

БИОФИЗИКА И МЕДИЦИНСКАЯ ФИЗИКА

**Некоторые особенности восприятия слуховыми нейронами
низкочастотных сигналов**

В. А. Гордиенко¹, Т. В. Гордиенко^{1a}, С. С. Задорожный^{1b}, С. А. Исайчев^{2c},
А. В. Учаев², М. А. Амосов¹

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет,
кафедра акустики. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, факультет психологии,
кафедра психофизиологии. Россия, 125009, Москва, ул. Моховая, д. 11, стр. 9.

E-mail: ^atan-gor@mail.ru, ^bzss@mail.ru, ^cisaychev@mail.ru

Статья поступила 04.09.2013, подписана в печать 02.12.2013.

Рассмотрены некоторые особенности восприятия слуховыми нейронами человека инфразвуковых колебаний, генерируемых изменением частоты и громкости звукослышимого диапазона. Показано, что слуховые нейроны реагируют на громкостную огибающую, выделяя соответствующие инфразвуковые частоты для последующей их обработки. Данный механизм возможен, если ухо работает в нелинейном режиме, производя детектирование с последующим временным усреднением не менее 40–50 мс. При совпадении частоты звукового кода с каким-либо ритмом головного мозга может возникнуть резонанс, увеличивающий амплитуду соответствующего ритма.

Ключевые слова: инфразвук, восприятие слуховыми нейронами человека инфразвука, навязанные ритмы, энцефалограмма, фонема, альфа-ритм, дельта-ритм.

УДК: 534.7; 534:612.014.45: 534.3: 159.95. PACS: 43.80.Gx, 43.80.Jz, 87.50.Kk, 87.19.Dd.

Введение

В научной и научно-популярной литературе сложился стереотип, что в результате длительной адаптации к своему образу жизни человек сформировал для себя оптимальное специфическое распределение информативности своих органов чувств, когда от 80 до 90% информации дает зрение, а оставшиеся 10–20% — слух и остальные органы чувств [1]. На самом деле это очень поверхностное суждение.

В последнее время отношение к взаимодействию акустических сигналов и человека стало меняться не только у специалистов, но и у музыкантов, композиторов и др. [2, 3]. Слух имеет существенно большее значение, чем зрение. При этом речь идет не только о частотах слышимого частотного диапазона (от 16–20 Гц до 15–20 кГц), но и частотах, не воспринимаемых слуховыми органами человека. Особенно выделяют инфразвуковые частоты, на которые приходится ряд ритмов работы головного мозга (дельта-, альфа-, бета- и др. ритмы). Именно к этому диапазону возник возрастающий интерес при разработке так называемого «несмертельного» акустического оружия [1]. Особую популярность приобрели методы использования двух близких относительно высоких частот слышимого или ультразвукового диапазона. Например, против протестующих в Северной Ирландии применялся «вопящий ящик» с частотами 16 000 и 16 002 Гц, при слухении которых за счет биений возникали инфразвуковые колебания на разностной частоте 2 Гц, вызывающие, по утверждению испытателей [1], невыносимые ощущения.

Однако, несмотря на активные исследования в области акустики, применительно к вопросам регистрации акустических сигналов органами слуха остается

достаточно много нерешенных проблем, а иногда даже противоречивых трактовок работы соответствующих систем организма, обеспечивающих «слуховое» восприятие акустических сигналов.

Например, в упомянутой выше обзорной публикации [1] отмечается, что большинство специалистов склоняются к точке зрения, что воздействие на организм частот инфразвукового диапазона происходит косвенно — через возбуждение сигналов в нервных клетках, не являющихся слуховыми.

Вместе с тем данные наблюдений и анализ публикаций показывают, что такую трактовку вряд ли следует признать правильной. Есть основания полагать, что только около 10–20% слуховых нейронов реагируют на частоту звучания. Остальные реагируют либо на изменение громкости, либо на изменение частоты, т. е. вибрации голоса или музыкального инструмента. В работах [4–7] экспериментально показано, что именно слуховые нейроны могут достаточно хорошо выделять даже слабые изменения громкости звуков слышимого диапазона, происходящие в области частот ниже 50 Гц, посылая соответствующие сигналы для последующей обработки. На рис. 1 в качестве иллюстрации приведен сводный график возможностей регистрации модулированных по амплитуде сигналов по данным этих работ.

Исходя из вышеизложенного, мы предприняли попытку экспериментально проверить как способности слуховых органов человека выделять инфразвуковые составляющие (в том числе не обязательно высоких уровней), так и влияние этих составляющих на его психофизиологическое состояние.

Настоящая статья написана на основании полученных нами предварительных данных исследований особенностей регистрации акустических сигналов

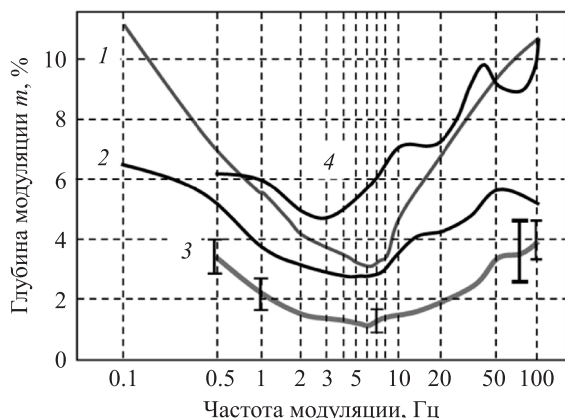


Рис. 1. Пороговые уровни ощущения модуляции ухом человека: 1 — нетренированные испытуемые, 2 — они же после тренировки, 3 — музыканты, 4 — данные [7] для модулированного шума. Частота тона 1000 Гц

слуховым органом человека и анализа многочисленных публикаций на эту тему в различных источниках [8]. Мы расцениваем ее как дискуссионную, но имеющую право быть опубликованной. Некоторые высказанные в ней гипотезы нельзя считать установленными однозначно. Вместе с тем надеемся, что публикация статьи послужит поводом для дальнейших дискуссий и исследований в этом направлении.

1. Исходные посылки. Модель восприятия инфразвука слуховыми органами человека

Восприятие звуков — это процесс приема и переработки слуховым анализатором акустических сигналов разной частоты и громкости.

Очевидно, что при генерировании в слышимом диапазоне двух близких частот сигнал в области инфразвука не появляется. Это иллюстрируют данные рис. 2, на котором показан спектр сигнала, представляющего сумму частот 300 и 310 Гц (рис. 2, а), и фрагмент его спектра в области инфразвуковых частот (рис. 2, б). Для выделения инфразвуковой составляющей требуется нелинейная обработка сигнала, включающая как минимум детектирование с последующим временным усреднением сигнала, причем время усреднения должно быть порядка 50 мс или больше [9]. В результате формируется громкостная огибающая суммарного сигнала спектра и в инфразвуковом диапазоне частот отчетливо выделяется разностная частота (рис. 2, в).

Для объяснения возможности регистрации слуховыми нейронами инфразвуковых составляющих можно предложить следующую гипотезу. В слуховом органе человека должны существовать нейроны, регистрирующие сигнал «стробированно», т.е. в виде последовательности неких кодов. Общий анализ сигнала проводится на интервале большем, чем длительность кода. Далее следует полагать, что частотно-пороговые кривые разных слуховых нейронов не совпадают (что в принципе неоднократно описывалось в литературе по музыкальной акустике), а в совокупности перекрывают весь частотный и громкостной диапазон слышимых звуков, обеспечивая их полноценное восприятие.

В результате обработки последовательности кодов формируется амплитудная огибающая, суммарный анализ которой позволяет нейронам выделить инфразвуковую частоту и послать соответствующие сигналы для последующей обработки в головной мозг. При совпадении частоты звукового кода с каким-либо ритмом головного мозга может возникнуть резонанс, увеличивающий амплитуду соответствующего ритма [10–12].

Содержание отдельного звукового кода в пределах ~ 50 мс может быть любым. Минимальный период этого сигнала не может быть меньше 100 мс и вряд ли будет больше 3 с (длительность эхоической памяти). Таким образом, слуховые органы работают в нелинейном режиме и представляют собой систему, похожую на квантовую.

Фактически речь идет о распознавании нейронами фронтов и их комбинаций длительностью от 20 до 300–500 мс. Указанное время обработки информации совпадает с экспериментально установленными комбинациями, а также с комбинациями, полученными в результате моделирования различных механизмов выделения модулированных сигналов, описанных в работе [7]. В частности, в работе [13] выяснены условия, при которых совокупность высокочастотных волокон слухового нерва, обладающих стохастическим характером ответа, способна осуществить анализ временных интервалов между импульсами. Время накопления ощущения громкости обычно порядка 100 мс (может колебаться в пределах от 50 до 200 мс) и определяется тем, существуют или нет в полосе накопления звукового сигнала, вызывающего соответствующие слуховые объекты, фрагменты с одинаковой временной структурой. Речь идет о распознавании низких и инфранизких частот

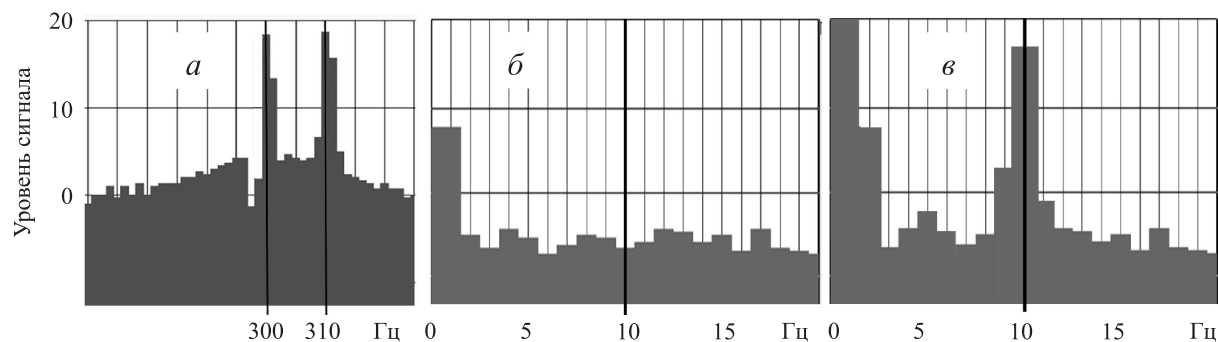


Рис. 2. Спектры сигнала, представляющего сумму частот 300 и 310 Гц: исходный сигнал (а), фрагмент спектра исходного сигнала в области инфразвуковых частот (б), спектр громкостной огибающей в той же области инфразвуковых частот (в)

усредненной огибающей громкости сигнала в диапазоне частот 2–50 Гц.

На основе изложенного выше можно предположить, что основным механизмом восприятия звуков в инфразвуковом диапазоне является выделение динамического «рисунка», а именно «громкостной» огибающей сигнала. В нашем случае временной интервал усреднения должен определяться теми свойствами слуховой системы, которые пока еще не изучались [13, 14].

Для того чтобы убедиться, что эти частоты действительно воспринимаются слуховыми органами человека, на базе кафедры психофизиологии психологического факультета МГУ была проведена серия экспериментов.

2. Методика эксперимента

Механизмы косвенного воздействия звука на сегодняшний день практически не изучены. В настоящей работе под косвенным воздействием мы будем понимать регистрацию слуховыми нейронами человека громкостной огибающей в области инфразвуковых частот, формально не воспринимаемых слуховыми органами человека. Частично этим механизмам и посвящено наше исследование. В этом разделе мы остановимся на выяснении частот, которые преимущественно отвечают за психофизиологическое состояние организма человека. Одним из наиболее эффективных методов выявления такого состояния является регистрация электрических потенциалов, снимаемых с определенных точек головы, — так называемая электроэнцефалография [15].

Ниже описывается методика проведенных нами исследований.

Программное обеспечение и аппаратура. Сессы записи электроэнцефалограмм (ЭЭГ) выполнялись с помощью 21-канального цифрового электроэнцефалографа «Энцефалан». Регистрация ЭЭГ проводилась с поверхности головы трубчатыми электродами в соответствии с международной системой «10–20%». Схема регистрации монополярная: 19 скальповых, 2 референтных и 1 нейтральный ЭЭГ-электрод. Полоса пропускания фильтров от 0.16 до 30 Гц с режекторным фильтром 50 Гц. Одновременно регистрировалась окулограмма, миограмма и ряд вегетативных показателей (электрокардиограмма (ЭКГ), кожно-гальваническая реакция (КГР), фотоплетизмограмма (ФПГ), сигнал рекурсии дыхания (РД), частота сердечных сокращений (ЧСС)), позволяющих исключить из обрабатываемых объектов случайные реакции головного мозга на внешнее воздействие.

Стимульный материал. Звуки предъявлялись через стереонаушники. На первом этапе эксперимента испытуемым предъявлялась запись фрагмента тибетской музыки «Внутреннее исцеление». На рис. 3 представлена временная зависимость сигнала используемого фрагмента. Фрагмент начинается звуком колокола (рис. 3, а, участок А), далее в первой половине записи читается мантра (участок Б), во второй она сменяется пением (участок В). Особенность используемого фрагмента музыкального произведения состоит в том, что громкостная огибающая имеет инфранизкочастотную модуляцию, которая наиболее четко выражена в первой половине записи и составляет примерно 0.14–0.17 Гц. Затем в спектре громкости появляется достаточно

устойчивая частота около 0.75 Гц (рис. 3, б). Проведенный тонкий спектральный анализ второй половины сигнала показал, что в громкостном спектре огибающей появляются частоты 0.14–0.18 Гц (рис. 4), возникает частотная модуляция певческой форманты голоса певицы с частотами, близкими к альфа-ритму, которые плавно уменьшаются от 14 Гц в начале до примерно 9 Гц к концу музыкального фрагмента (рис. 3, б). Наблюдаются также достаточно устойчивые спектральные составляющие на частотах 24 и 25 Гц (рис. 3, з).

На втором этапе использовались стимульные послы с двумя частотами. Одна была фиксирована на частоте 300 Гц, вторая изменялась от 302 до 316 Гц, так что разностная частота варьировалась от 2 до 16 Гц. В настоящей работе обсуждаются результаты стимульного воздействия в интервале частот 8–11 Гц. Каждая разностная частота прослушивалась через стереонаушники дважды. В первом случае на левое и правое ухо частоты подавались отдельно (условно «стерео»), во втором — подавался одинаковый суммарный сигнал (условно «моно»). Длительность стимулов 400 мс, громкость 50–55 дБ.

Процедура. Испытуемый располагался сидя. Сначала записывались две фоновые ЭЭГ — с закрытыми и открытыми глазами по 3 мин каждая. Далее проводился спектральный анализ фоновых ЭЭГ для выделения доминирующей частоты альфа-ритма, после чего испытуемому предъявлялись звуки. На первом этапе — прослушивание музыкального фрагмента, на втором — стимульные послы с двумя частотами (7 серий), во время которых испытуемый находился с закрытыми глазами. Предъявляемые стимулы: белый шум, звук с частотой 8 Гц, звук на доминирующей частоте альфа-ритма и звук с частотой 11 Гц. Каждый звук предъявлялся 120 раз с интервалом 800–950 мс (для задания девиации). Между каждыми сериями был перерыв 4 мин.

Испытуемые. На первом этапе эксперимента участвовало 8 человек, на втором — 4, обоих полов, возраст — 20–23 года.

3. Результаты эксперимента

Среди испытуемых первого этапа двое по предварительно снятым ЭЭГ имели ярко выраженный альфа-ритм достаточно большой интенсивности. У третьего испытуемого, наоборот, в фоновом режиме альфа-ритм прослушивался плохо, особенно в височных точках отведения. У остальных испытуемых уровень фонового альфа-ритма был близок к стандартному.

В результате прослушивания фрагменты музыки отразились на ЭЭГ принципиально различным образом. У первых двух испытуемых во время прослушивания музыкального фрагмента активность мозга увеличилась. Однако после прослушивания никаких заметных изменений в отношении ритмов головного мозга замечено не было. Для третьего испытуемого наблюдалась принципиально иная ситуация: при общем повышении активности работы мозга начиная с участка В наблюдался рост интенсивности альфа-ритма. Эти изменения иллюстрируются данными рис. 5, а, б. В некоторые моменты во время вибрации голоса певицы с частотой огибающей, близкой к частоте огибающей фонового значе-

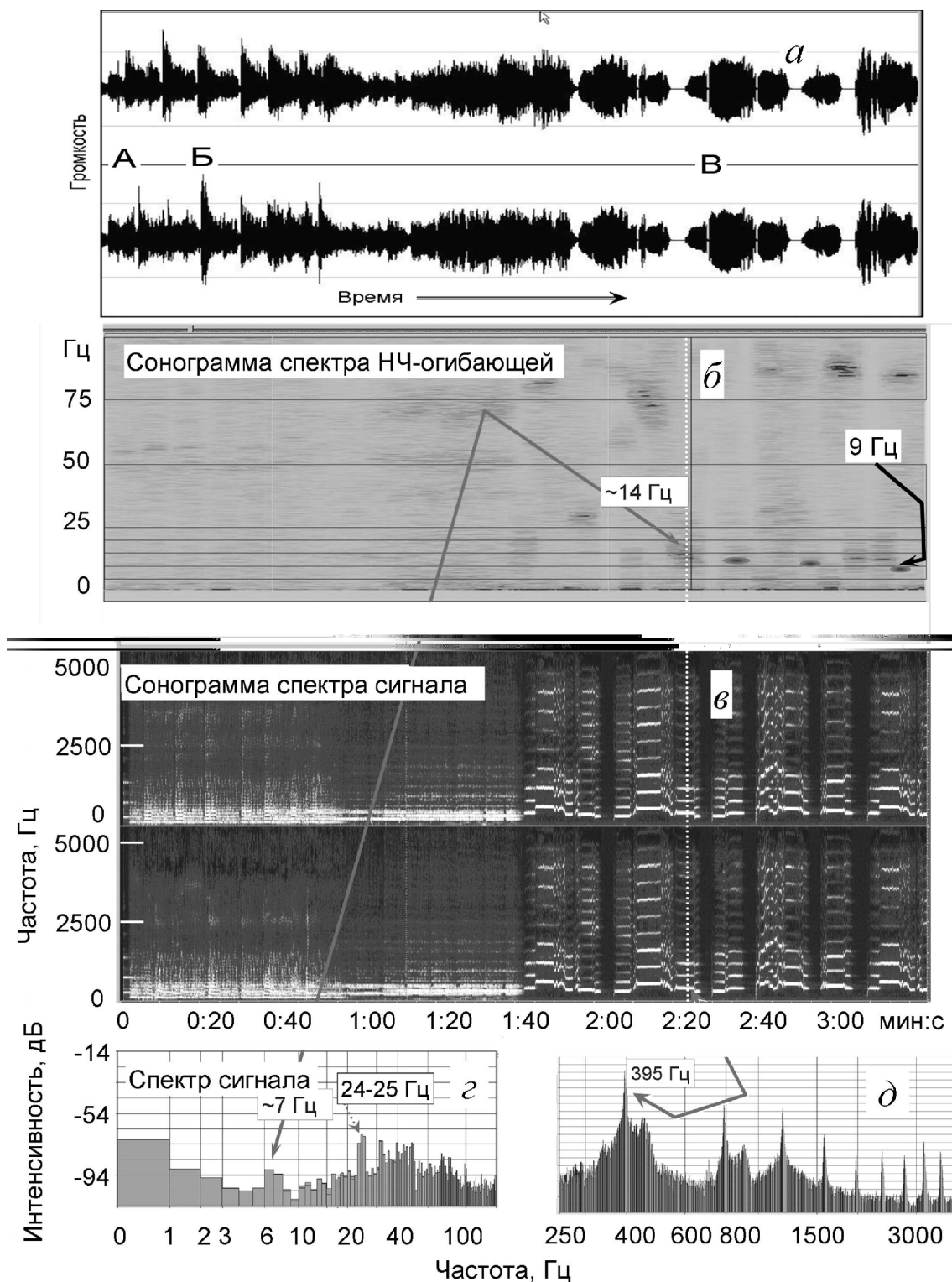


Рис. 3. Временная зависимость сигнала используемого фрагмента: исходный сигнал (а); сонограмма спектра огибающей исходного сигнала при усреднении 50 мс (б); сонограмма спектра исходного сигнала (в); фрагмент спектра исходного сигнала, соответствующий началу частотных вибраций голоса певицы (г); фрагмент спектра исходного сигнала в окрестности певческой форманты (д)

ния альфа-ритма, наблюдался наведенный альфа-ритм (рис. 5, в), который сохранился и после прекращения прослушивания музыки. Характерно, что повторное снятие ЭЭГ в фоновом режиме через несколько дней показало практически неизменный уровень наведенного альфа-ритма.

У остальных испытуемых в процессе прослушивания музыкального фрагмента соотношение между дельта- и альфа-ритмами изменилось в сторону увеличения интенсивности альфа-ритма, хотя и незначительно (5–10%). Таким образом, используемый музыкальный фрагмент способствовал изменению соотношения

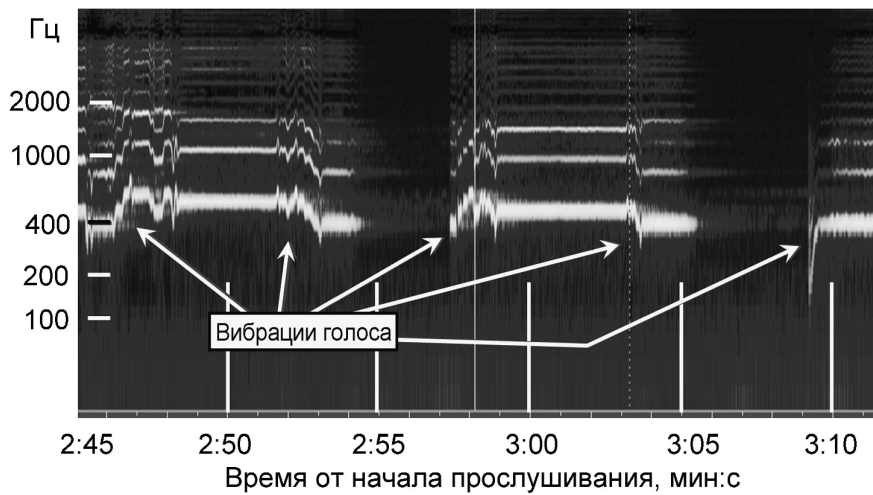


Рис. 4. Фрагмент сонограммы спектра сигнала с выделенными моментами частотной вибрации голоса (интервал между вибрациями — около 6 с, т. е. 0.14–0.18 Гц)

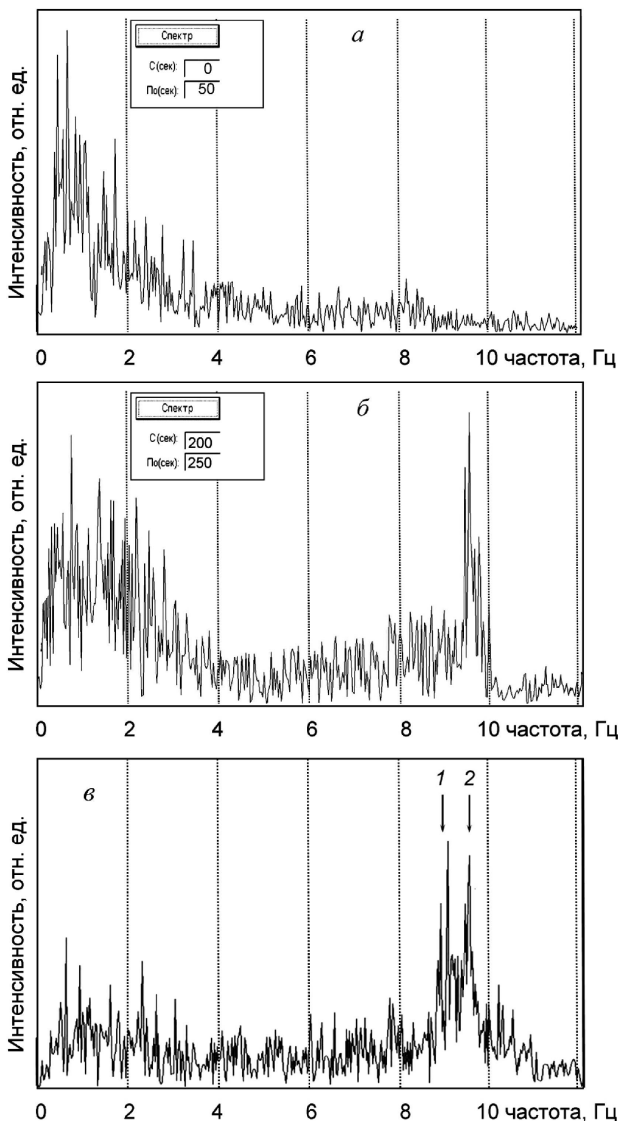


Рис. 5. Изменение соотношений между альфа- и дельта-ритмом у третьего испытуемого: а — первые 50 с прослушивания; б — конец прослушивания; в — возникновение наведенного альфа-ритма (1 — наведенный альфа-ритм, 2 — фоновый альфа-ритм)

между дельта- и альфа-ритмами в сторону увеличения интенсивности последнего для испытуемых с пониженным его уровнем с последующим запоминанием эффекта.

С точки зрения психофизиологии такое поведение соотношения интенсивности вполне закономерно, если предположить, что данный музыкальный фрагмент способствует процедуре реабилитации, заключающейся в стимулировании амплитуды высокочастотных (7–25 Гц) составляющих ритмов головного мозга.

Отметим, что в работе [16], в которой проводилось исследование реакций мозга на инфразвуковое воздействие и также наблюдался эффект возникновения наведенного альфа-ритма (рис. 6), после прекращения стимульного воздействия эффект запоминания замечен не был. Мы полагаем, что различие реакций связано с различным механизмом возбуждения инфразвуковых частот. В работе [16] возбуждение осуществлялось узкополосными импульсными сигналами, в то время как в нашем случае наряду с частотами, близкими к альфа-ритму, присутствовал набор других перечисленных в разделе трех частот, который и способствовал эффекту запоминания. Данное объяснение вполне согласуется с результатами экспериментальных работ [7, 17], в которых была предпринята попытка выявления механизма запоминания внешних стимульных воздействий.

Для «запоминания» информации, содержащейся в частотах возбуждения, совпадающих с «высокочастотными» ритмами (выше дельта-ритма) работы головного мозга, по-видимому, должна быть сформирована соответствующая частота в области инфранизких частот дельта-ритма. Для альфа-ритма, по нашим данным, эта частота составляет примерно 0.14–0.17 Гц, которая может быть обеспечена, например, повторением генерируемой внешним звуковым источником «навязанной» частоты альфа-ритма с интервалом 5–7 с. Именно этот механизм реализовывался во второй половине использованного нами музыкального фрагмента.

Согласно данным литературных источников, примерно такие же частоты характерны и для механизма возникновения памяти по отношению к бета-ритму.

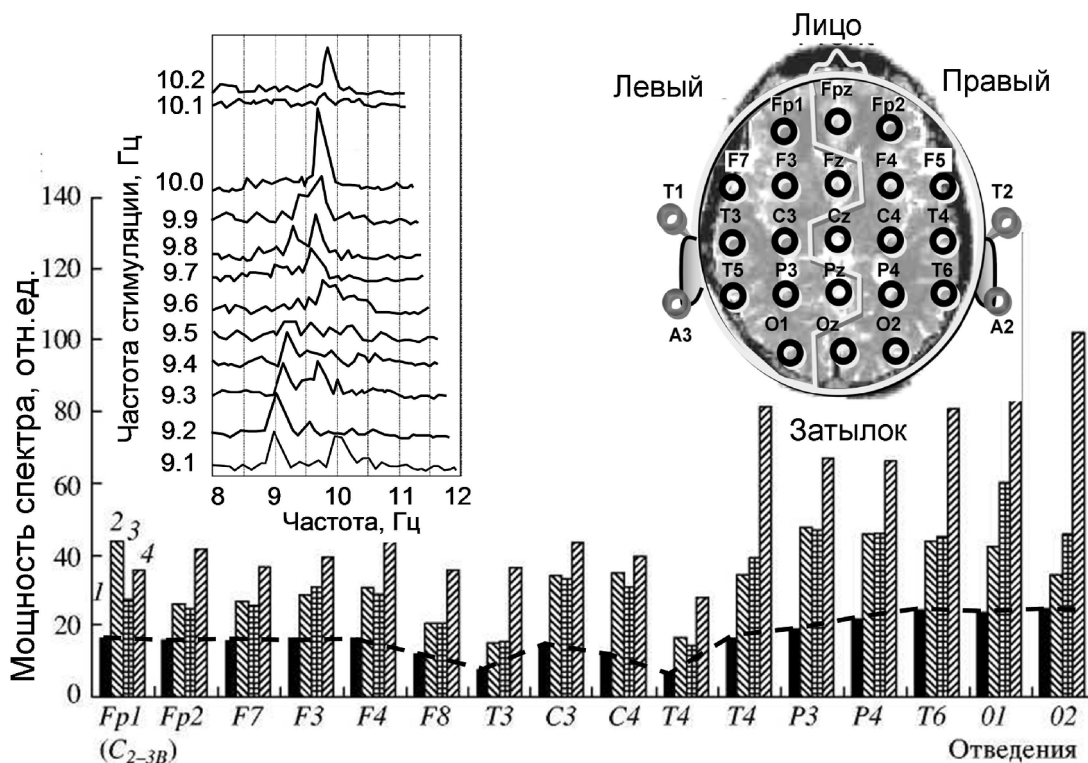


Рис. 6. Суммарное увеличение альфа-активности под влиянием ритмической стимуляции [10]. По горизонтали указаны регистрирующие электроды на скальпе (отведения): 1 — мощность альфа-ритма в фоновой записи, 2 — стимуляция звуком, 3 — тактильная стимуляция, 4 — зрительная стимуляция. На врезке слева — эффект навязанного ритма при стимуляции в диапазоне частот альфа-ритма

Так, например, в работе [17] изучалась динамика удержания следов памяти (процессов, ответственных за сохранение временных связей в коре головного мозга) при различных интервалах задержки. Наиболее значимые результаты получились при следующем режиме работы: периодичность повторения звукового стимула 6 с, включая 1 с до стимула, 1 с во время его предъявления и интервал задержки длительностью 4 с.

Кроме того, в этой и некоторых других работах этих же авторов была предпринята попытка понять механизм запоминания предъявленного стимула. Так, при наличии описанного выше режима стимуляции были выявлены и активированы генераторы во фронтальной (27 Гц), зрительной (15 Гц) и ассоциативной (35 Гц) коре совместно с мозжечком. При этом было также показано, что ожидание стимула запоминания активируется в промежутке времени около 100 мс, что хорошо согласуется с описанной нами выше гипотезой стробированного восприятия акустической информации.

При этом обязательно должны запускаться гамма-генераторы, вызывающие стремление памяти к получению условного рефлекса. Существует точка зрения [18, 19], согласно которой во время активного внимания к стимулу происходит слияние двух потоков информации: «bottom-up» и «top-down», представленное одновременной активацией частотно-селективных гамма-генераторов (электроэнцефалографических показателей активности локальных нейронных сетей) во фронтальной и модально-специфической слуховой коре, работающих на общей частоте и имеющих одинаковую фазовую привязку к стимулу.

Такое объединение сенсорных процессов с процессами памяти можно видеть не только во время сенсорного ответа, но и на стадии ожидания стимула (формирование условного рефлекса). Таким образом, электрическую активность мозга, предшествующую стимулу, которую обычно называют фоновой и рассматривают как шум, нельзя игнорировать. Она содержит информацию об эндогенных когнитивных процессах, которые в общем виде обозначают как контекст, который существенно влияет на принятие решения.

На втором этапе эксперимента по каждому испытуемому было получено 9 ЭЭГ — две фоновых, одна с предъявлением белого шума и 6 экспериментальных. Далее они обрабатывались методом спектрального анализа на основе дискретного преобразования Фурье (с помощью программно-методического обеспечения «Энцефалан»). Оценка спектров производилась по следующим параметрам: абсолютным значениям мощностей, относительным значениям мощностей, значениям доминирующих частот. Затем все полученные данные сравнивались.

На рис. 7 в качестве иллюстрации представлены результаты анализа изменения активности работы головного мозга (в том числе то, какие области изменяли свою активность в зависимости от предъявляемого стимульного воздействия) при предъявлении различных стимулов для одного из испытуемых. По вертикали на этом рисунке отложены частоты анализа, на которых контролировалась активность. Видно, что, несмотря на то что стимульный сигнал имел частоты, близкие к частотам альфа-ритмов головного мозга, изменение

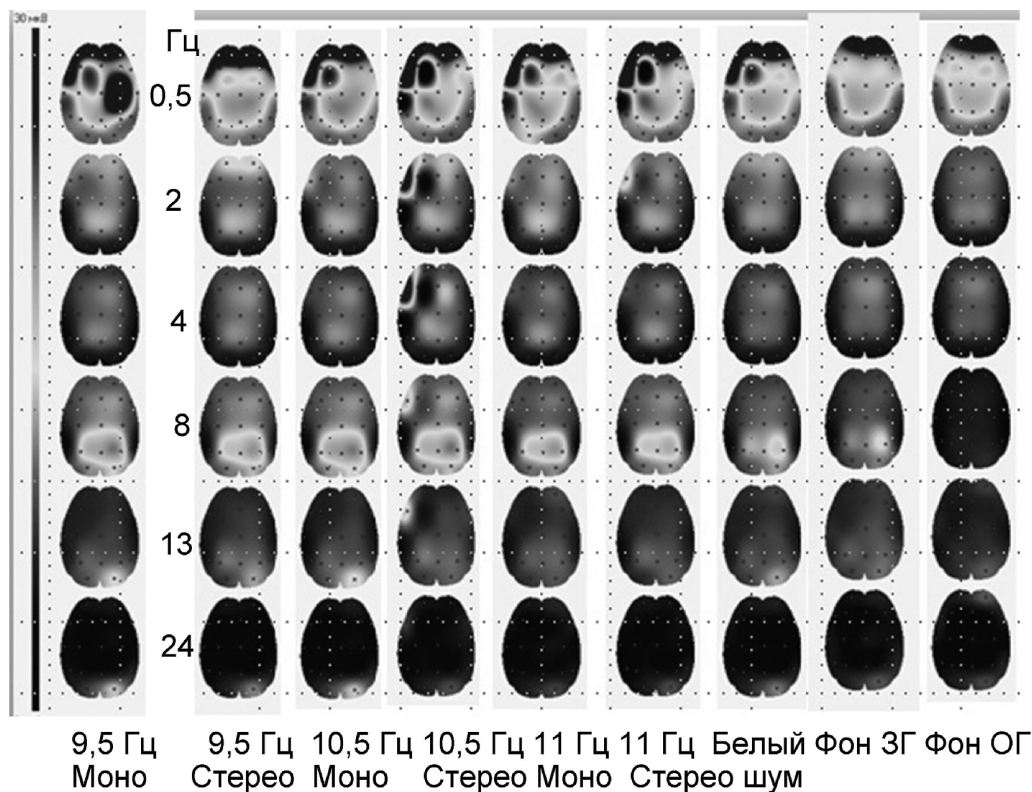


Рис. 7. Результаты анализа изменения активности работы головного мозга при предъявлении различных стимулов для одного из испытуемых. По вертикали отложены частоты анализа, на которых контролировалась активность

активности работы головного мозга наблюдалось и в области более низких частот, в частности в области дельта-ритма.

По абсолютным значениям мощностей было выявлено их повышение при предъявлении стимулов относительно фоновых показателей, но это прослеживалось не у всех испытуемых (у двух из четырех). По относительным значениям мощностей происходило заметное повышение. По показателям доминирующих частот было видно, что при стимуляции доминирующая частота сходна с фоновой. Примечательно, что все эти три показателя лишь слабо повышались при предъявлении белого шума, который использовался как контрольный стимул.

После прекращения стимульного воздействия эффект запоминания не наблюдался, что, судя по всему, как уже указывалось выше, связано с тем, что в качестве стимула использовались узкополосные тональные сигналы. Анализ вегетативных показателей не дал каких-либо заметных результатов. Все показатели, а именно ЧСС, КГР, ФПГ и РД, оставались на одном уровне с фоновыми. Отсюда можно сделать вывод, что испытуемые были примерно в одинаковом функциональном состоянии. Звуки не вызывали никаких эмоциональных реакций. Это подтверждается словами испытуемых.

Вместе с тем было выявлено, что при предъявлении «стерео»-стимулов имеет место несколько больший ответ мозга. Это выражается в большем значении относительных значений мощностей (рис. 8).

По абсолютному значению мощности повышение имело место, но преимущественно небольшое. Это

может быть связано с отсутствием патологий в генерации альфа-ритма у испытуемых. Однако одна из испытуемых, у которой были наибольшие показатели по абсолютным значениям мощностей, была на протяжении некоторого времени подвержена систематическим стрессовым воздействиям.

Сравнение относительных значений мощностей показало, что повышение активности мозга наблюдалось у всех испытуемых. Из этих результатов можно сделать вывод, что имеется отклик мозга на предъявления: наблюдается доминирование альфа-ритма во время функциональной пробы, но сама частота предъявляемого звука не навязывается. Близость значений для белого шума к фоновым значениям может говорить в пользу некоторой неслучайности полученных данных.

Оценку результатов затрудняет специфическая локализация и пространственная ориентация нейронов слуховой коры, которые располагаются в островковой доле. Регистрация их активности может быть зашумлена работой других нейронов при регистрации активности с помощью ЭЭГ.

4. О роли шестигерцевых составляющих в инфразвуковом спектре

Обращает внимание достаточно ярко выраженный максимум чувствительности слуховых нейронов к глубине модуляции звука в области 6 Гц. На наш взгляд, это не является случайным, особенно если обратить внимание на практически обязательное присутствие этих частот в спектрах речи и пения, которые отмечаются во многих работах. В качестве иллюстрации на рис. 9 приведен фрагмент спектров,

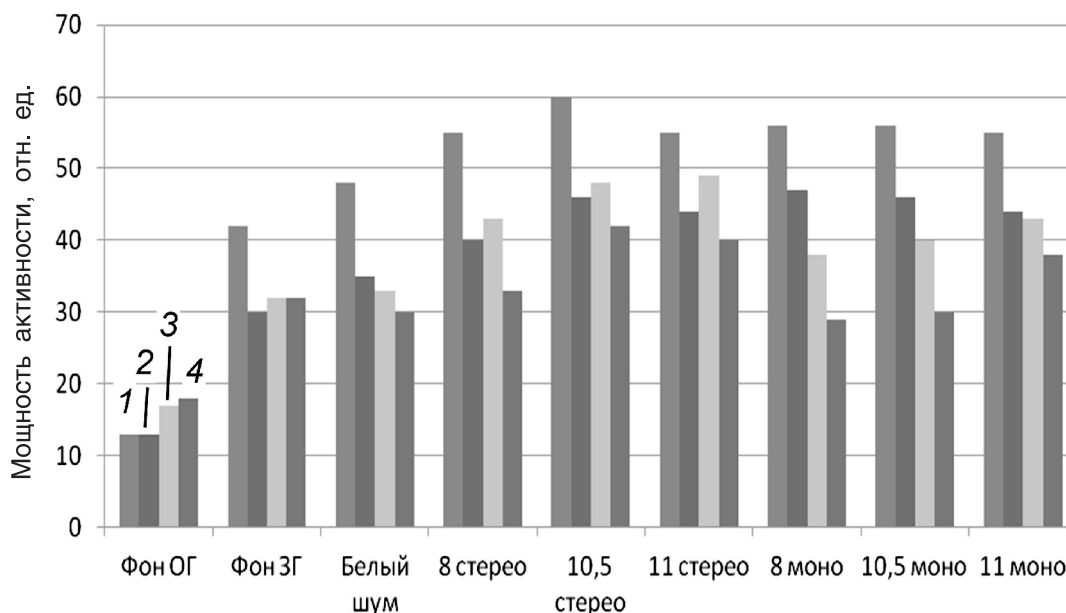


Рис. 8. Показатели одного из испытуемых по относительным значениям мощностей для 4 отведений: 1 — P4, 2 — P3, 3 — O1, 4 — O2

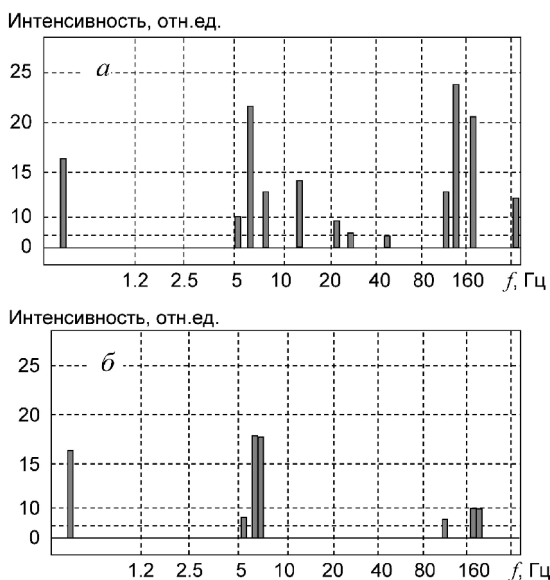


Рис. 9. Инфразвуки, генерируемые голосовым аппаратом человека в процессе речи и пения для двух случаев (по данным [13]): периодическое повторение слога «би-би-би» (а), пение гласной О на средней ноте (б)

при произнесении звука А, на котором отмечена эта периодичность.

Можно предположить, что формирование звуков при их произнесении человеком происходит не непрерывным образом, а также стробированно. Длительность такого строба лежит в пределах 150–250 мс. В таком случае можно объяснить наблюдаемый эффект выделения слуховыми органами человека речи одного из говорящих на фоне других разговоров, происходящих примерно с той же громкостью, а иногда и выше. Привязываясь к индивидуальной длительности стробов конкретно говорящего, головной мозг по возможности выделяет из всех звуков те, которые формируются внутри таких стробов.

Однако такое утверждение пока нуждается в дополнительной серьезной проверке.

Заключение

Из проведенного пилотного исследования видно, что имеется отклик мозга на стимуляцию, который отличается в экспериментальной и контрольной сериях. Отклик выражается через изменение соотношений относительных мощностей ритмов головного мозга. При этом альфа-ритм начинает доминировать над другими ритмами.

Также существенно, что во всех описываемых в работе случаях реакция осуществлялась через «косвенное» восприятие слуховыми нейронами сигналов на инфразвуковых частотах, как правило, соответствующих частотам «громкостной» огибающей звуковых колебаний, генерируемых в слышимом частотном диапазоне.

В рамках выполненной работы остается открытым следующий вопрос: одинаково ли проявляются «косвенное» воздействие на организм инфразвуковых частот, генерируемых за счет громкостной огибающей источниками, работающими в слышимом диапазоне частот, и

опубликованных в работе [20], на которых эти частоты достаточно хорошо выражены.

В связи с этим мы провели дополнительный анализ спектров огибающих, возникающих в речи при произнесении гласных звуков и основных фонем русского языка. В эксперименте участвовало 10 человек различного возраста и пола. Не останавливаясь подробно на всех деталях эксперимента, укажем лишь, что для всех испытуемых независимо от манеры произнесения звуков наблюдалась достаточно хорошо выраженная в спектре огибающей частота в области 6 Гц. На рис. 10 в качестве иллюстрации приведен пример среднестатистического сигнала и формы его огибающей

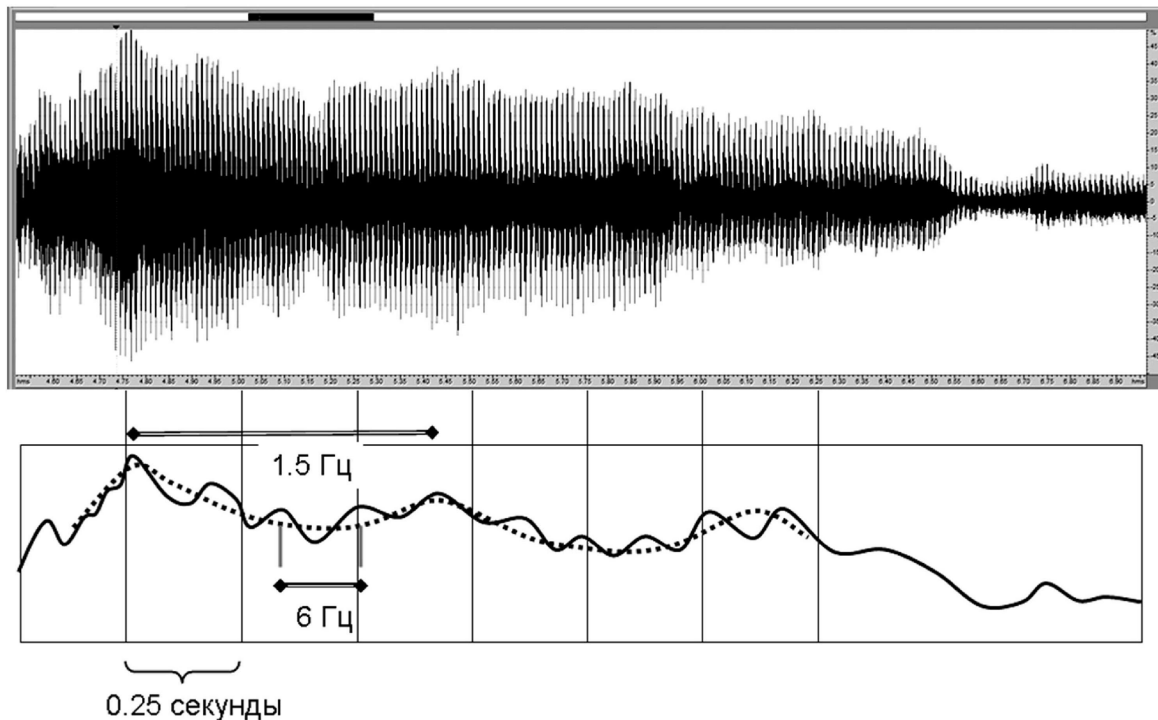


Рис. 10. Исходный сигнал при произнесении звука А и профиль его огибающей

непосредственное воздействие на организм колебаний, генерируемых источником инфразвука на частотах, совпадающих с ритмами головного мозга.

Список литературы

1. *Altmann J.* // Science and Global Security. 2002. **9**. P. 165.
2. *Морозов В.П.* Занимательная биоакустика. М., 1987. С. 150, 175.
3. *Гордиенко В.А.* Физические поля и безопасность жизнедеятельности. М., 2006.
4. *Морозов В.П., Черниговская Т.В.* // Акуст. журн. 1977. **XXIII**, № 1. С. 153.
5. *Бибииков Н.Г., Макеева И.П.* // Акуст. журн. 1989. **XXXV**, № 6. С. 1004.
6. *Бибииков Н.Г.* // Акуст. журн. 1988. **XXXIV**, № 2. С. 340.
7. *Дубровский Н.А., Тумаркина Л.И.* // Акуст. журн. 1967. **XIII**, № 1. С. 51.
8. *Гордиенко Т.В., Исайчев С.А., Амосов М.А.* // Ломоносовские чтения. 2013. С. 116.
9. *Гордиенко В.А.* Векторно-фазовые методы в акустике. М., 2007.
10. *Marsh J.T., Brown W.S., Smith J.C.* // Electroencephalography and clinical neurophysiology. 1975. **38**, N 2. P. 113.
11. *Арабаджи В.И.* // Биофизика. 1992. **37**, № 1. С. 150.
12. *Федотчев А.И.* // Физиология человека. 1997. **23**, № 4. С. 117.
13. *Римская-Корсакова Л.К.* // Акуст. журн. 1989. **XXXV**, № 5. С. 887.
14. *Бибииков Н.Г.* // Акуст. журн. 1978. **XXIV**, № 6. С. 816.
15. *Isaychev S., Chernorizov A., Korolev A.* // Psychology in Russia: State of the Art. Russian Psychological Society Moscow. 2012. **5**. P. 244.
16. *Исайчев С.А., Осипова Д.С., Коптелов Ю.М.* // Журн. высшей нервной деятельности. 2003. **53**, № 5. С. 577.
17. *Данилова Н.Н.* // Психология. Журнал Высшей школы экономики. 2009. **6**, № 1. С. 114.
18. *Цвикер Э., Фельдкеллер Р.* Ухо как приемник информации. М., 1971. С. 46.
19. *Buschman T.J., Miller E.K.* // Science. 2007. **315**, N 5820. С. 1860.
20. *Морозов В.П., Пуолокайнен П.А., Хохлов А.Д.* // Акуст. журн. 1972. **XVII**, № 1. С. 144.

Some features of sensing by cochlear neurons of low-frequency signals

V. A. Gordienko, T. V. Gordienko^{1,a}, S. S. Zadorozhny^{1,b}, S. A. Isaychev^{2,c}, A. V. Uchaev², M. A. Amosov¹

¹ Department of Acoustics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

² Department of Psychophysiology, Faculty of Psychology, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 125009, Russia.

E-mail: ^a tan-gor@mail.ru, ^b zss@mail.ru, ^c isaychev@mail.ru.

Some features of sensing by human cochlear neurons of the infrasound vibrations generated by a change in frequency and volume of the audible range are discussed. It has been shown that auditory neurons respond to a volume envelope that selects corresponding infrasonic frequencies for their further processing. This mechanism

is possible if the ear operates nonlinearly performing detection with further time averaging of no less than over 40–50 ms. If the frequency of the sound code coincides with any rhythm of the brain, resonance may occur, increasing the amplitude of the corresponding rhythm.

Keywords: infrasound, sensing by human auditory neurons of infrasound, imposed rhythms, EEG, phoneme, alpha rhythm, delta rhythm.

PACS: 43.80.Gx, 43.80.Jz, 87.50.Kk, 87.19.Dd.

Received 4 September 2013.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 2(2014).

Сведения об авторах

1. Гордиенко Валерий Александрович — доктор физ.-мат.наук, профессор, вед. науч. сотрудник.
2. Гордиенко Татьяна Валерьевна — канд. физ.-мат.наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: tan-gor@mail.ru.
3. Задорожный Сергей Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, ст. преподаватель; e-mail: zss@mail.ru.
4. Исaiчев Сергей Александрович — канд. психол. наук, доцент; e-mail: isaychev@mail.ru.
5. Учаев Андрей Владимирович — студент; e-mail: andrey_solncevo@rambler.ru.
6. Амосов Марио Александрович — студент; e-mail: dlupus@yandex.ru.