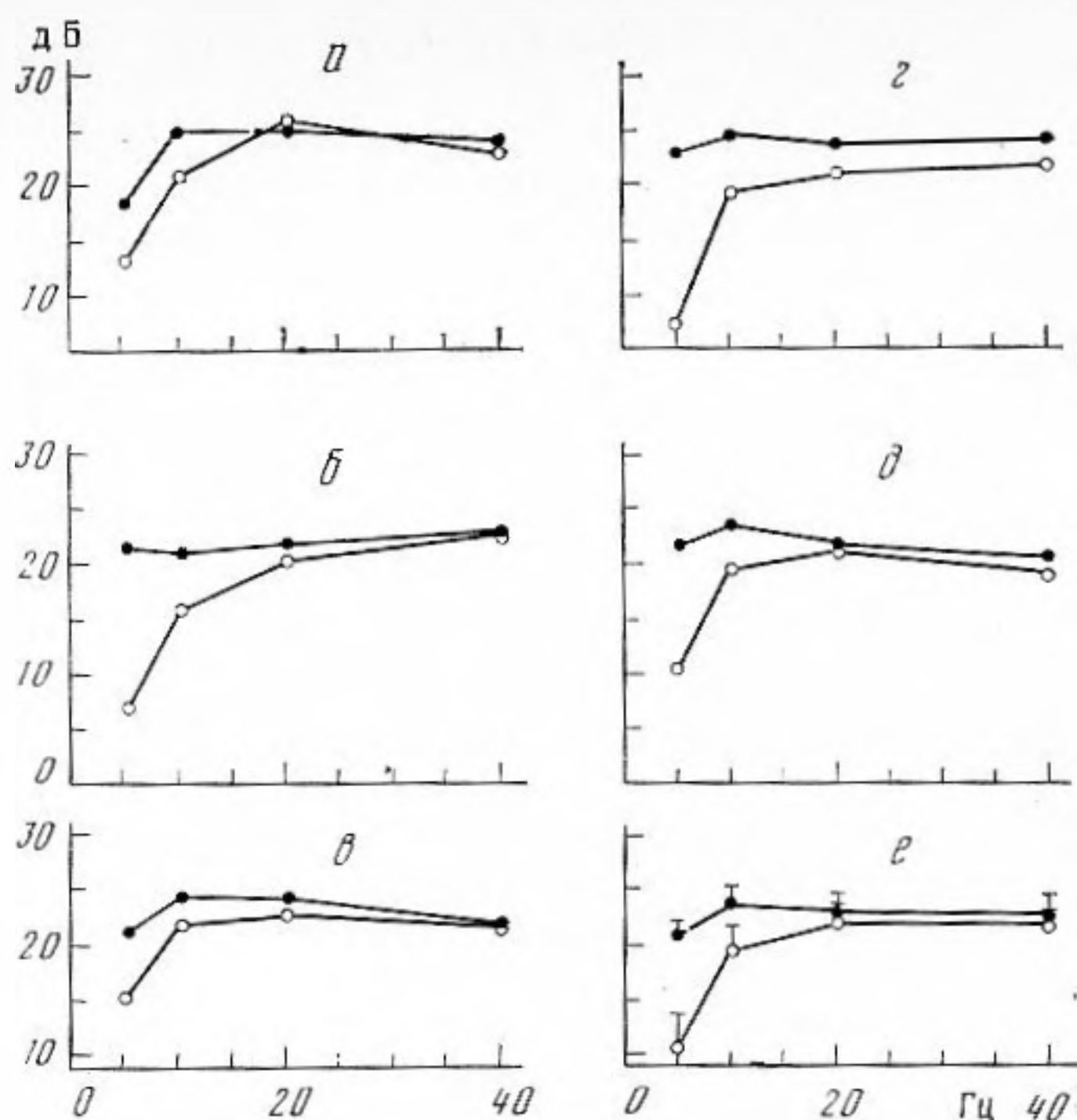


Рис. 1. Зависимость порогов обнаружения амплитудной модуляции в дБ затухания модулирующего сигнала от частоты модуляции в Гц для тонального сигнала частотой 1 кГц и уровнем 50 дБ УЗД; а-д — данные для отдельных испытуемых, е — усредненные результаты

чения, возникающие в тех случаях, когда спектр сигнала выходит за пределы критической полосы [15].

Абсолютные пороги слышимости определялись до начала основной серии тем же методом двухинтервального вынужденного выбора с той же адаптивной процедурой. Временные параметры отрезков соответствовали экспериментам по обнаружению модуляции, но сигналом служил отрезок чистого тона частотой 1,0 кГц, причем в другом тестовом интервале звук отсутствовал. Абсолютные пороги всех испытуемых не превышали 10 дБ УЗД. Результаты основной серии экспериментов приведены на рис. 1 и 2.

Прежде всего следует обратить внимание на субъективные оценки ощущений, которые давали испытуемые, прослушивающие предлагаемые им сигналы. Независимо от частоты модуляции и уровня сигнала все испытуемые отмечали, что обнаруживать модуляцию в адаптированном режиме гораздо проще, чем в режиме предъявления изолированных отрезков. Этот субъективный результат в значительном большинстве случаев совпал с объективной оценкой порогов обнаружения амплитудной модуляции.

На рис. 1, а-д приведены частотные зависимости порогов обнаружения амплитудной модуляции, измеренные при уровне звукового давления 50 дБ УЗД для пяти испытуемых. Сплошной линией, соединяющей заливные кружки, показаны данные, полученные в адаптированном режиме. Незаливными кружками указаны пороги для изолированных тональных отрезков. В большинстве случаев, по крайней мере в двух сериях из трех, снижение порогов при переходе от неадаптированного к адаптированному было достоверным с вероятностью выше 0,995. Такое различие имело место для всех испытуемых при частотах модуляции 5 и 10 Гц. На более высоких частотах значимые различия имели место примерно в половине случаев. Все они соответствовали снижению порогов в адаптированном режиме. Суммарные данные, иллюстрированные на рис. 1, е, демонстрируют, что на частоте модуляции 5 Гц различие порогов в адаптированном и неадаптированном режимах составило 10,1 дБ, на частоте 10 Гц — 4,1 дБ, а на частотах 20 и 40 Гц — всего около 1 дБ.

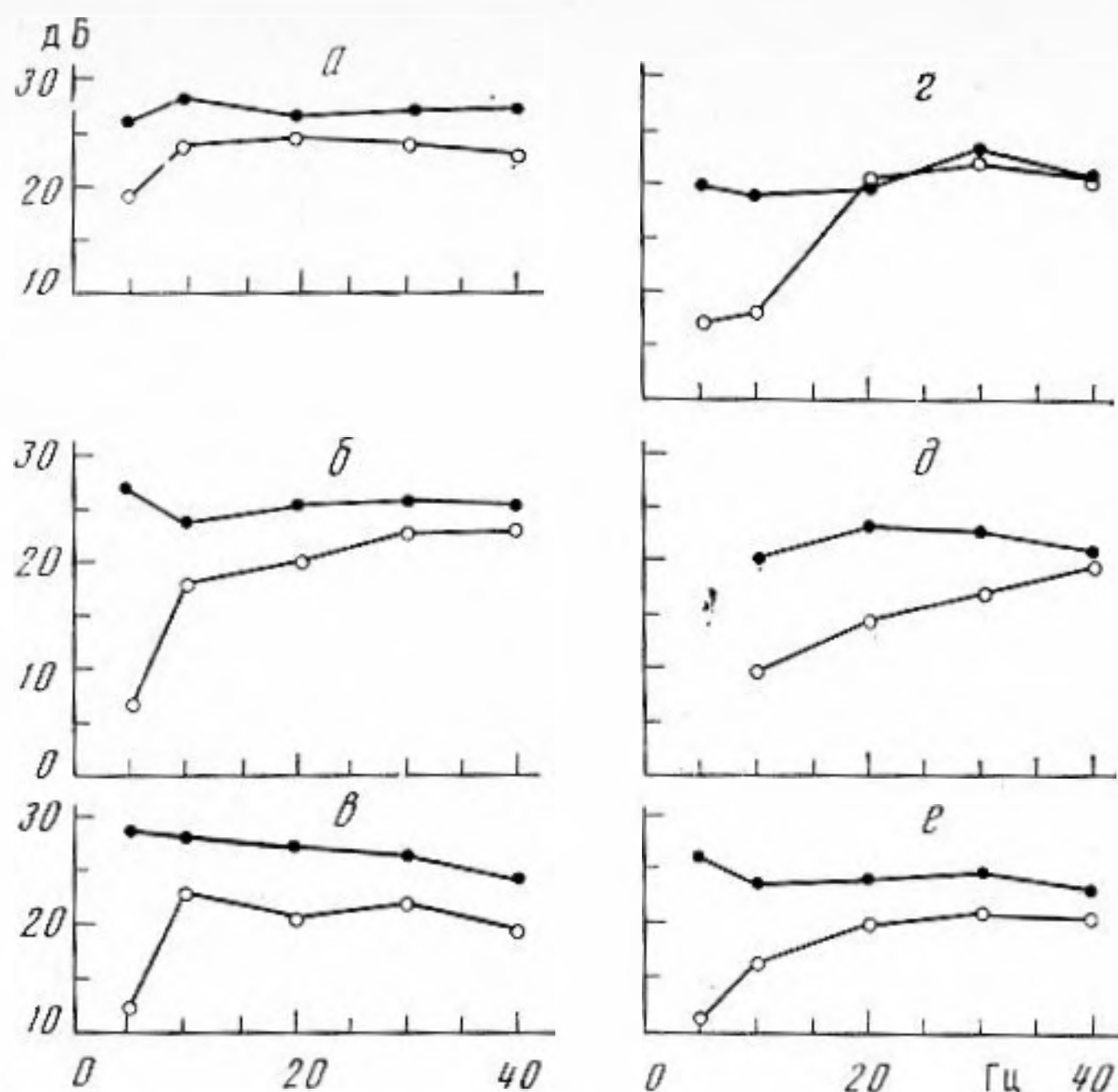


Рис. 2. Зависимость порогов обнаружения амплитудной модуляции от частоты модуляции для тонального сигнала частотой 1 кГц и уровнем 80 дБ УЗД. Обозначения как на рис. 1, а-д — данные для отдельных испытуемых, е — усредненные результаты

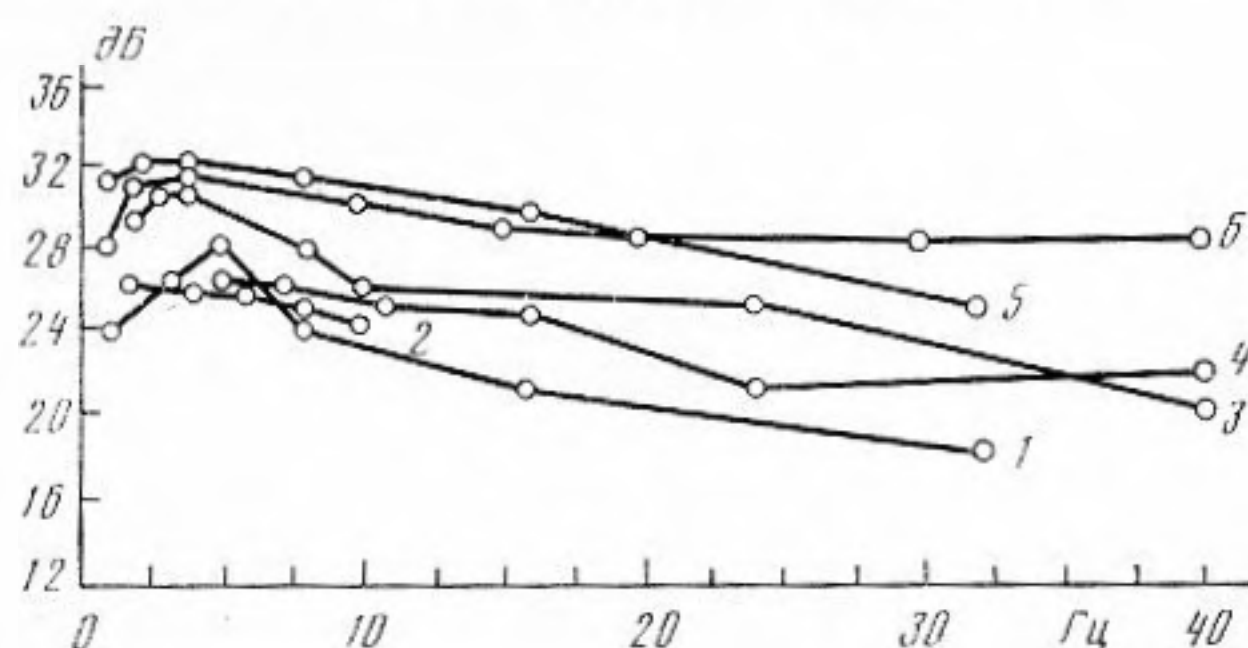


Рис. 3. Зависимость порогов обнаружения амплитудной модуляции тона от частоты модуляции по литературным данным. Кривая 1 построена по результатам работы [19], 2 — [21], 3 — [9], 4 — [8], 5 — [20], 6 — [6]

На рис. 2 подобные же данные приведены для уровня звукового давления 75 дБ УЗД. Измерения были проведены также для пяти испытуемых, из которых трое исследовались и при меньшем уровне звука. В этом случае различия порогов в адаптированном и неадаптированном режимах были выражены сильнее. У четырех испытуемых они были достоверны при всех частотах модуляции, у одного — только на частотах 5 и 10 Гц. Суммарные данные, приведенные на рис. 2, е, отражают большую роль адаптации на больших уровнях стимула. Среднее значение разницы порогов на частоте 5 Гц составило 14 дБ, на частоте 10 Гц — 7,1 дБ, на частоте 20 Гц — 4,2 дБ и на частоте 40 Гц — 2,5 дБ.

Результаты работы свидетельствуют о том, что чувствительность человека к изменениям амплитуды тона, по крайней мере для низких частот модуляции, повышается в процессе адаптации. Этот эффект можно трактовать и как проявление демаскирования, так как тон в промежутках между тестовыми отрезками является дополнительным прямым и обратным маскером по отношению к маскирующей составляющей самих тональных отрезков. (Трактовка дифференциальных порогов по интенсивности как порогов маскировки тона тоном использовалась в работах [16, 17].)



Сопоставим наши данные с результатами других исследователей. На рис. 3 приведены результаты шести работ [6, 8, 9, 19–21], где пороги обнаружения амплитудной модуляции тона были определены не менее чем в трех точках интересующего нас частотного диапазона. Частота несущей в работе [8] составляла 0,8 кГц, в работе [21] — 2 кГц, в остальных — 1 кГц. Уровень сигнала во всех случаях примерно соответствовал 70–80 дБ УЗД. В большинстве экспериментов применялся пороговый метод с модификацией, предложенной Бекеша: уровень сигнала меняли в зависимости от указания испытуемого, слышит он сигнал или нет. Интересно заметить, что авторы почти всех работ использовали режим полной адаптации, так что сигнал с модуляцией или без модуляции длился все время испытаний. Фай применил модификацию аудиометрии по Бекеша с чередованием отрезков по 0,5 с с такими же интервалами тишины [8]. Наиболее близкую к нашей методике использовали Лонг и Куулен, но их сигналы имели длительность 1 с с интервалом в паре 0,3 с [21].

В целом рассмотрение литературных данных демонстрирует стремление авторов исследовать обнаружение модуляции в адаптированном режиме, что косвенно свидетельствует о его преимуществе. Прямое сравнение данных также говорит о возможном снижении порогов в адаптированном режиме. Исключая раннюю работу [19], в которой для получения модуляции использовались бина, чувствительность, измеренная в адаптированном режиме [6, 20], была обычно выше, чем при измерениях в неадаптированном режиме [8, 21].

Свидетельство роста дифференциальной чувствительности в процессе адаптации недавно было получено при сравнении разностных порогов по интенсивности для отрезков 1 кГц тона длительностью 0,2 с и для приращений непрерывного тона той же длительности [18]. Как и в наших экспериментах, снижение порога вследствие адаптации составило 4–5 дБ.

Таким образом, современные литературные данные, как и результаты нашей работы, свидетельствуют о повышении способности человека к обнаружению изменений уровня в процессе адаптации. Однако величина эффекта оказывается меньше, чем можно было предположить из данных Бекеша [5]. В этой связи стоит напомнить мнение наших испытуемых о том, что обнаружить модуляцию в непрерывном сигнале много легче, чем в отдельных тональных отрезках. При использованной в работе [5] пороговой методике без регистрации ложных тревог порог во многом определяется степенью уверенности испытуемого, которая в свою очередь прямо связана с легкостью опознания сигнала. Именно эта особенность обнаружения в адаптированном режиме и могла обеспечить столь резкое снижение порога в работе Бекеша.

**Представляется, что некоторые корреляты рассмотренных выше эффектов можно обнаружить при анализе нейрофизиологических механизмов анализа интенсивности.** В слуховом нерве уровень тона кодируется, по-видимому, суммарной плотностью импульсации всех волокон, причем как для отрезков, так и для непрерывного звука механизмы этого кодирования не очень эффективны [18, 22–24]. Особенно это проявляется для сигналов большой интенсивности, когда большинство волокон находятся в режиме насыщения и повышение суммарной активности идет главным образом за счет расширения зоны возбуждения.

Однако на более высоких уровнях слухового пути в некоторой популяции нейронов осуществляются операции по выделению амплитудных изменений сигнала. Такие нейроны-детекторы, не реагируя в течение действия непрерывного тона, генерируют пачку импульсов в ответ на весьма незначительное изменение его амплитуды [11]. Поскольку настройка этих элементов на обнаружение развивается в течение единиц или даже десятков секунд, обнаружение с их помощью модуляции резко облегчается в адаптированном режиме.

Для коротких тональных отрезков механизмы настройки нейронов-детекторов не успевают вступить в действие и испытуемому становится трудно выявить амплитудную модуляцию таких сигналов. Однако в режиме вынужденного выбора тренированные испытуемые, по-видимому, обучаются



использовать менее определенные признаки, например периодичность плотности импульсации на длине отрезка. Поэтому различия порогов обнаружения в адаптированном и неадаптированном режимах уменьшаются при тренировке испытуемых и при использовании режима вынужденного выбора.

Обратим внимание еще на один аспект адаптации. Создается впечатление, что ее проявление мало зависит от того, имеет ли адаптирующий сигнал постоянную амплитуду, как в настоящей работе или в работе [18], изменяется ли его амплитуда по синусоиде, как в работе [5], или же по случайному закону, как в работе [10]. Это качественно соответствует данным наших электрофизиологических экспериментов: повышение чувствительности к модуляции проявлялось независимо от того, был ли модулирован адаптирующий сигнал или нет [25].

Использованная методика не позволяет судить о динамике развития адаптации. Судя по характеристикам обнаружения однократных приращений сигнала, процесс может развиваться в течение 1–2 с [18]. С другой стороны, данные Бекеши [5], а также физиологические результаты [26] свидетельствуют в пользу более длительного срока развития эффекта адаптации. Перспективной представляется постановка специальной психофизической работы для изучения динамики процесса снижения порогов обнаружения амплитудной модуляции. Работа должна выполняться при тех параметрах стимула, где эффект выражен наиболее сильно (малые частоты модуляции и большие уровни несущей).

Авторы выражают благодарность А. В. Корабчевской, О. В. Сосниной и В. Н. Телешеву, принимавшим участие в создании аппаратуры, а также Т. А. Левашевой, выполнившей машинописные работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Kiang N. Y., Watanabe T., Thomas E., Clark L. Discharge patterns of single fibres in the cats auditory nerve. Cambridge: MIT Press. 1965. 154 p.
2. Javel E. Basic properties of auditory fibers Neurobiology of hearing. The cochlea. N. Y.: Raven Press. 1986. P. 213–246.
3. Бибиков Н. Г. Слуховой нерв. Итоги науки. Сер. Физиология человека и животных. Вып. 39. М.: Изд-во ВИНТИ. 1988. С. 122–214.
4. Глезер В. Д. Механизмы опознания зрительных образов. М.: Наука, 1966. 204 с.
5. Bekesy G. Zur Theorie des Hores // Physik. Zeitschr. 1929. V. 30. № 1. P. 115–125.
6. Тумаркина Л. Н., Дубровский Н. А. Некоторые особенности восприятия человеком амплитудно-модулированных сигналов // Биофизика. 1966. Т. 11. № 4. С. 653–658.
7. Zwicker E. Die Grenzen der Horbarkeit der Amplitudenmodulation und der Frequenzmodulation eines Tones // Acustische. Beihefte. 1952. V. 2. № 3. P. 125–133.
8. Fay R. Psychophysics and neurophysiology of temporal factors in hearing by the goldfish: amplitude modulation detection // J. Neurophysiol. 1980. V. 44. № 2. P. 312–332.
9. Viemeister N. F. Adaptation of masking // Psychophysical, physiological and behavioural studies in hearing. Delft: Univ. Press. 1980. P. 190–199.
10. Viemeister N. F. Temporal modulation transfer functions based upon modulation thresholds // J. Acoust. Soc. Amer. 1979. V. 66. № 5. P. 1364–1380.
11. Бибиков Н. Г. Выделение амплитудно-модулированных отрезков в непрерывном тоне нейронами слуховой системы лягушки // Акуст. журн. 1988. Т. 34. № 2. С. 340–341.
12. Fay R. Sound intensity processing by the goldfish // J. Acoust. Soc. Amer. 1985. V. 78. № 4. P. 1296–1309.
13. Moller A. Responses of units in the cochlear nucleus to sinusoidally amplitude-modulated tones // Exper. Neurol. 1974. V. 45. № 1. P. 104–117.
14. Levitt H. Transformed up-down method in psychoacoustics // J. Acoust. Soc. Amer. 1971. V. 49. № 2. P. 467–477.
15. Fastl H., Schorer E. Critical bandwidth at low-frequency reconsidered/Auditory Frequency selectivity. N. Y.; L.: Plenum Press. 1986. P. 311–318.
16. Carlyn R., Moore B. Continuous versus gated pedestals and the «several departure» from Webers Law // J. Acoust. Soc. Amer. 1986. V. 79. № 2. P. 453–460.
17. Widin G., Viemeister N. F., Buus S. Effects of forward and simultaneous masking on intensity discrimination // J. Acoust. Soc. Amer. 1986. V. 80. № 1. P. 108–111.
18. Viemeister N. F. Intensity coding and the dynamic range problem // Hearing Res. 1988. V. 34. № 3. P. 267–274.
19. Rietz R. Differential intensity sensitivity of the ear for pure tones // Phys. Rev. 1928. V. 31. № 4. P. 867–875.



20. *Shorer E.* Critical modulation frequency based on detection of AM versus FM tones // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1986. V. 79. № 4. P. 1054–1057.
21. *Long F., Cullen I.* Intensity difference limens at high frequencies // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1985. V. 78. № 2. P. 507–513.
22. *Smith R., Brachman M.* Response modulation of auditory nerve fibers by AM stimuli: effects of average intensity // *Hearing Res.* 1980. V. 2. № 2. P. 123–133.
23. *Evans E., Palmer A.* Dynamic range of cochlear nerve fibers to amplitude modulated tones // *J. Physiol. (L.)*. 1980. V. 298. P. 33–34.
24. *Moller A.* Dynamic properties of primary auditory fibers compared with cells in the cochlear nucleus // *Acta Physiol. Scand.* 1976. V. 98. № 2. P. 157–167.
25. *Bibikov N. G., Gorodetskaya O. N.* Adaptation improves the reproduction of amplitude modulation in the auditory neurons of the frog // *Physiological and musical acoustics. Ceske Budejovice.* 1984. P. 61–64.
26. *Бибиков Н. Г., Бахтин Г. А.* Изменение чувствительности к прерыванию акустического сигнала в процессе адаптации слуховой системы лягушки // *Акуст. журн.* 1973. Т. 19. № 4. С. 614–616.

Акустический институт  
им. Н. Н. Андреева  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
4.1.1989