

## Периферические основы слухового распознавания изменений интенсивности импульсных звуков, предъявляемых в тишине и после воздействия шума

Л.К. Римская–Корсакова\*

*Акустический институт имени акад. Н.Н. Андреева, Россия, 117036, Москва, ул. Шверника, д. 6*  
(Статья поступила 13.11.2014; Подписана в печать 08.12.2014)

Причины ухудшения и облегчения распознавания изменений интенсивности коротких высокочастотных звуков (импульсов), предъявляемых в тишине, в шуме и после действия шума, анализировали путем сравнения результатов модельных и психоакустических экспериментов. В модельном эксперименте изучали особенности периферического кодирования изменений интенсивности импульсов; искали условия, в которых реакция ансамбля может сохранять информацию об амплитудно-временной структуре; анализировали статистические характеристики реакций ансамбля волокон слухового нерва, вызванные в ответ на действие импульсов и звуковых комплексов «шумовой маскир-импульс». Под кодированием понимали преобразование синаптических потенциалов в последовательность потенциалов действия, сгенерированных волокнами слухового нерва. Моделирование показало, что изменение уровня маскира приводит к изменению свойств кодирования импульса и звукового комплекса. Слуховые эксперименты показали, что эффекты облегчения распознавания возникают, если импульс средней интенсивности предъявляли вместе или после маскира, уровень которого соответствовал порогу маскировки. При задержке импульса относительно маскира в 50–60 мс, увеличение уровня последнего сопровождалось чередованием эффектов облегчения и ухудшения распознавания изменений интенсивности импульсов. Данные моделирования позволяют объяснить обнаруженные эффекты облегчения с точки зрения изменчивости свойств временного периферического кодирования импульсов и звуковых комплексов.

PACS: 43.66.Ba, 43.64.Pg, 43.66.Dc 43.66.Fe      УДК: 534.75

Ключевые слова: моделирование, реакции ансамбля волокон слухового нерва, одновременная и прямая последовательная маскировка импульса шумом, облегчение распознавания.

### ВВЕДЕНИЕ

В речи есть класс коротких взрывных согласных звуков [1]. Можно предположить, что распознавание коротких и тихих согласных, следующих за продолжительными и громкими гласными, должно ухудшаться, однако, это не происходит. Как мы полагаем, не только по причине различий спектральной и временной структуры согласных и гласных или различий свойств их слухового кодирования и анализа, но и по причине существования условий, в которых кодирование гласных может улучшить (облегчить) кодирование и восприятие согласных.

На отличия слухового анализа гласных и согласных указывают данные по распознаванию изменений интенсивности высокочастотных звуков разной длительности, таких как тоны, шумы и импульсы (последние можно рассматривать как упрощенные модели звуков речи). Так, распознавание продолжительных и широкополосных шумов подчиняется закону Вебера [2–4]. Этот закон почти выполняется для узкополосных тонов [5–7], существует даже термин: «near-miss to the Weber's law». Однако этот закон нарушается для импульсов [8, 9]. Отношение Вебера или отношение минимально ощущаемых различий интенсивности звуков к величине интенсивности обнаруживает горб в диапазоне средних интенсивностей импульсов. Сложение

импульса и шума может улучшить (облегчить) распознавание первого [9, 13] и, как следует из данных работы [9], даже способствовать восстановлению справедливости закона Вебера.

Одним из этапов периферических преобразований, наряду с преобразованиями звуков на базиллярной мембране (БМ), в рецепторных наружных и внутренних волосковых клетках (НВК и ВВК), является перекодирование аналоговой формы рецепторного потенциала ВВК во временную последовательность потенциалов действия (спайков), генерируемых ансамблем волокон слухового нерва (ВСН). Это перекодирование (или периферическое кодирование) следует иметь в виду, анализируя особенности слухового восприятия изменений интенсивности звуков. Например, считается [14, 15], что интенсивность коротких звуков пропорциональна числу возбужденных волокон ансамбля, а интенсивность продолжительных звуков — произведению числа возбужденных волокон на среднюю частоту их импульсации. Последняя величина не может не находиться под влиянием вызванной продолжительным звуком адаптации. Участие адаптации в периферическом кодировании звуков разной длительности демонстрирует рис. 1. Согласно декларированному принципу залпов [16], временной профиль высокочастотного звука воспроизводит временная последовательность спайков, сгенерированная ансамблем ВСН. Однако это справедливо только для звуков пороговых уровней. Если звук имеет надпороговый уровень, то в реакции ансамбля возникает *on*-ответ или синхронная реакция, приуроченная к начальной фазе звука [17]. Продолжи-

\*E-mail: lkrk@mail.ru

тельный звук адаптирует реакцию волокон, при этом оп-ответ ансамбля десинхронизируется, а частота импульсации волокон снижается [18]. Адаптация ВСН, а также нейронов ЦНС участвует в слуховом кодировании интенсивности продолжительных звуков. Вероятно, адаптация нивелирует проявления периферических преобразований (таких как нелинейность смещений БМ) в слуховом распознавании изменений интенсивности продолжительных звуков и способствует выполнению закона Вебера.

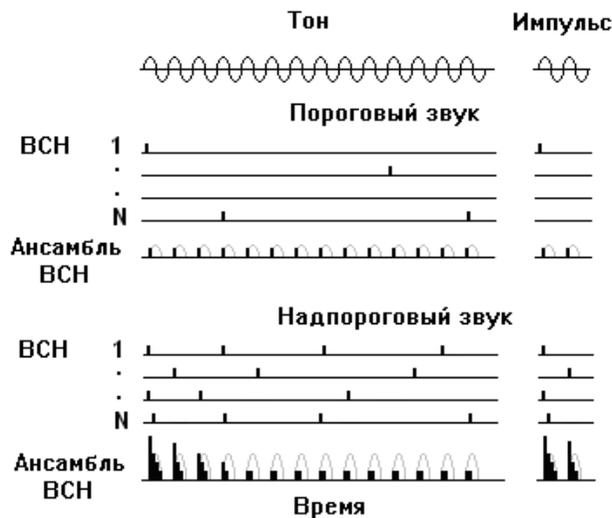


Рис. 1: Участие периферической адаптации в реализации принципа залпов,  $N$  — число волокон слухового нерва (ВСН) в ансамбле

Если звук короткий (рис. 1), то адаптация волокон и нейронов ЦНС не участвует в слуховом кодировании интенсивности. При средних интенсивностях импульсов, соответствующих области нелинейности смещений БМ [19], число возбужденных волокон достигает некоторой величины [20], которое незначительно меняется при значительных изменениях интенсивности. При отсутствии адаптации, по-видимому, периферическая нелинейность влияет на восприятие изменений интенсивности и вызывает нарушение закона Вебера.

В случае предъявления импульса в составе звукового комплекса «длительный шумовой маскер–импульс», слуховое восприятие изменений интенсивности импульсов и отношение Вебера может попасть под влияние вызванной шумом адаптации волокон. Ансамбль периферических волокон кодирует звуковой комплекс. Вызванная шумом адаптация вызывает уменьшение средней частоты импульсации и числа возбужденных волокон. Реакция ансамбля, вызванная импульсом после или на фоне действия шума, становится меньше по сравнению с таковой в тишине. Есть основания полагать [13, 21, 22], что в области нелинейности смещений БМ этот процесс, по-видимому, создает благоприятные условия для кодирования изменений интенсивности импульсов числом возбужденных волокон

и амплитудно-временной структуры ансамблем волокон, для слухового распознавания изменений интенсивности импульсов.

Помимо адаптации, слуховое восприятие изменений интенсивности импульсов и отношение Вебера может испытывать влиянием со стороны временного периферического кодирования звукового комплекса «длительный шумовой маскер–импульс». Чем меньше уровень маскира, тем очевидней присутствие импульса в реакции ансамбля волокон, возникшей в ответ на действие комплекса и, наоборот. Вполне возможно, что в определенных условиях сравнение проявлений импульсов в реакциях ансамблей, вызванных комплексами, может улучшить слуховое распознавание импульсов.

Цель данной работы состояла в выявлении причин ухудшения и облегчения распознавания изменений интенсивности высокочастотных импульсов, предъявляемых в тишине, в шуме и после его действия. Для этого мы сравнивали результаты модельных и психоакустических экспериментов. В модельных экспериментах мы оценивали свойства периферического кодирования звуковых комплексов «длительный маскер–импульс» и входящих в их состав импульсов, изучали изменчивость этих свойств, вызванную изменениями уровней маскеров, искали условия, в которых шум улучшал/ухудшал кодирование временной структуры и изменений интенсивности импульсов, а также способствовал контрастному выделению импульсов внутри комплексов. В слуховых экспериментах мы искали условия, в которых наступает улучшение и ухудшение распознавания изменений интенсивности импульсов при их предъявлении вместе с шумом или после него.

## 1. МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

### А. Модель волокна слухового нерва

Для изучения реакций ансамбля волокон слухового нерва (ВСН) мы использовали разработанную ранее имитационную модель одиночного волокна [23–27]. Модель имела несколько блоков преобразования входного сигнала  $X(t)$ .

1. Блок полосовой фильтрации, который воспроизводит фильтрующие свойства БМ; центральная частота полосового фильтра определяет значение характеристической частоты модели волокна (выходная функция блока  $Y(t)$ ).
2. Блок компрессии и детектирования сигнала, воспроизводящие соответствующие свойства внутренних волосковых клеток — ВВК (выходная функция блока  $R(t)$ ).
3. Блок формирования синаптического шума в виде случайного нормального процесса со средним значением и среднеквадратичным отклонением,

пропорциональными величине  $R(t)$ ; для формирования спонтанной активности (СА) среднеквадратичное значение синаптического шума увеличивали на некоторую постоянную величину (выходная функция блока  $S(t)$ ).

4. Блок низкочастотной фильтрация шума  $S(t)$  с постоянной времени 0,2 мс для моделирования синаптического потенциала модели нейрона спирального ганглия (выходная функция блока  $G(t)$ ).
5. Блок преобразования потенциала  $G(t)$  в последовательность спайков (выходная последовательность спайков  $P_i$ ). Спайки возникали на каждом шагу преобразования сигнала при превышении потенциалом  $G(t)$  пороговой функции нейрона  $H(t)$ .  $H(t)$  воспроизводила свойства абсолютной и относительной рефрактерности и те свойства адаптации, которые реальные волокна проявляют при электрической стимуляции [28]; рефрактерность — процесс снижения возбудимости волокна после генерации спайка; адаптация — процесс снижения частоты импульсации волокна в течение и после действия стимула.  $H(t)$  имела две экспоненциально-спадающие компоненты ( $H_f(t)$  и  $H_s(t)$ ) с разными начальными амплитудами (1 и 0,2) и разными постоянными времени (2 и 40 мс). После генерации спайка модель нейрона в течение 1 мс была невозбудимой; по истечении этого времени начальная амплитуда каждой из компонент увеличивались на остаток функции  $dH_f(t)$  и  $dH_s(t)$ , предшествующий генерации спайка.

Параметры моделей волокон были подобраны так, чтобы учесть известные свойства реальных волокон. Мы учитывали, что одна реальная ВВК имеет синаптические контакты с множеством волокон, которые обладают разными морфологическими и физиологическими свойствами [29–31]. Эти свойства зависят от уровня спонтанной активности волокна (СА). Чем больше СА, тем 1) ниже пороги реакции волокна; 2) круче и уже зависимость средней частоты импульсации волокна от уровня тона; 3) хуже волокно воспроизводит огибающую амплитудно-модулированного сигнала; 4) слабее у этого волокна выражены свойства адаптации [32].

Ансамбль волокон кодирует интенсивность и временной профиль импульсов двумя способами. Первый или стохастический способ предполагает, что в ответ на предъявление импульса каждое из волокон генерирует не более одного спайка. Интенсивность импульса пропорциональна числу возбужденных волокон ансамбля. Если интенсивность находится вблизи порогов реакции волокон, то изменения интенсивности импульсов пропорциональны изменениям числа возбужденных волокон. Рефрактерность отдельных волокон не влияет на реакцию ансамбля, поэтому она может воспроизводить временной профиль импульса. Принцип залпов может быть реализован только при стохастическом

способе. Однако число волокон в ансамбле ограничено, поэтому увеличение интенсивности сопровождается как уменьшением числа волокон, возбужденных в более поздние положительные фазы импульсов, так и искажением временного профиля импульса в реакции ансамбля.

Второй или детерминированный способ предполагает, что при высоких интенсивностях импульсов волокна генерируют более одного спайка. В таком случае ансамбль кодирует интенсивность и изменения интенсивности импульсов не числом волокон, а числом сгенерированных спайков. При этом рефрактерные свойства волокон еще больше искажают временной профиль импульса в реакции ансамбля.

Профили динамических характеристик реальных волокон с высокой и низкой СА отличаются друг от друга [33–35]. Характеристики низко пороговых волокон с высокой СА являются крутыми и проявляют насыщение. Характеристики высоко пороговых волокон с низкой СА, наоборот, являются пологими и проявляют слабое насыщение. Учитывая это, мы предположили, что волокна с высокой СА кодируют импульсы только стохастическим способом, а волокна с низкой СА — стохастическим и детерминированным способами.

Эффекты ухудшения и облегчения слухового распознавания изменений интенсивности были найдены для импульсов средних интенсивностей, соответствующих области нелинейности смещений БМ. Также как и авторы работы [36] мы предположили, что в периферическом кодировании импульсов средних интенсивностей в большей степени участвует ансамбль волокон с низкой СА, а волокна с высокой СА, по-видимому, находятся в состоянии насыщения и слабо реагируют на изменения параметров звуков. Мы моделировали реакции ансамбля, состоящего из 100 волокон с низкой СА (< 1 спайк/с). Анализируя изменчивость этих реакций при переходе от стохастического к детерминированному способу, мы задавали уровни маскеров и импульсов в пределах динамического диапазона модели волокна. По сравнению с реальным волокном этот диапазон заметно более узкий, поэтому ширина диапазонов, в которых кодирование импульсов осуществляется разными способами, оценивается качественно.

Центральные частоты импульсов и маскеров составляли 4 кГц, они соответствовали характеристическим частотам моделей волокон. Временной шаг вычислений был равен 1 мкс. При построении гистограмм его увеличили до 10 мкс. Импульс представлял собой отрезок синусоиды длительностью 2 мс. Суммарная длительность шума и задержка между концом маскера и началом стимула не могла превышать 100 мс.

Интенсивность импульсов мы оценивали по пиковой амплитуде  $A$ , выраженной в дБ относительно амплитуды  $A_0$ , равной порогу обнаружения импульса в реакции ансамбля.

## В. Анализируемые реакции моделей волокон слухового нерва

Если принять, что интенсивность импульса пропорциональна числу сгенерированных спайков ( $Np$ ) в ансамбле, содержащем  $Na$  волокон, тогда нормированное число волокон ансамбля, готовых кодировать изменения интенсивности, равно  $dINT = (1 - Np/Na)$ .

- Если  $dINT = 1$ , то импульс не вызвал реакций волокон ансамбля.
- Если  $0 < dINT < 1$ , то импульс закодирован стохастическим способом, и в ансамбле есть  $dINT$  волокон для кодирования изменений интенсивности.
- Если  $dINT = 0$ , то все волокна ансамбля среагировали на импульс, т.е. нет волокон для кодирования изменений интенсивности.
- Если  $dINT < 0$ , то импульс закодирован стохастическим и детерминированным способами, волокна могут генерировать более одного спайка. Абсолютное значение  $dINT$  определяет число волокон, а знак минус указывает на изменение способа кодирования импульса.

Для анализа свойств временного кодирования импульсов и звуковых комплексов ансамблем волокон мы использовали постстимульную гистограмму (PSTH и PSTH+), гистограмму распределения межспайковых интервалов (HISI), гистограмму вероятности после разряда (PH) или автокорреляционную функцию [14,15]. Гистограммы были получены путем суммирования реакций ста волокон на однократное предъявление комплекса. Они обнаруживали присутствие импульса, но отражали разные свойства реакции ансамбля, вызванные комплексом. PSTH+ и PSTH оценивали вероятность импульсации ансамбля волокон до, вовремя и после предъявления импульса и комплекса. PSTH+ была частью PSTH. Гистограмма HISI оценивала средний интервал и разброс интервалов генерации спайков в реакции ансамбля, а гистограмма PH — вероятность того, что в реакции ансамбля через время  $t$  после произвольно выбранного спайка возникнет новый спайк. При малых  $t$  PH соответствует HISI. Пик и неоднородности на PH указывали на повышение вероятности реакции ансамбля. Гистограммы PSTH+ и PSTH включали в себя реакции волокон, которые сгенерировали один или два спайка, и не позволяли выделить способ кодирования. Для определения способа кодирования можно воспользоваться модифицированным методом парных стимулов [13]. Метод предполагал суммирование спайков ( $N1, N2$ ), а также вычисление вероятностей появления спайков ( $P1 = N1/N, P2 = N2/Np$ ) в двух последовательных временных интервалах, равных  $1/2$  длительности импульса. При длительности импульса в 2мс, такой

интервал равен 1мс и соответствовал абсолютному рефрактерному периоду модели волокна. Поэтому в сумму  $N1$  были включены реакции волокон, которые реагировали один раз, а в сумму  $N2$  — один или два раза. Суммируя спайки, попавшие во второй интервал при условии отсутствия ( $Ns2$ ) или генерации ( $Nd2$ ) спайка в первом интервале, и вычисляя условные вероятности появления спайков  $S2 = Ns2/N$  и  $R2 = Nd2/N$ , мы получали доли реакции  $P2$ , сформированные стохастическим ( $S2$ ) и детерминированным ( $R2$ ) способами,  $P2 = S2 + R2$ .

Таким образом, способ кодирования импульса и готовность ансамбль к воспроизведению его профиля можно определить по вероятностям  $P1, P2, S2$  и  $R2$ :

- Если  $P1 = P2$ , то профиль PSTH+ соответствует профилю импульса.
- Если  $P1 > P2$ , то профиль PSTH+ искажен возникшим *on*-ответом.
- Если  $R2 = 0$ , то реакция ансамбля сформирована стохастическим способом.
- Если  $S2 = 0$ , то реакция ансамбля сформирована детерминированным способом.

В модельных экспериментах мы вычисляли гистограммы PSTH, PSTH+, HISI, PH, число  $dINT$  и вероятности  $P1, P2, S2, R2$  при варьировании уровней маскеров и импульсов. Эти характеристики мы использовали, чтобы определить условий, в которых ансамбль волокон может воспроизводить временной профиль и изменения интенсивности импульсов, подчеркивать присутствие импульса в реакции ансамбля, вызванной комплексом. Модельный эксперимент оценивал условия реализации принципа залпов, его возможное участие в слуховом распознавании изменений интенсивности импульсов, предъявляемых в тишине и при маскировке.

## С. Результаты и обсуждение

### 1. Эксперимент 1: реакции модели на импульсы, предъявляемые в тишине

Реакции ансамбля моделей ВСН на импульсы с разными амплитудами  $A$  показаны на рис. 2. Временной профиль PSTH, PSTH+, HISI или PH зависел от  $A$  (рис. 2а). Если  $A = 6$  и 9дБ, то значения HISI и PH были равны нулю. Это указывало на то, что каждое волокно реагировало только один раз, т.е. импульсы были закодированы стохастическим способом. Профиль PSTH+ соответствовал профилю импульсов при  $A = 6$ дБ, но имел *on*-ответ при  $A = 9$ дБ. Ансамбль содержит фиксированное число волокон, поэтому увеличение  $A$  вызывало рост реакций волокон в ранние положительные фазы импульса, но уменьшению таковых в поздние фазы. При  $A = 11$ дБ профиль PSTH+ также имел *on*-ответ, а профили HISI и PH — узкий

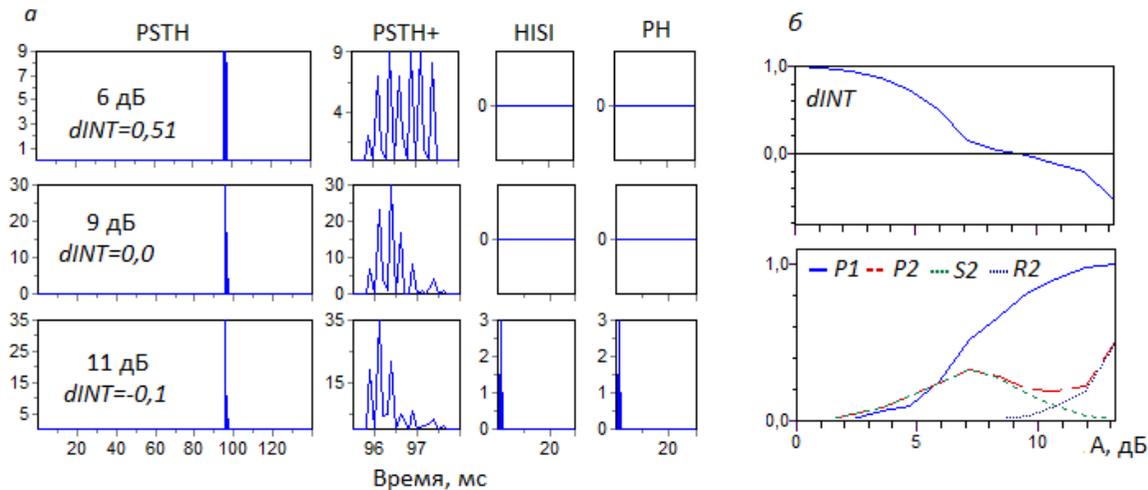


Рис. 2: Реакции ансамбля моделей волокон слухового нерва, полученные в ответ на одиночные импульсы разных уровней. На а: постстимульные гистограммы (PSTH и PSTH+), гистограммы распределения межспайковых интервалов (HISI) и гистограммы вероятности после разряда (PH). Как параметры на PSTH указаны пиковое значение амплитуда импульса  $A$  в дБ и  $dINT$ . По оси абсцисс — время в мс, по оси ординат — число возникших спайков в ансамбле, содержащем 100 моделей волокон. На б: зависимости  $dINT$ ,  $P1$ ,  $P2$ ,  $S2$ ,  $R2$  от амплитуды  $A$

пик с шириной соизмеримой с длительностью импульса. Это указывало на изменение способа кодирования, т. е. ансамбль кодировал импульс двумя способами.

Зависимости вероятностей  $P1$ ,  $P2$ ,  $S2$ ,  $R2$  от  $A$  (рис. 2б) позволяли оценить не только динамический диапазон ансамбля, но и диапазоны, в которых ансамбль кодировал импульсы разными способами. Динамический диапазон был узким и составлял примерно 13 дБ. При  $A < 9$  дБ  $S2 > 0$  и  $R2 = 0$ , т. е. импульс закодирован стохастическим способом. При  $A > 9$  дБ  $S2 > 0$  и  $R2 > 0$ , т. е. импульс закодирован стохастическим и детерминированным способами. При  $R2 > 0$  профили HISI и PH имели узкий пик. При  $A \leq 6$  дБ  $P1 = P2 = S2$ ,  $R2 = 0$  и реакция ансамбля воспроизводила временной профиль импульса. Увеличение  $A$  способствовало уменьшению  $S2$ , росту  $R2$  и искажению профиля импульса,  $P1 > P2$ .

Зависимость  $dINT$  от  $A$  (рис. 2в) выявила главную особенность кодирования изменений интенсивности импульсов ансамблем волокон. В середине динамического диапазона ( $= 9$  дБ)  $dINT = 0$ , т. е. все волокна ансамбля вовлечены в реакцию, и нет волокон для кодирования изменения интенсивности.  $dINT$  не равно нулю при низких и высоких амплитудах, при  $A < 9$  дБ и  $A > 9$  дБ. В первом случае ансамбль кодировал изменения интенсивности числом возбужденных волокон, во втором — числом сгенерированных спайков. При пороговых амплитудах ( $< 6$  дБ) реакция ансамбля воспроизводила временной профиль импульсов ( $P1=P2$ ), и изменения его интенсивности ( $dINT > 0$ ).

Таким образом, ансамбль волокон может кодировать импульсы двумя способами. Тихие импульсы закодированы стохастическим способом при участии небольшого числа волокон. Ансамбль минимально искажает

временной профиль импульсов, и в ансамбле есть достаточное число волокон для кодирования изменений интенсивности. Импульсы со средними амплитудами вызывают возбуждение практически всех волокон ансамбля, что нарушает кодирование изменений интенсивности и профиля импульса. При действии импульсов с высокими амплитудами волокна реагируют более одного раза. Ансамбль кодирует импульсы двумя способами. Реакция ансамбля воспроизводит изменения интенсивности, но не профиль импульса.

Оценим эти данные с позиции слухового распознавания. Импульсы не вызывают слуховую адаптацию, поэтому мы можем ожидать проявлений периферических преобразований в слуховых реакциях. Наихудшие условия для периферического кодирования изменений интенсивности найдены в середине динамического диапазона ансамбля волокон. Ухудшение кодирования вызвано наличием фиксированного числа волокон в ансамбле. Наихудшие условия для слухового распознавания были найдены в середине динамического диапазона слуха. Реальные волокна по сравнению с моделями имеют более широкий динамический диапазон. Волокна с низкой СА проявляют слабое насыщение, что, по-видимому, дополнительно расширяет их динамический диапазон. Кроме этого, диапазон, в котором число волокон ансамбля меняется сравнительно мало, может быть довольно широким из-за нелинейности смещений БМ.

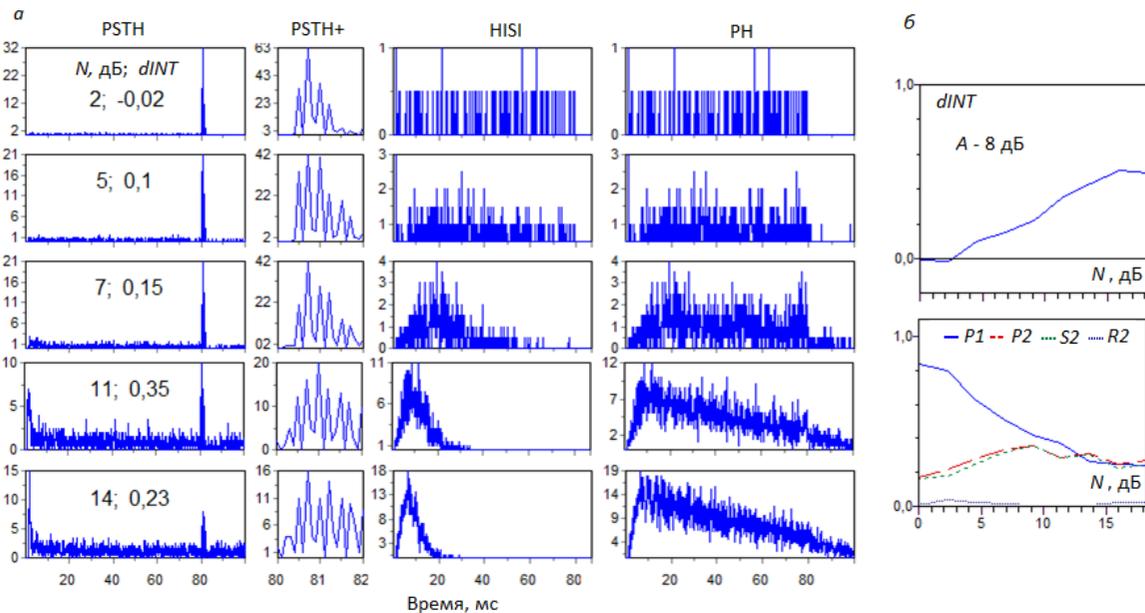


Рис. 3: Реакции ансамбля моделей волокон слухового нерва, полученные в ответ на импульс, смешанный с шумовым маскером разных уровней  $N$  в дБ. Пиковое значение амплитуды импульса  $A$  равно 8 дБ. На *а*: постстимульные гистограммы (PSTH и PSTH+), гистограммы распределения межспайковых интервалов (HISI) и гистограммы вероятности после разряда (PH). Как параметры на PSTH указаны уровень маскира  $N$  в дБ и число  $dINT$ . По оси абсцисс — время в мс, по оси ординат — число сгенерированных спайков ансамблем, содержащим 100 моделей волокон. На *б*: зависимости  $dINT$ ,  $P1$ ,  $P2$ ,  $S2$ ,  $R2$  от уровня маскира  $N$  в дБ

## 2. Эксперимент 2: реакции модели на импульсы, предъявляемые вместе с шумом

Реакции ансамбля моделей волокон, полученные при одновременном предъявлении импульса и шума, представлены на рис. 3. Импульс задержан относительно начала шума на 80 мс. Пиковая амплитуда импульса  $A$  была равна 8 дБ, она соответствовала средней части динамического диапазона ансамбля, где  $dINT = 0$  (рис. 2). Переменным параметром был уровень шума.

Гистограммы PSTH, PSTH+, HISI, PH обнаруживали особенности кодирования импульсов, находящихся в составе звуковых комплексов (рис. 3а). Увеличение уровня шума  $N$  приводило к увеличению реакции ансамбля, вызванной шумом, (PSTH), но уменьшению и деформации реакции, вызванной импульсом (PSTH+). Чем больше был уровень шума, тем больше была адаптация волокон, тем меньше было волокон, которые реагировали на импульс, но тем точнее PSTH+ воспроизводила профиль импульса.

Присутствие импульса можно обнаружить в профилях HISI и PH. При низких уровнях шума ( $N = 2-5$  дБ) профиль HISI имел вызванный импульсом узкий пик и вызванный шумом сглаженный горб. Появление пика при малых  $t$  указывало на кодирование импульса двумя способами. Высокая точка горба приходилась на интервал, обратно пропорциональный средней частоте импульсации ансамбля, возникшей в ответ на действие шума. При средних и высоких уровнях шума

( $N = 7-14$  дБ) HISI имела вызванный шумом горб. По влиянию вызванной шумом адаптации пик (след от импульса) исчезал, т. е. ансамбль кодировал импульс стохастическим способом. При увеличении  $N$  средняя частота импульсации волокон повышалась, интервал, на который приходился горб, уменьшался, а гистограмма HISI сужалась.

При низких уровнях шума профиль PH, как и HISI, имел вызванный импульсом узкий пик при малых  $t$ . При средних и высоких уровнях шума вместо пика появилась неоднородность на интервале  $t$ , равном задержке импульса относительно начала шума. Эта неоднородность подчеркивала присутствие импульса в реакции ансамбля, вызванной комплексом. При уровне шума в 14 дБ неоднородность исчезала, хотя PSTH обнаруживала присутствие импульса.

Способ кодирования импульсов также можно определить, анализируя вероятности  $P1$ ,  $P2$ ,  $S2$ ,  $R2$  (рис. 3б). При  $A = 8$  дБ и низких  $N$  ансамбль кодировал импульсы стохастическим и детерминированным способами: вероятности  $P1$ ,  $P2$ ,  $S2$ ,  $R2$  не равны нулю. С ростом  $N$  вероятности  $P1$  и  $R2$  уменьшались, а вероятности  $P2$  и  $S2$  возрастали. При  $N = 8-12$  дБ,  $R2 = 0$ , а  $P1 = P2$ , это указывало на то, что ансамбль воспроизводил профиль стохастическим способом и практически без искажений.

Зависимость  $dINT$  от  $N$  (рис. 3б) позволяет оценить готовность ансамбля к кодированию изменений интенсивности импульса заданного уровня. При самых низ-

ких уровнях шума ( $N = 0-3$  дБ)  $dINT = 0$ , т. е. в ансамбле нет волокон для кодирования изменений интенсивности. Рост  $N$  приводил к увеличению числа ( $dINT$ ) невозбужденных волокон, годных для кодирования изменений интенсивности. При самых высоких уровнях ( $N > 10$  дБ) ансамбль воспроизводил изменения интенсивности ( $dINT > 0$ ) и временной профиль импульсов ( $P1 = P2$ ).

Из сравнения реакций ансамбля, полученных в ответ на комплексы, содержащие импульсы с разными амплитудами (рис. 3б и рис. 4) следовало, что для заданной амплитуды  $A$  существует определенный уровень шума  $N$ , начиная с которого ансамбль может воспроизводить изменения интенсивности ( $dINT > 0$ ).

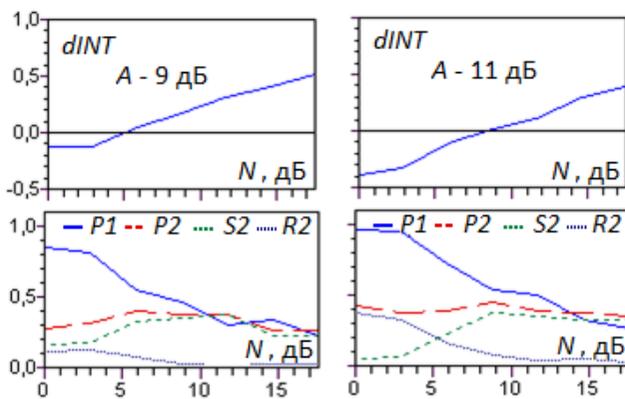


Рис. 4: Реакции ансамбля моделей волокон слухового нерва, полученные в ответ на импульс, смешанный с шумом разных уровней  $N$  в дБ. Пиковые значения амплитуд импульсов  $A$  равны 9 и 11 дБ. Показаны зависимости  $dINT$  и вероятности  $P1$ ,  $P2$ ,  $S2$ ,  $R2$  от уровня маскиера  $N$  в дБ

Таким образом, в тишине периферическое кодирование импульсов средних уровней ухудшается при изменении способа периферического кодирования импульсов (Эксперимент 1). При сложении импульса и шума вызванная шумом адаптация восстанавливает стохастический способ кодирования импульсов и способствует повышению числа невозбужденных волокон в ансамбле, годных для кодирования изменения интенсивности (Эксперимент 2). Чем больше уровень шума  $N$ , тем больше  $dINT$ . Поэтому наилучшее кодирование изменений интенсивности имеет место вблизи порога обнаружения импульса на фоне шума. Чем больше амплитуда импульса  $A$ , тем больше должен быть уровень шума  $N$ , при котором кодирование будет наилучшим. Мы полагаем, что рассмотренные особенности кодирования позволяют объяснить данные известного слухового эксперимента.

### 3. Эксперимент 3: реакции модели на импульсы, предъявляемые после шума

Влияние маскиера на кодирование следующего за ним импульса обнаруживают данные рис. 5 и рис. 6. Звуковой комплекс состоял из отрезка шума длительностью 60 мс и импульса длительностью 2 мс. Импульс был задержан относительно конца шума на 35 мс. Пиковая амплитуда импульса  $A$  была равна 8 дБ и соответствовала середине динамического диапазона ансамбля ( $dINT \sim 0$ ).

Изменения уровня шума  $N$  вызывали изменения профилей гистограмм PSTH, PSTH+, HISI, PH. (рис. 5а). Изменения были более значительными при последовательной маскировке (рис. 5), чем при одновременной маскировке (рис. 3), и были тем больше, чем больше была задержка между концом маскиера и началом импульса. Так же как и в случае одновременного предъявления импульса и шума, чем выше был уровень  $N$ , тем точнее ансамбль воспроизводил профиль импульса (см. PSTH+).

При низком уровне шума ( $N = 3$  дБ), так же как и в Эксперименте 2, профиль HISI имел вызванный импульсом узкий пик в области интервалов, соответствующих длительности импульса, а также широкий и сглаженный горб в области интервалов, соответствующих длительности звукового комплекса. Самая высокая точка горба соответствовала интервалу, величина которого была обратно пропорциональна средней частоте импульсации ансамбля, возникшей в ответ на комплекс. При  $N \Rightarrow 6$  дБ этот интервал стал меньше задержки между импульсом и концом шумом; обнаруживающий присутствие импульса узкий пик пропал, а на интервале, равном задержке, возник второй горб. Ширина двух горбов HISI уменьшалась при росте  $N$ .

При  $N \Rightarrow 6$  дБ конец профиля PH отмечал локальный максимум. При  $N = 18$  дБ он исчез, хотя PSTH все еще имела след от импульса. Пик, горбы и максимум на HISI и PH обнаруживали присутствие импульса в реакции ансамбля, вызванной комплексом, и они могли создавать периферические основы слуховых признаков комплексов.

По вероятностям  $P1$ ,  $P2$ ,  $S2$ ,  $R2$  можно определить способ кодирования импульсов (рис. 5б). Ансамбль кодировал импульс двумя способами при  $N = 3$  дБ, так как  $S2$  и  $R2 > 0$ , или только стохастическим способом при  $N > 3$  дБ, так как  $R2 = 0$ . Увеличение  $N$  вело к уменьшению вероятности  $P1$ , но увеличению вероятности  $P2$ . При  $N = 13$  дБ  $P1 \sim P2$ , и ансамбль воспроизводил профиль импульса. Как следует из рис. 5в,  $dINT=0$  в диапазоне  $N$  от 0 до 7 дБ. Этот диапазон был шире при последовательной маскировке (рис. 5б), чем при одновременной маскировке (рис. 3б). При увеличении  $N$  выше 7 дБ  $dINT$  возрастало. При  $N = 12-14$  дБ ансамбль хорошо воспроизводил изменения интенсивности ( $dINT \gg 0$ ) и временной профиль импульсов ( $P1=P2$ ).

Шум высокого уровня (за счет адаптации) создавал

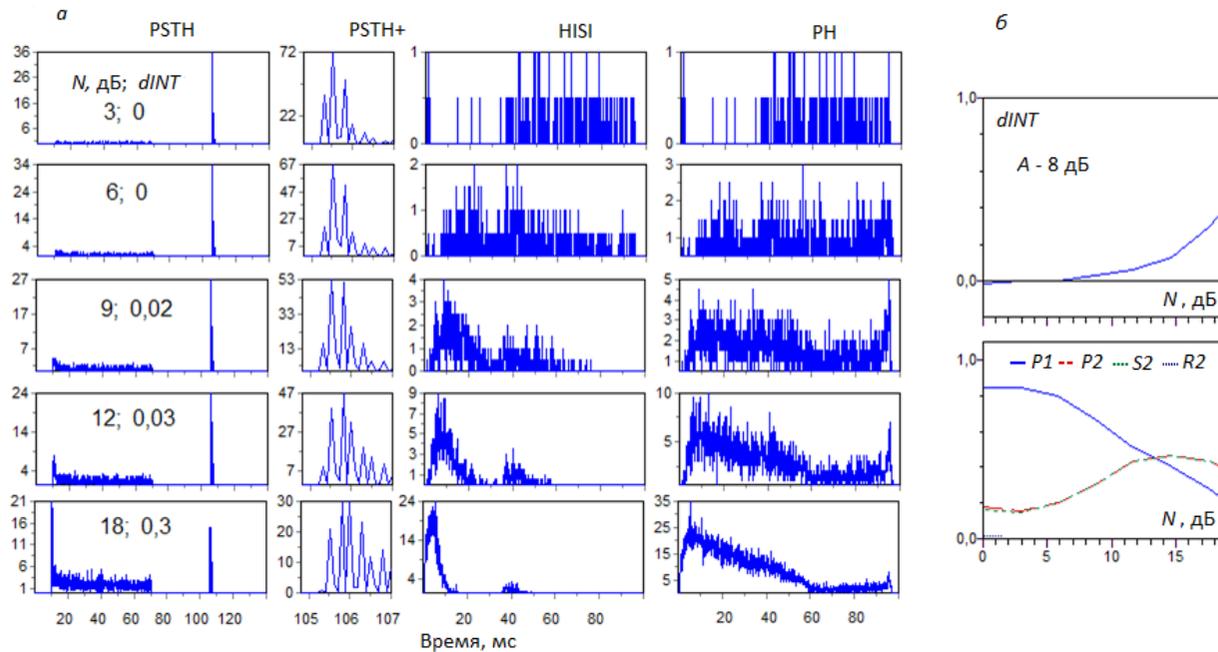


Рис. 5: Реакции ансамбля моделей волокон слухового нерва, полученные в ответ на импульс, предъявляемый после маскира разных уровней  $N$  в дБ. Длительность маскира равна 60 мс, задержка импульса относительно конца маскира – 35 мс. Остальные объяснения – см. рис. 3

хорошие условия для кодирования изменений интенсивности импульсов в условиях одновременной и последовательной маскировок. Однако в условиях последовательной маскировки шумы более низких уровней также могли подчеркнуть (даже несмотря на то, что  $dINT = 0$ ) или скрыть изменения интенсивности импульсов. На рис. 6 представлены реакции ансамбля, полученные в ответ на комплексы, в которых шумы и импульсы имели разные уровни ( $N = 4$  и  $9$  дБ) и пиковые амплитуды ( $A = 9$  и  $12$  дБ). Во всех случаях импульс оставлял заметный след на PSTH, но условия для кодирования изменений интенсивности числом возбужденных волокон отсутствовали ( $dINT = 0$ ).

Случай 1 представлен на рис. 6а. Импульсы с разными амплитудами предъявляли в шуме низкого уровня ( $N = 4$  дБ). Профили HISI и RH выявили присутствие только шума при  $A=9$  дБ, но шума и импульса при  $A=12$  дБ. В первом случае ансамбль кодировал импульс только стохастическим способом, а во втором – двумя способами. Поскольку шум вызвал слабую реакцию ансамбля, изменение амплитуды импульса можно легко обнаружить, сравнивая профили HISI и RH. Предполагается [37], что такие характеристики как HISI и RH, лежат в основе формирования высотных свойств сложных звуковых комплексов и могут влиять на распознавание изменений интенсивности импульсов, входящих в состав комплексов.

Случай 2 представлен на рис. 6б. Шум имел средний уровень ( $N=9$  дБ). Так же как и ранее, ансамбль кодировал импульс стохастическим способом при  $A=9$  дБ

и двумя способами при  $A=12$  дБ. Вне зависимости от способа кодирования импульса профили HISI были двугорбыми, а концы профилей RH отмечали локальные максимумы. Пик, возникший при  $A=12$  дБ на HISI и RH в пределах длительности импульса был малозаметным на фоне повышенной реакции ансамбля, вызванной комплексом. Хотя изменения амплитуды импульса меняли способ его кодирования, но не приводили к заметным отличиям в таких реакциях, как HISI и RH.

Подведем итоги раздела 1: Ансамбль волокон кодирует импульс двумя способами. В тишине кодирование изменений интенсивности импульса ухудшается в середине динамического диапазона ансамбля при стохастическом кодировании и при возбуждении большинства волокон ансамбля ( $dINT \approx 0$ ). При предъявлении импульса среднего уровня после шума, а также вместе с шумом высокого уровня кодирование изменений интенсивности числом возбужденных волокон восстанавливается за счет вызванной шумом адаптации, которая уменьшает число возбужденных импульсом волокон (Эксперимент 2 и 3). Поэтому мы ожидаем найти проявления слухового облегчения распознавания в условиях последовательной маскировки подобные тем, которые были обнаружены при одновременной маскировке.

Кроме этого, шум низкого уровня не может улучшить кодирование изменений интенсивности импульсов средних уровней числом возбужденных волокон ( $dINT$  примерно равно нулю), но может подчеркнуть

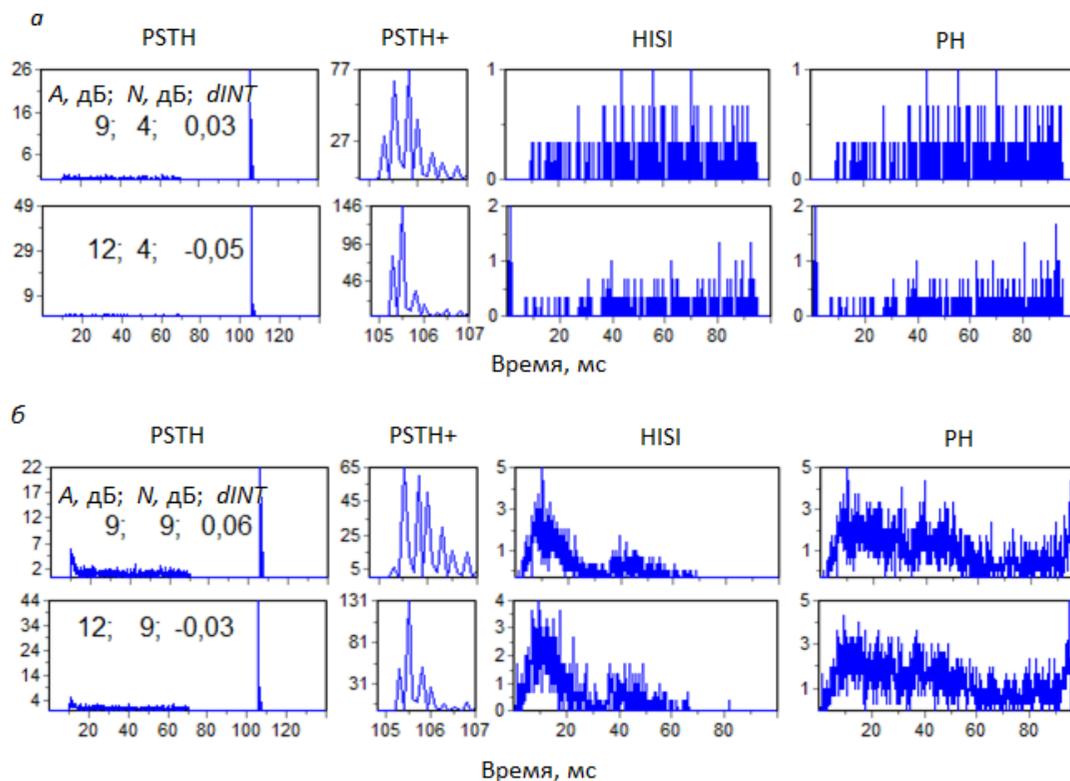


Рис. 6: Реакции ансамбля моделей волокон слухового нерва, полученные в ответ на импульс, предъявляемый после маскира. На а: сравнение реакции, вызванных импульсами разных уровней, предъявляемых после маскира низкого уровня; на б — после маскира высокого уровня. Как параметры на PSTH: пиковое значение амплитуды импульсов  $A$  в дБ, уровень маскира  $N$  в дБ, число  $dINT$ . Остальные объяснения на рис. 3.

смену способа кодирования импульсов в реакции ансамбля, вызванной комплексом. Эта смена проявляется в распределении межспайковых интервалов ансамбля волокон, и может быть основой облегчения слухового распознавания импульсов разных интенсивностей. Шум среднего уровня еще не может улучшить кодирование изменений интенсивности импульсов средних уровней числом возбужденных волокон ( $dINT$  все еще равно нулю), однако, в его присутствии реакция ансамбля маскирует изменение способа кодирования импульсов. Вызванная комплексом гистограмма распределения межспайковых интервалов имеет два горба. Подобное распределение может быть основой появления дополнительного слухового признака, по-видимому, связанного с периодичностью комплекса и мешающего опознанию импульса. По-видимому, это означает, что между диапазонами шумов низкого и высокого уровня может существовать некоторый средний диапазон, в котором слуховое распознавание импульсов в шуме может оказаться хуже по сравнению с таковым в двух соседних диапазонах.

## 2. ПСИХОАКУСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В слуховых экспериментах мы искали проявления разных механизмов (см. введение и раздел 1), вызывающих облегчение распознавание изменений интенсивности импульсов при их предъявлении в шуме и после него. Эксперименты были проведены в разное время. В первом эксперименте были измерены пороги распознавания изменений интенсивности импульсов в тишине. Хотя этот эксперимент повторял известные измерения [8, 9], но был нужен для определения наихудших порогов распознавания импульсов в конкретных экспериментальных условиях. Во втором эксперименте мы измеряли пороги распознавания изменений интенсивности высокочастотных импульсов при их предъявлении вместе с шумовыми маскирами. Этот эксперимент также повторял уже проведенные измерения [9], но позволял провести непосредственное сравнение результатов слуховых и модельных экспериментов. В третьем эксперименте мы измерили пороги распознавания изменений интенсивности высокочастотных импульсов при последовательной маскировке. Этот эксперимент не был повторением известных экспериментов, он был нацелен на обнаружение эффектов облегчения распознавания импульсов при их следова-

нии за шумовыми маскерами.

### А. Метод измерений

Слуховые эксперименты проводили в звукозаглушенной камере. Был использован аппаратно-программный комплекс, обеспечивающий генерацию звуков, управление экспериментом и протоколирование данных [13, 21, 22]. Импульсы и маскиры формировали в виде файлов. Для проигрывания файлов использовали 16-битный цифро-аналоговый звуковой адаптер Creative, имеющий соотношение сигнал/шум 90 дБ и частоту квантования 44,1 кГц. Испытуемые прослушивали звуки через головные телефоны Sennheiser HD-265. Для фиксации реакций испытуемых было использовано подключенное к компьютеру устройство сигнализации и обратной связи (пульт). При нажатии на клавишу пульта программа формировала порции отчета эксперимента и генерировала новые звуковые файлы.

Для определения порогов был использован адаптивный двух-альтернативный двух-интервальный метод вынужденного выбора. Согласно методу, испытуемый прослушивал два звуковых интервала, разделенных паузой в 500 мс. Длительность интервалов составляла либо 700 мс, либо была на 100 мс больше длительности маскера. Сравнимые стандартный и тестовый импульсы в случайном порядке возникали в одном из этих интервалов. Первоначально амплитуда тестового импульса была больше, чем амплитуда стандартного. Испытуемый путем нажатия на одну из двух клавиш компьютера определял, в какой из двух интервалов он слышал тестовый импульс. После двух подряд правильных ответов амплитуду тестового импульса уменьшали на один шаг, после каждой ошибки — увеличивали на один шаг. Переходы от увеличения к уменьшению или, наоборот, от уменьшения к увеличению амплитуд тестового сигнала называли точками поворота. Первоначально шаг уменьшения или увеличения амплитуды составлял 30% от его текущего значения. Если ошибка среднего значения порога по первым четырем точкам поворота достигала 2 дБ, то шаг уменьшали в 2 раза. Однако шаг никогда не был меньше 7,5%. Прослушивание звуковых интервалов заканчивали на одиннадцатой точке поворота. Порог определяли путем усреднения амплитуд, полученных в последних восьми точках поворота. Он соответствовал порогу, определенному по психометрической кривой на уровне 71% правильных ответов [38]. Порог измеряли три раза подряд, если ошибка среднего значения превышала 2 дБ, то проводили дополнительные измерения.

Уровень маскера ( $N$ ) и интенсивность импульса ( $A$ ) определяли по величине среднеквадратичного отклонения и пиковой амплитуде, определённые в дБ УЗД. Для этого значения  $N$  и  $A$  сопоставляли с уровнем звукового давления чистого тона с частотой 4 кГц. По-

следний уровень измеряли в пространстве между головным телефоном и левым ухом испытуемого, используя шумомер Robotron 0024 RTF с микрофонным усилителем MV201 и капсюлем МК201.

Значения  $N$  и  $A$  также определяли в дБ над порогом слышимости (ПС). Для этого для каждого испытуемого измеряли пороги обнаружения маскера и импульса в дБ УЗД. Испытуемые прослушивали импульсы и маскиры либо двумя ушами, либо левым ухом.

За порог распознавания изменений интенсивности импульсов принимали отношение  $20 \log(dA/A)$ , где  $A$  — пиковая амплитуда стандартного импульса,  $dA$  — пороговая разность амплитуд тестового и стандартного импульсов. За порог обнаружения импульсов принимали минимальное достоверно обнаруживаемое значения  $N$  или  $A$ .

Стандартные и тестовые импульсы имели синусоидальное заполнение с частотой 4 кГц. Профиль огибающей импульса соответствовал Гауссовой функции. С тем, чтобы минимизировать влияние спектральной обработки на результаты измерений, ширина частотной полосы импульса (на уровне 0,7) была равна 800 Гц и соответствовала ширине критической полосы слуха [2].

Максимум спектра маскера и ширина его частотной полосы составляла 4 кГц и 1000 Гц. Длительность маскера и задержка между его концом и началом и импульсом указаны в разделе 2.2. Время нарастания и спада маскера составляли 5 мс.

В измерениях приняли участие шесть испытуемых женского пола. Возраст испытуемого S2 был более 55 лет, возраст остальных — не превышал 25 лет. Характеристики слуха испытуемых соответствовали возрастным нормам. Все испытуемые имели опыт прослушивания звуков. Испытуемый S3 имел музыкальное образование. Индивидуальные пороги обнаружения импульсов и маскеров представлены в табл. 1.

### В. Результаты и обсуждение

#### 1. Эксперимент 1: распознавание импульсов, предъявляемых в тишине.

Пороги распознавания изменений интенсивности импульсов, полученные при разных пиковых амплитудах стандартного импульса ( $A$ ) представлены на рис. 7. Амплитуды  $A$  варьировали в диапазоне 10–50 дБ ПС. Испытуемые прослушивали импульсы двумя ушами.

Кривая распознавания оказалась нелинейной. Наихудший порог распознавания был получен при  $A$  в 20 дБ ПС. С ростом или уменьшением амплитуд импульсов относительно 20 дБ — распознавание заметно улучшалось. Полученный результат соответствовал данным известных экспериментов [8, 9, 13] и данным модельного эксперимента 1 (п.1.3.1).

Мы исходили из того, что свойства периферического кодирования импульсов могут влиять на слуховое рас-

Таблица I: Пороги обнаружения импульсов и маскеров (Mean), измеренные у восьми испытуемых. Егг — ошибка среднего значения порогов; No — число измерений порогов обнаружения; D — длительность маскера; r+l указывает, что стимулы предъявляли одновременно на два уха, l — на левое ухо

Испытуемый, ухо	Импульс			Шумовой маскер			
	Mean, дБ УЗД	Егг, дБ	No	D, с	Mean, дБ УЗД	Егг, дБ	No
S1, r+l	30.91	0.46	10	0.9	13.55	1.44	4
S2, r+l	37.29	0.35	8	0.9	19.78	0.76	7
S3, r+l	27.73	0.39	8	0.9	9.90	2.33	12
S4, r+l	27.04	0.67	6	0.9	10.90	2.09	4
S5, l	31.40	0.46	6	0.5	12.35	0.53	4
S6, l	25.46	0.74	4	0.5	2.15	0.80	6

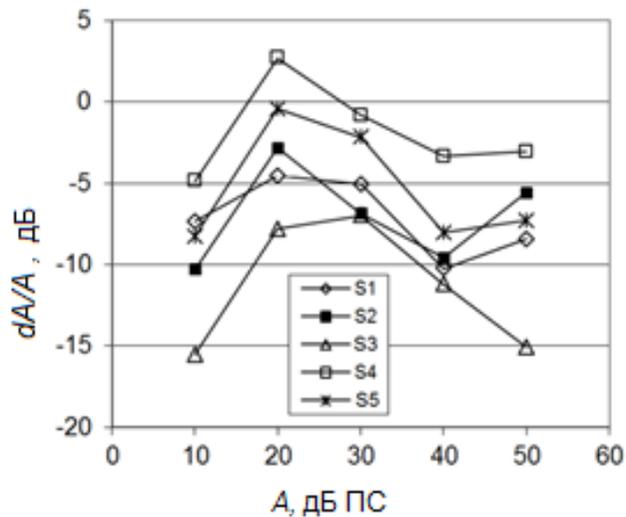


Рис. 7: Индивидуальные пороги распознавания изменений интенсивности высокочастотных импульсов в тишине, полученные для пяти испытуемых (параметр) Абсцисс: пиковая амплитуда импульсов  $A$ , в дБ ПС. Ординат: пороги распознавания  $dA/A$  в дБ.

познавание, поскольку импульсы закодированы синхронным разрядом ансамбля волокон и не вызывают адаптации. Моделирование позволило выявить связь между периферическим кодированием изменений интенсивности и амплитудно-временной структуры импульсов. Кодирование было наихудшим в среднем динамическом диапазоне ансамбля волокон. Если значения амплитуд импульсов  $A$  были ниже или выше середины динамического диапазона ансамбля волокон, то кодирование изменений интенсивности было лучше либо за счет увеличения числа невозбужденных волокон в ансамбле при стохастическом кодировании, либо за счет увеличения числа сгенерированных спайков при детерминированном кодировании.

## 2. Эксперимент 2: распознавание импульсов, предъявляемых одновременно с шумовыми маскерами

В этом эксперименте мы измерили пороги распознавания изменений интенсивности импульсов при предъявлении их вместе с шумом [21] (рис. 8). Варьируемым параметром был уровень шума. В измерениях приняли участие испытуемые S2, S3 и S4. Импульсы и маскеры предъявляли сразу на оба уха. Длительность маскера была равна 700 мс, задержка импульса относительно начала маскера — 400 мс. Пиковые амплитуды стандартных импульсов  $A$  меняли в диапазоне 10–60 дБ ПС (указаны как параметры на рис. 8).

В диапазоне амплитуд  $A$  в 20–50 дБ ПС увеличение уровня маскера вызывало облегчение распознавания импульсов по сравнению с таковым в тишине. Чем больше был уровень шума, тем меньше становились пороги распознавания. Максимальное облегчение, определенное как разность между порогами распознавания в тишине и шуме, достигало почти 10 дБ. Его регистрировали вблизи порогов обнаружения импульсов в шуме. Чем больше была амплитуда  $A$ , тем больше был уровень шума  $N$ , при котором регистрировали максимальное облегчение.

Полученные результаты соответствовали данным известных экспериментов [8, 9] и данным модельного эксперимента 2 (п.1.3.2). Ухудшение распознавания в тишине мы связывали с ухудшением кодирования изменений интенсивности импульсов в ансамбле волокон. Шум, вызывая адаптацию, создавал благоприятные условия для кодирования изменений интенсивности импульсов числом возбужденных волокон. На участие адаптации, вызванной шумом, в распознавании указывают следующие совпадения. Периферическое кодирование (рис. 3 и 4) и слуховое распознавание (рис. 8) изменений интенсивности импульсов было тем лучше, чем больше был уровень шума. Для каждой интенсивности импульсов был найден определенный уровень шума вблизи порога обнаружения импульса в шуме, при котором периферическое кодирование (рис. 3 и 4) и слуховое распознавание (рис. 8) изменений интенсивности было лучше в шуме, чем в тишине.

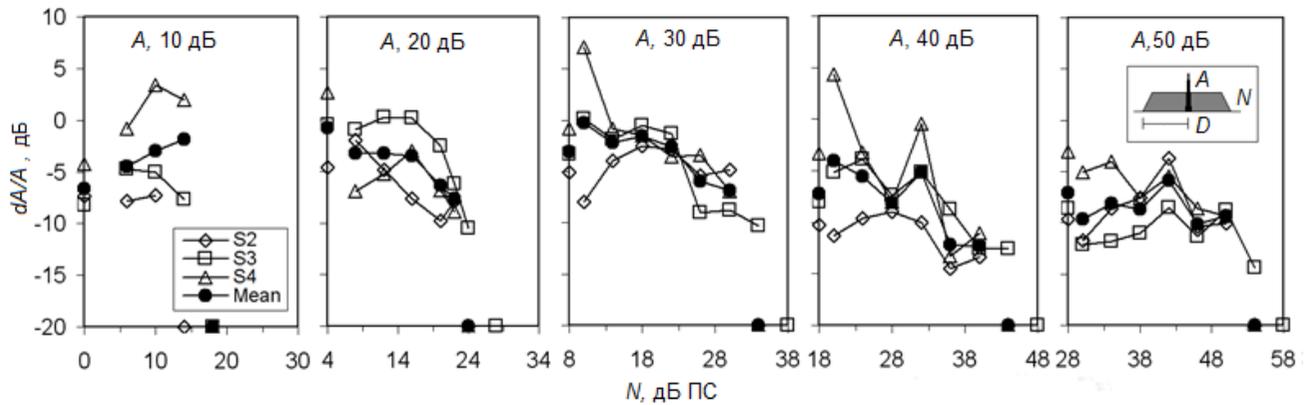


Рис. 8: Индивидуальные средние (Mean) пороги распознавания изменений интенсивности импульсов, предъявляемых вместе с маскерами. Параметры: испытуемые (S2, S3, S4), схема эксперимента, пиковая амплитуда стандартных импульсов  $A$ , дБ ПС. Абсцисс: уровень маскера  $N$  в дБ ПС. Ординат: пороги распознавания  $dA/A$  в дБ. Точки на оси ординат — пороги распознавания в тишине. Точки на оси абсцисс — уровень шума, при котором (согласно словесному сообщению испытуемых) задача распознавания импульсов стала задачей обнаружения более громкого импульса на фоне шума

### 3. Эксперимент 3: распознавание импульсов, предъявляемых после шумовых маскеров

Первоначально мы искали проявления вызванной шумом адаптации в слуховом распознавании импульсов, предъявляемых после маскеров. В измерениях приняли участие испытуемые S1, S2, S3 и S4. Импульсы и маскиры предъявляли одновременно на два уха. Длительность маскера была равна 300, 600 или 900 мс. Пиковая амплитуда стандартных импульсов  $A$  составляла 20 дБ ПС, так как при этой амплитуде испытуемые хуже всего распознавали изменения интенсивности импульсов в тишине (рис. 7). У некоторых испытуемых вместе с порогами распознавания были измерены пороги маскировки.

Пороги распознавания изменений интенсивности импульсов, полученные при разных уровнях маскера  $N$  и задержках импульса относительно конца маскера в 12 мс (первая серия измерений) и 60 мс (вторая серия измерений) показаны на рис. 9 и 10. Как правило, увеличение  $N$  сопровождалось увеличением порогов маскировки, но уменьшением порогов распознавания (рис. 9 и 10). Мы определили облегчение как разность между порогами распознавания, измеренными в тишине и в шуме. Максимальное облегчение было получено вблизи порогов обнаружения импульсов, предъявляемых после маскеров (маскировка 15–20 дБ). Чем больше была длительность маскера и задержка, тем больше была величина облегчения. У испытуемых S3 и S4 она могла достигать 15–20 дБ (рис. 9 и 10). Чем больше была задержка, тем более пологой была кривая маскировки, тем шире был диапазон уровней маскеров  $N$  и тем больше были значения  $N$ , при которых возникало облегчение. На участие адаптации, как мы полагаем, указывает обнаружение связи между длительностью маскера, наклоном кривой маскировки и величиной облегчения. Скорее всего, адаптация осу-

ществляла тонкую подстройку чувствительности слуховой системы под действующий импульс и способствовала облегчению распознавания изменений интенсивности импульсов.

Данные слуховых и модельных экспериментов не противоречат друг другу (п.1.3.3, рис. 5). Адаптация волокон улучшала условия кодирования изменений интенсивности импульсов числом возбужденных волокон вблизи порогов обнаружения и восстанавливала стохастический способ кодирования импульсов.

В отличие от всех других испытуемых, испытуемый S3 имел профессиональное музыкальное образование и хорошо воспринимал короткие временные интервалы двумя ушами. Вероятно, поэтому данные этого испытуемого S3 во второй серии измерений выявили чередование эффектов облегчения и ухудшения распознавания при увеличении уровня шума  $N$  (рис. 10). Одна локальная зона облегчения возникала при уровне шума в 40 дБ, а вторая — при уровне шума в 70 дБ ПС. Величина облегчения в этих зонах, вычисленная как разность между порогами распознавания, измеренными в тишине и в шуме, достигала примерно 9 и 15 дБ. Между зонами облегчения находилась зона ухудшения распознавания.

Чтобы проверить достоверность полученных данных, была проведена третья серия измерений эксперимента 3. В ней приняли участие двое испытуемых S5 и S6, уже имевшие опыт слухового распознавания импульсов, но импульсы и маскиры предъявляли только на левое ухо. Были измерены пороги маскировки и пороги распознавания изменений интенсивности импульсов (рис. 11). Длительность маскера была равна 500 мс, задержка импульса относительно конца маскера — 50 мс. Амплитуда стандартного импульса, также как и в первой серии, составляла 20 дБ ПС. Уровни маскеров менялись в диапазоне 5–65 дБ ПС.

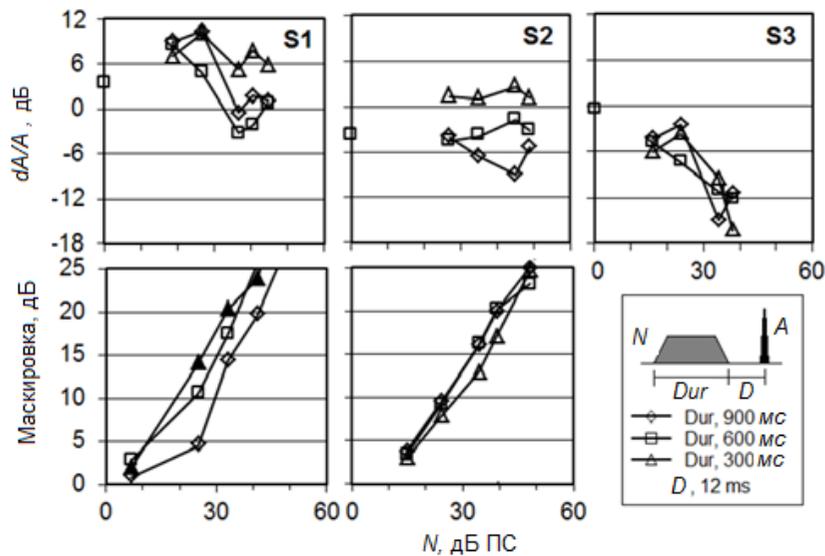


Рис. 9: Индивидуальные пороги распознавания изменений интенсивности импульсов с уровнем в 20 дБ ПС, предъявляемых после маскеров, (вверху) и пороги маскировки (внизу). Параметры: испытуемые, схема эксперимента, длительность маскеров  $Dur$ , мс и задержка  $D$ , 12 мс. Абсцисс: уровень маскиера  $N$  в дБ ПС; ординат: пороги маскировки и пороги распознавания в дБ; точки на оси ординат — пороги распознавания в тишине

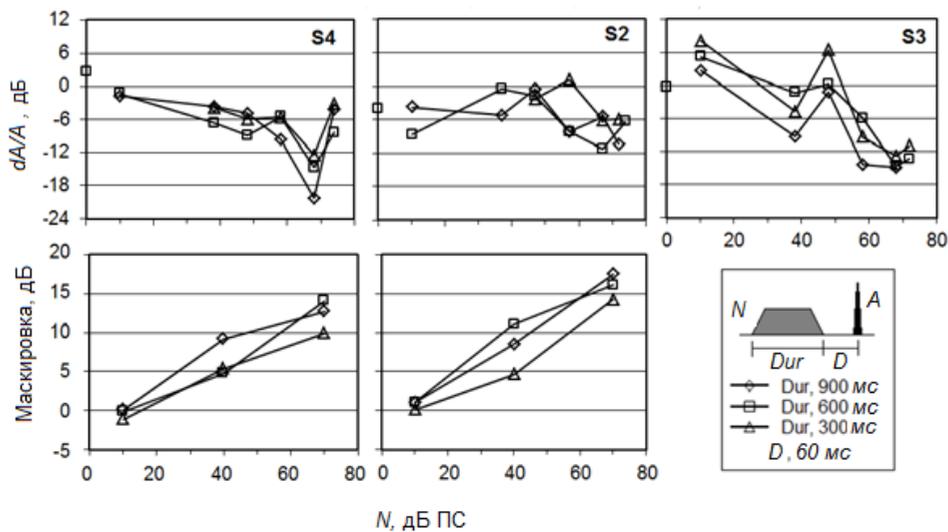


Рис. 10: То же, что на рис.9. Задержка  $D$  равна 60 мс

Как следует из рис. 11, с ростом уровня маскиера  $N$  пороги маскировки возрастали, а пороги распознавания немонотонно уменьшались. Каждая из кривых распознавания имела по два локальных минимума. У испытуемого S5 минимумы возникали при уровнях шума 25 и 40 дБ ПС, величина облегчения (или разность между порогами распознавания, измеренными в тишине и шуме) достигала примерно 4 и 8 дБ, а пороги маскировки составляли 3 и 9 дБ. У испытуемого S6 минимумы возникали при уровнях шума 20 и 45 дБ ПС, величина облегчения достигала 7 и 8 дБ, пороги маскировки составляли 0 и 12 дБ.

Таким образом, вторая и третья серии измерений выявили чередование зон облегчения и ухудшения распознавания при увеличении  $N$ . Чередование обнаружено у одного (S3) испытуемого, который прослушивали звуки двумя ушами (рис. 10), и у двух испытуемых (S5 и S6), которые прослушивали звуки левым ухом (рис. 11). Согласно словесным отчетам, при распознавании импульсов в шуме испытуемые сравнивали между собой звуки типа «шшш...чик» и «шшш...щик», но, несмотря на это результаты экспериментов (рис. 10 и 11) указывали на разные причины, вызывающие облегчение распознавания импульсов в шумах

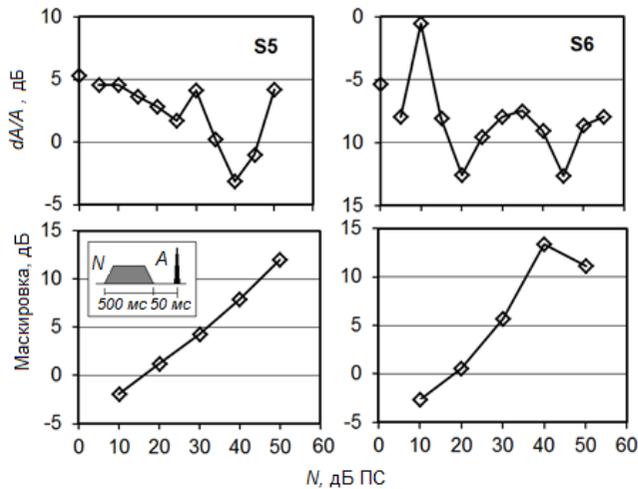


Рис. 11: То же, что на рис.9. Задержка  $D$  равна 50 мс

разных уровней. Вместе с этим причины ухудшения распознавание импульсов, которые предъявляли в тишине (рис. 7) и при маскировке (рис. 10 и 11), также были явно разными.

Полученные результаты объясняют данные модельного эксперимента 3 (п.1.3.3). Ухудшение распознавания изменений интенсивности импульсов, предъявляемых в тишине (рис. 7), могло быть вызвано ухудшением кодирования изменений интенсивности ( $dINT = 0$ ) импульсов ансамблем волокон, отсутствием адаптации волокон, компенсирующей ухудшение (п.2.3.1). Облегчение распознавания импульсов, предъявляемых вместе с или после маскеров высоких уровней (рис. 8, 9 и 10), было следствием вызванной шумом адаптации, улучшающей кодирование изменений интенсивности импульсов числом возбужденных волокон (п. 1.3.2 и 1.3.3).

Облегчению распознавания импульсов, предъявляемых после маскеров низких уровней (рис.10 и 11), по-видимому, способствовало изменение способа кодирования импульса при изменении его интенсивности и улучшение условий обнаружения импульса внутри реакции ансамбля, вызванной комплексом (п. 1.3.3). Ухудшение распознавания импульсов, предъявляемых после маскеров средних уровней (рис. 10 и 11), мы связываем с отсутствием условий для кодирования изменений интенсивности импульсов числом возбужденных волокон, с ухудшением обнаружения импульса внутри реакции ансамбля, вызванной комплексом, с появлением на периферии основ для некоторого признака комплекса (например, периодичности), мешающего распознаванию импульсов (п. 1.3.3).

Выявленные свойства периферического кодирования позволяют непротворечно объяснить обнаруженные нами эффекты слухового распознавания изменений интенсивности импульсов, предъявляемые в тишине и различных условиях маскировки. Мы полагаем, что полученные данные можно использовать для объясне-

ния эффектов облегчения распознавания, найденных в иных экспериментальных условиях [39–45]. В цитированных работах, как правило, были использованы тональные импульсы (длительностью 25 мс) и короткие шумовые маскеры (длительностью 100 мс), задержки между импульсом и маскером достигали 100 мс. Авторы работ оценивали эффект облегчения, сравнивая пороги распознавания, полученные в двух случаях. В одном случае импульсы предъявляли после шумового маскера, в другом — после шумового маскера предъявляли аддитивную смесь импульса и дополнительного отрезка шума. Причины, лежащие в основе эффекта облегчения, авторы искали в особенностях центральной обработки. Мы не умаляем роль центральной обработки в формировании субъективных качеств звуков, участвующих в распознавании. Однако мы исходим из того, что слуховой нерв является единственным каналом для передачи информации в мозг, и что для восполнения периферических потерь какой-то части информации центральная обработка использует оставшуюся часть. Поэтому ухудшение распознавания тональных импульсов, предъявляемых после шумовых маскеров, могло быть вызвано: (1) ухудшением кодирования изменений интенсивности импульсов числом возбужденных волокон, (2) ухудшением обнаружения импульса внутри реакции ансамбля, вызванной комплексом, (3) появлением дополнительного мешающего распознаванию субъективного признака (например, такого как периодическая структура звукового комплекса). Согласно нашим данным [24, 25], преобразование рецепторных потенциалов в последовательность спайков волокон слухового нерва участвует в слуховом анализе модуляций (периодичности) амплитудно-модулированных сигналов. При предъявлении более сложного звукового комплекса «шумовой маскер-аддитивная смесь импульса и отрезка шума» облегчению распознавания помогли десинхронизация возникшей на периферии периодичности (за счет сложения импульса с дополнительным шумом) и появление условий для кодирования изменений интенсивности импульсов числом возбужденных волокон.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявленные в данной работе эффекты слухового облегчения распознавания изменений интенсивности импульсных звуков, предъявляемых одновременно или после шумовых маскеров, а также периферические механизмы, лежащие в основе распознавания, поддерживают гипотезу о том, что временное кодирование гласных может способствовать кодированию и восприятию согласных.

Автор выражает благодарность Вадиму Николаевичу Теплеву за помощь в проведении экспериментов и участие в них.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 10-04-00158 и 14-04-00155)

- [1] Чистович Л.А., Венцов А.В., Ганстрем М.П., Жуков С.Я., Жукова М.Г., Карнитская Э.Г., Кожевников В.А., Лисенко Д.М., Людлинская В.В., Мушников В.Н., и др. Физиология речи. Восприятие речи человеком. (Ленинград: Наука, 1976).
- [2] Fastl H., Zwicker E. Psychoacoustics: facts and models (3rd ed.). (Berlin: Springer, 2006).
- [3] Houtsma A.J.M., Durlach N.I., Braida L.D. J. Acoust. Soc. Am. **68**, P. 807. (1980).
- [4] Schmidt R.F. Fundamentals of sensory physiology. (New York: Springer, 1981).
- [5] McGill W.J., Goldberg J.P.A. Percept. Psychophys. **4**, P. 105. (1968).
- [6] McGill W.J., Goldberg J.P. J. Acoust. Soc. Am. **44**, P. 576. (1968).
- [7] Viemeister N.F. In G.M. Edelman, W.E. Gall, W.M. Cowan (Eds.) Auditory function: neurobiological bases of hearing. P. 213. (New York: Wiley, 1988).
- [8] Avakyan, R.V., Radionova, E.A. Soviet physics – Acoustics. **8**, P. 320. (1963).
- [9] Raab D.H., Taub H.B. J. Acoust. Soc. Am. **46**, P. 965. (1969).
- [10] Van Schijndel N.H., Houtgast T., Festen J.M. J. Acoust. Soc. Am. **105**, P. 3425. (1999).
- [11] Baer T., Moore B.C.J., Glasberg B.R. J. Acoust. Soc. Am. **106**, P. 1907. (1999).
- [12] Nizami L., Reimer J.F., Jesteadt W. J. Acoust. Soc. Am. **110**, P. 2505. (2001).
- [13] Римская-Корсакова Л.К. Сенсорные системы. **21**, С. 286. (2007).
- [14] Somjen G.G. Sensory coding in the mammalian nervous system. (New York: Plenum Press, 1975).
- [15] Young E. In T.D. Rossing (Ed.) Springer handbook of acoustics. Part D/12, P. 429. (Berlin: Springer, 2007).
- [16] Wever E.G. Theory of hearing. (New York: Dover Press, 1949).
- [17] Kiang N., Watanabe T., Thomas E., Clark L. Discharge patterns of single fibers in cat's auditory nerve. Research monograph 35. (Cambridge, MA, MIT Press, 1965).
- [18] Green N.P.O., Stout G.M., Taylor D.J. In R. Soper (Ed.) Biological Science 1 and 2: v. 1&2. (Cambridge: Cambridge University, 1987).
- [19] Robles L., Ruggero M.A. Physiological Reviews. **81**, P. 1305. (2001).
- [20] Copper N.P. In S.P. Bacon, R.R. Fay, A.N. Popper (Eds.) Compression: from cochlea to cochlear implants. (New York: Springer, 2004).
- [21] Римская-Корсакова Л.К. Сенсорные системы. **23**, С. 106. (2009).
- [22] Римская-Корсакова Л.К. Сенсорные системы. **25**, С. 305. (2011).
- [23] Римская-Корсакова Л.К., Дудровский Н.А. Сенсорные системы. **4**, С. 76. (1990).
- [24] Дудровский Н.А. Римская-Корсакова Л.К. Акуст. Журн. **43**, С. 421. (1997).
- [25] Дудровский Н.А. Римская-Корсакова Л.К. Акуст. Журн. **44**, С. 173. (1998).
- [26] Rimskaya-Korsakova L.K., Telepnev V.N., Dubrovksy N.A. Neuroscience and Behavioral Physiology. **35**, P. 71. (2005).
- [27] Римская-Корсакова Л.К., Дудровский Н.А. Акуст. Журн. **52**, С. 446. (2006).
- [28] Римская-Корсакова Л.К., Бибииков Н.Г. Труды XVIII Сессии Российского Акустического общества. **3**, С. 593. (Москва: ГЕОС, 2006).
- [29] Joris P.X., Yin T.C.T. J. Acoust. Soc. Am. **91**, P. 215. (1992).
- [30] Liberman M.C. J. Acoust. Soc. Am. **63**, P. 442. (1978).
- [31] Sachs M.B., Abbas P.J. J. Acoust. Soc. Am. **56**, P. 1835. (1974).
- [32] Frisina R.D. Hearing Research. **158**, P. 1. (2001).
- [33] Winter I. M., Robertson D., Yates G.K. Hearing Research. **45**, P. 202. (1990).
- [34] Yates G.K., Manley G.A., Koppl C. J. Acoust. Soc. Am. **107**, P. 2143. (2000).
- [35] Yates G.K., Winter I.M., Robertson D. Hearing Research. **45**, P. 203. (1990).
- [36] Zeng F-G., Turner C.W., Relkin E.M. Hearing Research **55**, P. 223. (1991).
- [37] Moore B. C. J. An Introduction to the Psychology of Hearing. 4th edn. (London: Academic Press, 1997).
- [38] Levitt H. J. Acoust. Soc. Am. **49**, P. 467. (1979).
- [39] Carlyon R.P., Beveridge, H.A. J. Acoust. Soc. Am. **93**, P. 2886. (1993).
- [40] Carlyon R.P., Moore B.C. J. Acoust. Soc. Am. **76**, P. 1369. (1984).
- [41] Oberfeld D. Acoust. Soc. Am. **123**, P. 1571. (2008).
- [42] Pienkowski M., Hagerman B. Hearing Research. **253**, P. 107. (2009).
- [43] Plack C.J., Carlyon R.P., Viemeister N.F. J. Acoust. Soc. Am. **97**, P. 1141. (1995).
- [44] Plack C.J., Viemeister N.F. J. Acoust. Soc. Am. **92**, P. 1902. (1992).
- [45] Zeng F-G. J. Acoust. Soc. Am. **103**, P. 2021. (1998).

## Peripheral basis of auditory discrimination of changes in the intensity of pulsed sounds presented in silence and after noise exposure

L. K. Rimskaya–Korsakova

N.N. Andreev Acoustics Institute, 4 Shvernika St. 117036 Moscow, Russia

E-mail: lkrk@mail.ru

Causes of deterioration and facilitation of discrimination of changes in the intensity of short high-frequency sounds (pulses) presented in silence, with noise, and after noise exposure were analysed by comparing the results of simulation and psychoacoustic experiments. In the simulation experiments we studied the characteristics of peripheral coding of changes in the intensity of pulses;

searched for the conditions when the response of the ensemble can store information about the amplitude-temporal structure (conditions for the implementation of the volley principle); and analysed the statistical characteristics of responses of the ensemble of auditory nerve fibres (ANF) to pulse and composite sound containing long noise masker and pulse («noise–pulse complex»). Coding should be understood as the conversion from the analogous receptor potential of the inner hair cell to the sequence of action potentials (spikes) generated by the ensemble of ANFs. Simulation experiments have shown that changes in masker level may cause changes in the properties of peripheral coding of both pulse and noise–pulse complex. Auditory experiments have shown that an appreciable effect of discrimination improvement occurs when the average intensity pulse is presented along with or after the noise masker, the level of which is almost equivalent to the threshold of pulse masking. Furthermore if the delay between pulse and end of masker is 50–60 ms, increase in the masker level causes alternation of the effects of deterioration and facilitation of discrimination of changes in the pulse intensity. There are grounds for believing that the observed effects are based on the variability of properties of the peripheral coding of both pulses and noise–pulse complexes.

PACS: 43.64.Pg, 43.66.Dc 43.66.Fe, 43.66.Ba

Keywords: simulation, reaction of ensemble of auditory nerve fibers, simultaneous and forward masking of pulse by noise, facilitation of discrimination.

Received 13.11.2014.

#### **Сведения об авторе**

Римская–Корсакова Людмила Красармовна — канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник; тел.: (499) 125-90-51, (499) 655-21-18; e-mail: lkrk@mail.ru