

Решил перевести эту древнюю статью (*Oster, G. (1973). Auditory beats in the brain. Scientific American, 229, pp. 94-102*) ввиду её фундаментального влияния на все последующие исследования и публикации. Надеюсь, это будет уместным дополнением к широко цитируемой статье Этуотера о бинауральных биениях.

Д. Шумов перевод 2009 г

Слуховые биения в мозге

При подаче в каждое ухо по отдельности звука разной частоты на слух воспринимаются медленные модуляции, именуемые бинауральными биениями. Это ощущение может показать, как мозг обрабатывает определённого вида звуки.

Джеральд Остер

Если одновременно несильно возбудить два камертона немного отличающихся частот, результирующий звук периодически колеблется и затухает. Эти модуляции называются биениями; их частота равна разности частот изначальных тонов. Например, камертон собственной частоты 440 гц (нота ля первой октавы), возбуждённый одновременно с камертоном частоты 434 гц, производит биения частоты 6 гц. В современных¹ исследованиях камертоны заменяются электронными генераторами колебаний, способными очень точно воспроизводить тоны нужной высоты, чистоты и амплитуды. Биения получаются, когда электрические сигналы с выходов двух генераторов смешиваются и подаются в динамик. С другой стороны, эти же сигналы можно одновременно подать в два различных динамика и также услышать биения. Смешиваются ли тоны электрически или акустически — результат один и тот же.

Совсем другое явление наблюдается в случае использования стереонаушников и подачи сигналов в каждое ухо по отдельности. При определённых условиях и здесь слышны биения, но они имеют совершенно иную природу. Они называются *бинауральными биениями* и во многих отношениях представляют больший интерес, нежели обычные биения, которые в данном контексте мы назовём *монауральными*.

Монауральные биения слышны обоими ушами, но для их ощущения достаточно и одного уха. Бинауральные же биения требуют одновременного приёма обоими ушами. Они возникают вследствие взаимодействия ощущений внутри мозга и могут быть использованы для исследования некоторых процессов в нём.

Физический механизм монауральных биений является частным случаем интерференции волн. В любом случае амплитуда результирующей волны равна алгебраической сумме амплитуд складывающихся тонов. Сигналы усиливаются, когда они в фазе, т.е. когда их нули и пики совпадают. Деструктивная интерференция гасит результирующую амплитуду, когда волны в противофазе. «Чистые тоны», используемые в этих экспериментах, описываются синусоидальными волнами; результирующие биения представляют собой медленно изменяющиеся функции, сходные с синусоидальными волнами, но не полностью.

Частота биения примерно в 6 гц, как в вышеприведенном случае, будет звучать похоже на музыкальное вибрато (на самом деле, вибрато представляет собой частотную модуляцию, а не амплитудную). Если интервал между частотами уменьшать, можно ощутить очень медленные биения, вплоть до примерно 1 биения в секунду, хотя в последнем случае это может быть непросто. Быстрые биения, вплоть до 30 гц воспринимаются как огрубление звука, наподобие шотландской картавости². Дальнейшее увеличение интервала делает биения неслышимыми — два тона воспринимаются по отдельности.

В природе биения встречаются редко, поскольку ей не свойственны устойчивые чистые тоны. Тем не менее, в механических устройствах они присутствуют в изобилии. Например, две турбины самолёта, вращающиеся со слегка отличными скоростями, могут вызвать очень мощные биения, часто

¹ Статья написана в 1973 году — прим. перев.

² Заднеязычное произношение звука [г] жителями Шотландии — прим. перев.

распознаваемые только по тянущему ощущению «под ложечкой». Акустические инженеры способны отфильтровать свист турбин, но медленные биения подавить очень сложно. Жителям многоквартирных домов могут досаждают биения от различных устройств, например, двух вентиляторов, работающих одновременно, при этом локализовать источник неудобства очень сложно.

С другой стороны, биения приносят пользу, например, в случае точного определения частот. Электронщики сравнивают для этого сигналы с тестируемого и образцового генератора путём их наложения и обнаружения биений. Другое применение биений — настройка фортепиано. Обычно настройщик первым делом прослушивает биения, производимые камертоном 440 гц и нотой ля первой октавы, и натягивает или ослабляет струну ноты ля, чтобы свести частоту этих биений к нулю. Затем он нажимает клавишу ля и клавишу нижней ноты ре и регулирует струну последней ноты, пока биения не будут слышны с частотой 10 гц. Эта частота получается в результате взаимодействия второй гармоники струны ля ($2 \times 440 = 880$ гц) и 3-й гармоники струны ре ($3 \times 290 = 870$ гц). Таким образом, клавиша за клавишей, настраивается весь инструмент. В теории, это может сделать даже человек, лишённый музыкального слуха.

Бинауральные биения были открыты в 1839 г. немецким экспериментатором Г. В. Дофе, но вплоть до 1915 г. считались тривиальным частным случаем моноуральных биений. Возражения состояли в том, что на самом деле, каждое ухо слышит оба тона. Это ненужный эффект можно было устранить, поместив камертоны в двух разных комнатах по бокам испытуемого, а в центральной комнате — его самого, и подведя звуки от камертонов к его ушам по отдельности через трубки. Надо было тщательно приклеить каждую трубку к голове, что, однако, вызвало новые возражения: звук от трубки может передаваться к противоположному уху по черепным костям. Звукопроводимость костей — хорошо установленный факт, на котором основаны некоторые реальные средства помощи людям, хотя в данном случае, проходя от одного уха к другому, звук должен был затухать тысячекратно.

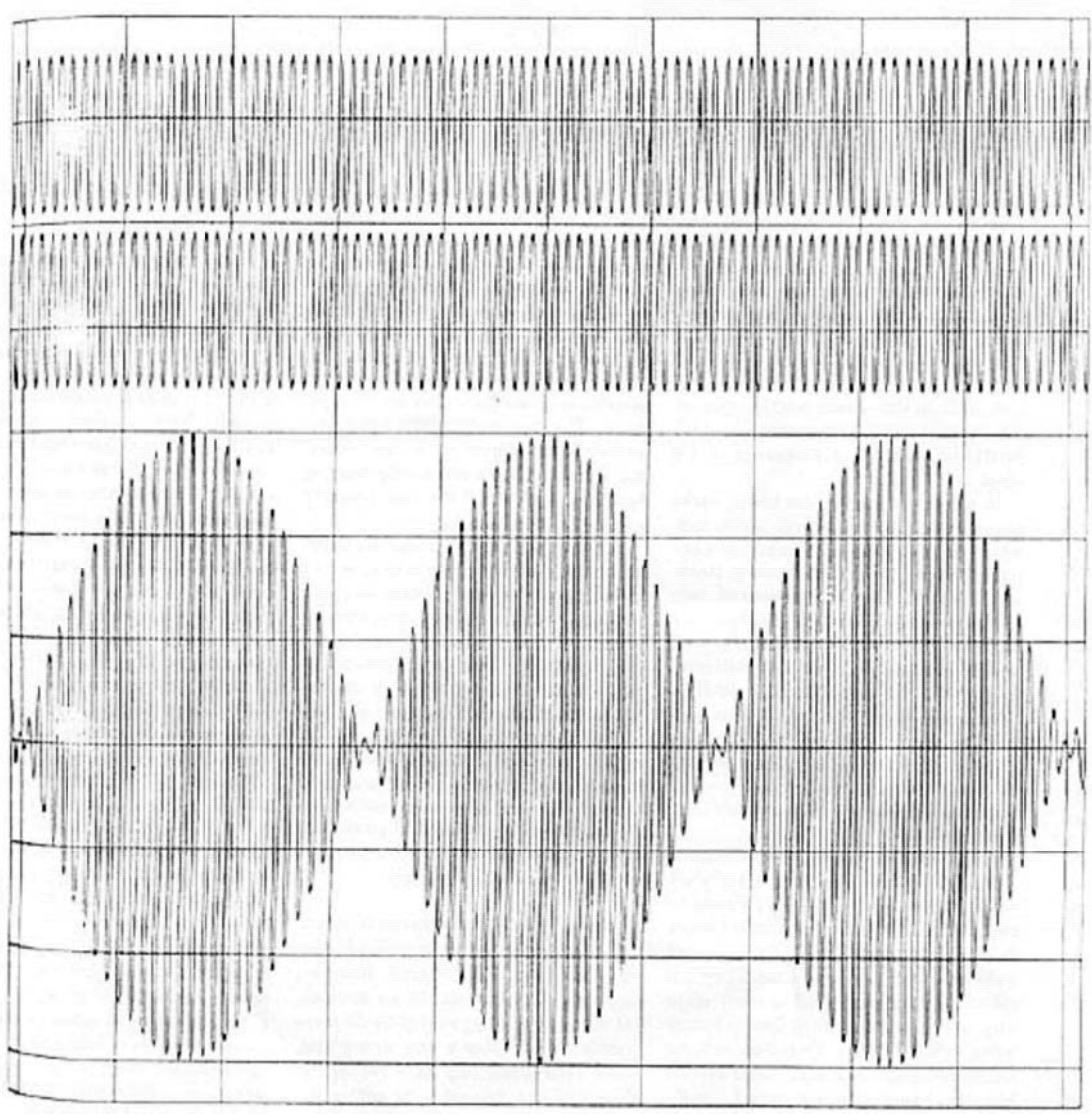
Тем не менее, возможный вклад костной проводимости в восприятие бинауральных биений стало возможным устранить с использованием современных стереофонических наушников. Такие наушники имеют набивку, зачастую жидкую, изолирующую голову от источника звука и предназначенную как раз для исключения эффекта костной проводимости. Действительно, стереофонические записи, воспроизводимые через стереонаушники, звучат неестественно, поскольку инструменты кажутся изолированными друг от друга.

Самая очевидная разница между бинауральными и моноуральными биениями состоит в том, что бинауральные биения слышимы только в случае низких производящих тонов. Лучше всего они воспринимаются в случае несущей частоты в районе 440 гц; с повышением частоты их различимость падает, и в районе 1000 гц они пропадают. Ни один человек из проверенных мною не сообщил о слышимых биениях на частотах свыше 900 гц.

Однако, значение имеют условия эксперимента, в частности, громкость звука и тип стереонаушников, поэтому другие исследователи сообщают об ощущении бинауральных биений, производимых тонами частотой до 1500 гц. С другого конца шкалы биения также становятся неразличимыми: ниже 90 гц испытуемый может спутать их с производящими тонами.

Дж. С. Р. Ликлайдер из Массачусетского Технологического института в период работы в Гарвардском университете разработал методику измерения спектра бинауральных биений (*см. иллюстрацию*). Он подстраивал частоту одного источника, пока биения не становились достаточно «грубыми» и отмечал неизменную частоту эталонного источника. Затем он изменял установку эталонного источника и повторял процедуру. Таким образом измерялся диапазон восприимчивости каждого испытуемого.

Еще одним отличительным свойством бинауральных биений является их приглушенный звук. Моноуральные биения, полученные наложением двух звуков одинаковой интенсивности, будут пульсировать по громкости от максимума до полной тишины, как и следовало бы ожидать по форме результирующей волны. Бинауральные же биения представляют собой только слабую по громкости модуляцию фона. Я попытался оценить глубину этой модуляции: похоже, она составляет около 3 дб, или примерно десятую часть громкости шёпота. Чтобы помочь испытуемым распознать эти сравнительно малозаметные эффекты, я обычно подаю сигналы с моноуральными биениями, а затем неожиданно переключаю их в бинауральный режим. Для тонов с частотой в районе 440 гц испытуемому на распознавание бинауральных биений требуется 2-3 секунды.



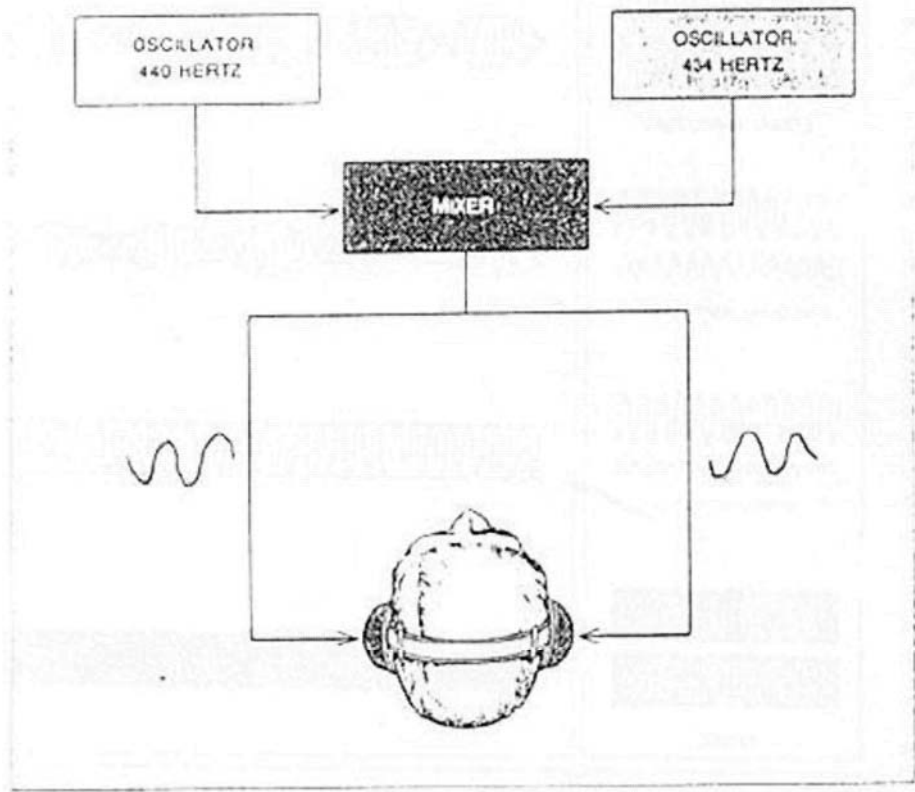
На данной иллюстрации с экрана осциллографа синусоидальные волны накладываются, образуя биения. Две синусоидальные волны вверху имеют слегка отличающиеся частоты; когда они накладываются, то получается результирующая волна, изображенная внизу, с медленно меняющейся амплитудой. Эти изменения и есть биения, которые можно услышать как модуляцию громкости. Если эти два сигнала подать по отдельности в каждое ухо, можно услышать *бинауральные биения*, которые по природе отличаются от моноуральных и производятся внутри мозга.

Чтобы амплитуда моноурального биения изменялась от полной тишины до максимума, оба сигнала должны быть одинаковыми по интенсивности; если это не так, мгновенная амплитуда их алгебраической суммы всегда будет больше нуля. По мере увеличения разницы амплитуд, биения будут становиться все менее различимыми. Бинауральные же биения имеют, по ощущениям, примерно одинаковую интенсивность, независимо от относительной интенсивности обоих тонов.

Е. Ленгардт, сурдолог из Берлина, открыл, что на самом деле, бинауральные биения ощущаются даже когда один из сигналов ниже порога слышимости.

Этот феномен изучал Дж. Дж. Groen из Утрехтского Государственного университета. По его данным, в случае тонов в районе 200 гц биения ощущаются, когда один сигнал имеет громкость (40 дб), а другой — (- 20 дб), или одну сотую громкости слышимого звука. Очевидно, мозг способен обнаруживать и обрабатывать сигналы даже когда один из них заведомо слаб для сознательного восприятия. В том же эксперименте, но проводимом в режиме монозвука, слышен только более громкий сигнал, безо всяких биений.

По-видимому, данному эффекту родственен эффект взаимодействия бинауральных биений с шумом. Обычно шум маскирует звуки, которые мы хотим услышать. Например, он подавляет слабый радиосигнал. Однако, восприятие бинауральных биений с помощью шума улучшается.

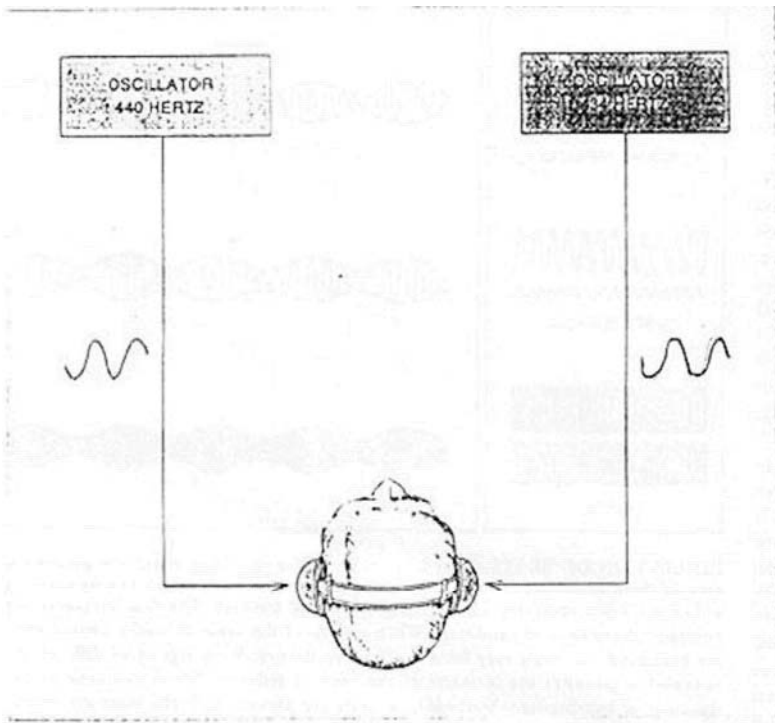


Экспериментальный метод создания моноaurальных биений с использованием двух электронных генераторов колебаний и схемы для их наложения, именуемой микшером. Каждое ухо слышит комбинированный сигнал; биения ощущаются как обоими ушами, так и каждым ухом по отдельности. Когда генераторы настроены, как показано на рисунке, будут слышны 6 биений в секунду (440 гц минус 434 гц).

Если подать два соответствующих сигнала, создающих ощущение бинауральных биений и при этом наложить на них шум достаточной интенсивности, чтобы затенить исходные сигналы, по бинауральные биения станут ощущаться лучше. В аналогичном эксперименте с моноaurальными сигналами будет слышен только шум. Лабораторный источник шума — это электронный прибор, генерирующий случайный сигнал, именуемый «белый шум», который звучит наподобие ветра в осеке. Если его с соответствующей громкостью наложить на исходные тоны, то их невозможно станет различить, но возникнет ощущение модуляции шума биениями.

Это улучшение восприятия бинауральных биений с помощью шума объяснил Л.А. Джеффресс с сотрудниками из Техасского университета при помощи понятия вероятностного усиления. В любой момент амплитуда шума возрастает с большей вероятностью, если амплитуды сигналов совпадают. Когда их амплитуды противоположны, более вероятно деструктивное взаимодействие. Прослушивание бинауральных биений порождает иллюзию, будто звуки расположены где-то внутри головы. Это само по себе не так уж странно: при прослушивании музыки через стереонаушники вам скорее всего тоже покажется, что оркестр находится в голове, а не вовне. Занимательно, тем не менее, что в случае очень медленных биений, менее примерно 3-х в секунду, кажется, что они движутся в голове взад-вперед. Если громкость двух тонов различна, траектория движения приобретает эллиптическую форму. Это кажущееся движение можно объяснить, увязав бинауральные биения с механизмом определения мозгом направления звуков.

В случае низкочастотных сигналов, таких как сигналы, способные производить бинауральные биения, звук локализуется преимущественно вычислением разности фаз между звуками, попадающими в два уха (см. Mark R. Rosenzweig; "Auditory Localization," SCIENTIFIC AMERICAN, October, 1961). Низкочастотные звуки имеют длину волны много большую, нежели диаметр головы, и в результате, огибают голову по механизму дифракции. Лордом Рэлеем, английским физиком 19 века, посчитано, что 90% звука частоты 256 гц («до» 1-й октавы), идущего сбоку головы, достигает дальнего уха по сравнению с ближним ухом. Другими словами, голова не есть препятствие для низкочастотных звуков, и локализация их источника с помощью относительной интенсивности была бы неэффективна. Тем не менее, в этом случае очень эффективна локализация путём определения разности фаз. На открытой местности, где отсутствуют отражающие предметы, человек может определить направление низкочастотного звука в пределах 10 градусов. Это требует от механизма бинаурального



БИНАУРАЛЬНЫЕ БИЕНИЯ ПОЛУЧАЮТСЯ, когда каждый генератор подключен по отдельности к одному наушнику. Частота биений опять 6 герц, но биения в данной случае менее различимы. Поскольку бинауральные биения являются результатом взаимодействия слуховых сигналов, происходящего внутри мозга.

слуха определять разность фаз менее чем в миллисекунду. Такая же разность фаз имеет место для тонов, производящих бинауральные биения. Вот откуда иллюзия перемещения медленных биений. Аналогичное ощущение дал бы источник звука, вращающийся вокруг головы.

Для более высоких звуков длина волны сравнима или меньше размеров головы, так что в ухо с затенённой стороны звук почти не попадает. При частоте свыше 1000 гц локализация звука определяется преимущественно за счёт интенсивности, а не разности фаз. Заметьте, что способность слышать бинауральные биения также исчезает при приближении тонов к 1000 гц. На более высоких частотах направление звука определяется уже менее точно, и так продолжается примерно до 8000 гц, когда локализации звука начинает помогать пинна (внутреннее ухо).

Слуховые механизмы, проявляющиеся в ощущении бинауральных биений, помогают процессу восприятия еще одним способом. Как часто отмечалось, замечательным и ценным качеством человека является способность слышать разговор на фоне окружающего гама.³ Это явление, иногда именуемое «эффектом вечеринки», связано с бинауральным слухом. Фактически, это пример улучшенного восприятия разности фаз, наблюдаемый, в частности, в случае бинауральных биений.

Острота слуха обычно снижается с возрастом. Тем не менее, по моим данным, люди старшего возраста способны определять бинауральные биения и локализовать звуки почти так же, как и молодые.

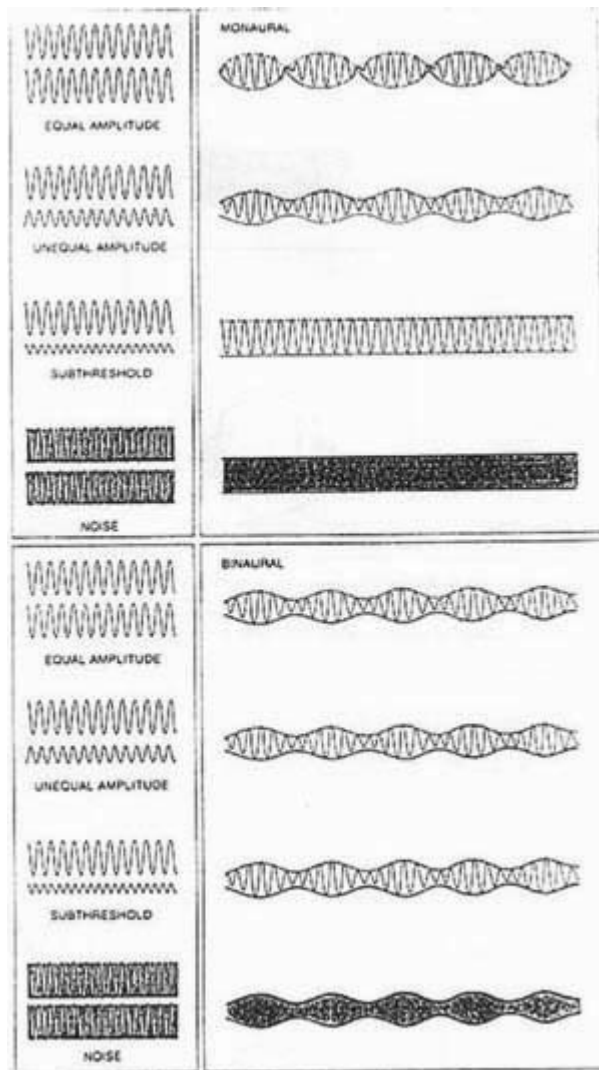
На частоте 5000 гц острота слуха 60-летнего человека, в среднем, на 40 дб ниже, чем у 20-летнего, а верхний порог слышимости — 8000 гц, что вдвое ниже аналогичного показателя у молодого. Однако, острота слышания низких звуков с возрастом почти не изменяется, очевидно поэтому не ухудшается и восприятие разности фаз.

Какова нейрологическая основа бинауральных биений? Простейшее объяснение состоит в том, что количество нервных импульсов от каждого уха и маршрут, по которому они идут в мозг, определяются частотой падающего звука, и где-то в мозгу эти два нервных сигнала взаимодействуют

Одна теория восприятия высоты звука, именуемая телефонной теорией, была предложена в 1886 году У. Базерфордом. Согласно ей, ухо преобразует акустические колебания в электрические сигналы, наподобие микрофона, выдавая один нервный импульс на один цикл колебаний. Однако, одиночные нервные волокна способны откликаться на такие стимулы только до частоты примерно 500 гц, так что телефонная теория могла бы описать поведение уха только для самых низких частот.

В 1865 году Герман фон Гельмгольц предложил теорию положения, приписывающую разделение звуков по высоте механическим свойствам улитки (внутреннего уха). Улитка представляет собой наполненный жидкостью сосуд конической формы, со множеством нервных окончаний и закручен-

³ Мне лично пришлось столкнуться с одним совершенно удивительным примером такой способности. — прим. перев.



ОЩУЩЕНИЕ БИЕНИЙ ЗАВИСИТ от способа подачи звука в уши. В данных схемах слева подаваемые тоны можно принять низкими по частоте и разделенными небольшим интервалом. Четыре диаграммы вверху представляют монауральные условия. Когда сигналы одной и той же интенсивности (одинаковой амплитуды) накладываются, биения изменяются от тишины до максимальной громкости. В случае сигналов различной громкости (неравной амплитуды) интенсивность биений падает. Если тоны сопровождаются достаточно громким шумом, чтобы скрыть их, биения слышны не будут. На четырёх диаграммах внизу, представляющих случай бинауральных сигналов, формы волны слева те же, что и выше, но они подаются в каждое ухо по отдельности. При этих условиях биения слышны как в случае равных, так и неравных амплитуд сигналов, и даже в случае если один из них подпороговый. Если сигналы скрыты шумом, бинауральные биения всё равно слышны, в виде модуляции шума.

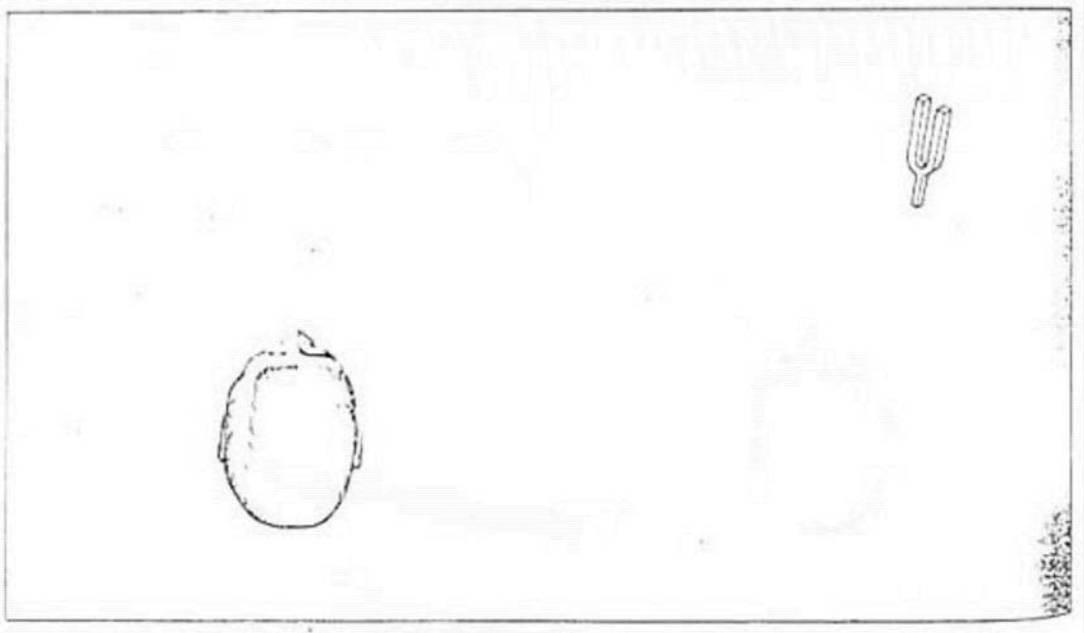
ный наподобие спиральной раковины. Закрученная трубка улитки разделена вдоль на две половины основной (базиллярной) мембраной, колеблющейся под воздействием звука. Джордж фон Бекеси открыл путём прямого наблюдения, что звук определённой частоты заставляет базиллярную мембрану вздуться в некоторых местах более явно (см. "The Ear," by George von Bekesy; Scientific American, August, 1957).

Принято считать, что эта местная стимуляция возбуждает клетки рецепторов около вздутия, и таким образом, возбуждает нервные волокна, связывающие клетки рецепторов со слуховой зоной мозга. Согласно теории положения, импульсы, передаваемые слуховыми нервами, отражают интенсивность звука, но не его частоту. Высота же звука определяется положением начала нерва в улитке.

Для частот свыше 5000 гц теория положения, похоже, адекватно описывает восприятие высоты звука. Однако, на низких частотах механический отклик базиллярной мембраны слишком неочевиден для объяснения точности, с которой ухо идентифицирует тоны. Более того, попытки проверить теорию путём перерезания в экспериментах на животных нервных волокон, которые должны были бы быть единственными носителями низкочастотных звуков, оказались безуспешными.

Для частот между 500 и 5000 гц Эрнест Глен Уивер из Принстонского университета в 1939 году предложил залповую теорию. Хотя отдельные нервные волокна не могут выдавать более 500 импульсов в секунду, нервные клетки, по его предположению, могут превышать эту частоту, выстреливая друг за другом, почти как бригада пехотинцев, ведущая беглый огонь. Таким образом, когда одна группа нервных клеток находится в периоде рефрактерности, другие выдают импульсы. Затухание бинауральных биений на частотах между 500 и 1000 гц подразумевает, что их механизм соответствует телефонной теории, а на более высоких частотах следует связанной с ней залповой теории. Взаимодействие сигналов от двух ушей происходит, предположительно, в центре мозга, именуемом «верхнее оливарное ядро». Это первый центр, получающий сигналы от обеих ушей по пути их прохождения сигналов к местам обработки и интерпретации слуховой информации в высших центрах. На самом деле, верхних оливарных ядер два: они расположены симметрично по обе сторо-

ны мозга, и обе служат местом встречи нервных волокон от обеих ушей. Длительное время они считались подобием мест нервной обработки низкочастотных звуковых импульсов.

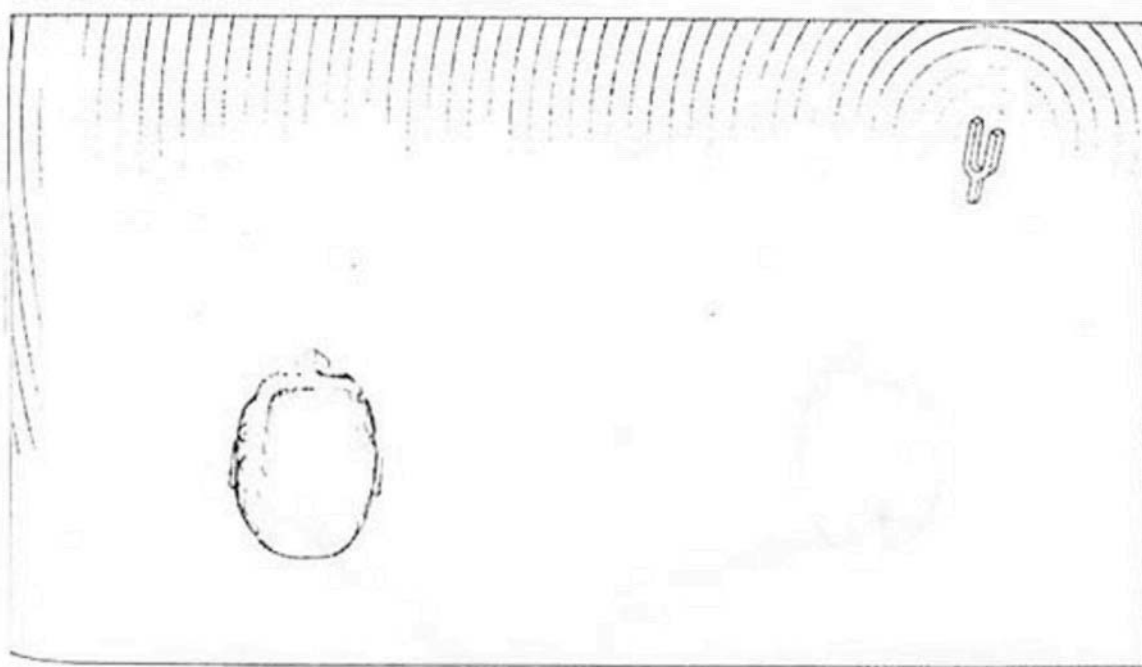


ЛОКАЛИЗАЦИЯ ИСТОЧНИКА ЗВУКА в случае низкочастотных звуков происходит за счёт определения разности фаз между сигналами, поступающими в каждое ухо. На данной иллюстрации волна сжатия достигла левого уха, в то время как правое находится вблизи максимума разрежения. Определяя подобным образом разность фаз, уши способны находить направление низкочастотного тона с точностью около 10 градусов. На этих частотах лишь малая часть звука задерживается тканями головы; длина волны больше размеров головы, и звук дифрагирует вокруг неё.

В 1959 году Роберт Галамбос, экспериментировавший на кошках, показал, что громкие щелчки, стимулирующие оба уха, порождают нервные импульсы, встречающиеся в верхнем оливарном ядре. Когда щелчки одновременны, сигналы усиливают друг друга в определённом месте верхнего оливарного ядра. Когда же между ними делают небольшую задержку, результирующий сигнал подавляется. Таким образом, небольшой сдвиг фазы приводит к ослаблению восприятия звука. Возможно, по этой причине человек стремится повернуться лицом к источнику звука и устранить разность фаз. При прослушивании в наушниках поворот головы, конечно, никак не повлияет на фазу сигналов. Нервные потенциалы в верхнем оливарном ядре кошки были измерены непосредственно; в случае же людей эти потенциалы можно определить путём регистрации вызванных потенциалов — небольших изменений электрических свойств поверхности головы в результате деятельности мозга. Поскольку вызванные потенциалы объективно отражают определённые свойства мозга, у них есть и клинические применения. Например, при подозрении на истерическую слепоту вызванные потенциалы над затылочными долями могут показать, получает или нет мозг зрительную информацию. Аналогичным образом, вызванные потенциалы могут быть использованы для определения глухоты у младенцев, которую другими средствами диагностировать весьма сложно.

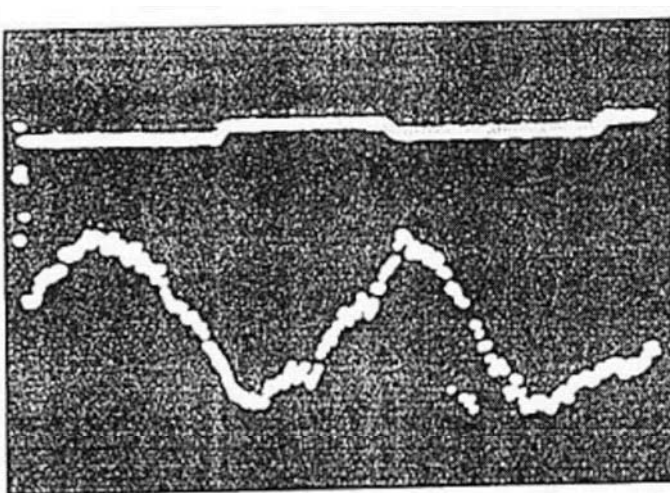
Эти потенциалы очень малы (микровольты) и загрязнены большим количеством случайного шума. Их можно измерять на осциллографе, но требуется специальная обработка сигнала.⁴ Во-первых, горизонтальная развёртка осциллографа должна быть синхронизирована со стимулом. Это делается путём использования стимула в качестве стартового ключа развёртки. Кроме того, для получения достоверных данных необходимо огромное количество трассировок. Серии трассировок напоминает компьютер, известный как усреднитель сигнала; затем он по команде добавляет мгновенные потенциалы и выдаёт смешанный сигнал. Поскольку посторонние случайные потенциалы не связаны по фазе со стимулом, они, с накоплением трассировок, постепенно подавляются.

⁴ Сейчас техника ЭЭГ значительно усовершенствована по сравнению со временем написания статьи. В частности, решена проблема устранения шума и математического анализа. — прим. перев.



ЛОКАЛИЗАЦИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЗВУКА также задействует механизм бинаурального слуха, но в этом случае определяется разность интенсивностей, а не фаз. Длина волны высокочастотного тона меньше диаметра головы, поэтому формируется различимая звуковая тень; таким образом, одно ухо слышит более громкий звук, нежели другое. Этот режим локализации звука менее точен, чем определение разности фаз, за исключением очень высоких частот. Переход имеет место в районе 1000 гц; на этой частоте восприимчивость к бинауральным биениям исчезает.

Если бинауральные и моноуральные биения действительно обрабатываются различными отделами мозга, то можно было бы обнаружить эту разницу путём измерения вызванных потенциалов. Вместе с Adam Atkin и Neil Wetherspoon — моими коллегами из медицинского ин-та им. Горы Синай — мы решили проверить эту гипотезу. Особенно трудно оказалось получить чистые трассировки, потому что стимул представлял собой непрерывный звук, а не короткий щелчок. Постепенно мы пришли к выводу, что для получения значимых результатов испытуемый должен сосредотачиваться на биениях, а не на полной темноте.⁵ Это непростая задача, поскольку бинауральные биения слабо различимы, и потребовалось усреднить большое число трассировок. Часто испытуемый ощущает искажения звука в результате слуховых галлюцинаций, что портит результаты. Тем не менее, после многих повторений этой процедуры нам удалось продемонстрировать, что вызванные потенциалы, производимые бинауральными и моноуральными биениями, различаются качественно и количественно, что указывает на разные способы их обработки (см. иллюстрацию).

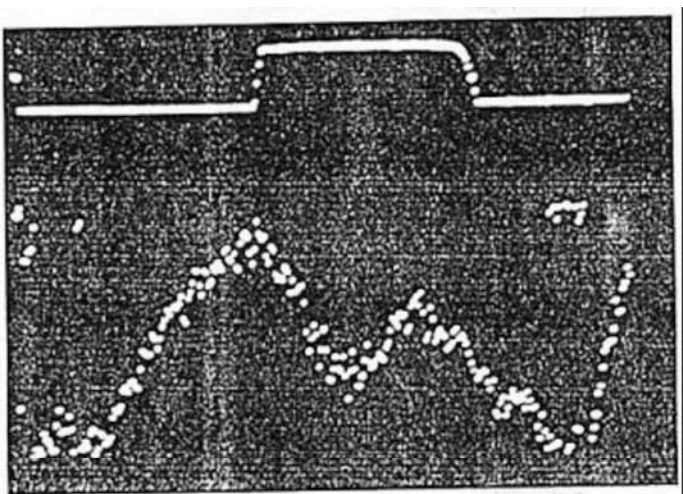


НА ФОТОГРАФИИ С ЭКРАНА ОСЦИЛЛОГРАФА, сделанной автором вместе с Adam Atkin и Neil Wetherspoon из медицинского ин-та им. Горы Синай, показаны вызванные потенциалы испытуемых, прослушивающих моноуральные биения. В каждое ухо подаются тоны 300 и 303 гц; электрические потенциалы, отражающие работу нижележащих отделов мозга, измеряются с помощью электрода на поверхности головы. Синхронизацией частоты горизонтальной развёртки с частотой биений эти маленькие потенциалы (измеряемые микровольтами) можно соотнести со стимулом.

⁵ Вот и научное подтверждение того, что развивающие фонограммы с БР неэффективны без активного внимания слушающего. — прим. перев.

(К подписи под рисунком): Порогообразная форма волны в верхней части экрана представляет собой синхронизирующий сигнал развёртки осциллографа. Нарастание каждого импульса соответствует моменту максимальной громкости биения. Периодическая волна внизу представляет собой запись вызванных потенциалов, состоящую для каждой точки кривой из усреднённых значений, вычисляемых небольшим компьютером (усреднителем сигнала) в результате многократного повторения процедуры.

У бинауральных биений могут быть клинические применения. Вместе с некоторыми из студентов мы исследовали ряд неврологических больных и открыли, что некоторые из них не способны слышать бинауральные биения. Среди этих больных несколько не могли локализовать звуки щелчка пальцами. Важным может оказаться, что некоторые из тех, кто не мог слышать бинауральные биения, страдали болезнью Паркинсона, расстройством центральной нервной системы, характеризующимся недостатком спонтанной мышечной активности, неподвижностью лица и тремором. Один из пациентов, скрипач, был неспособен слышать бинауральные биения, когда поступил в больницу. По мере лечения, он начал воспринимать сначала биения, производимые самыми низкими тонами диапазона, а затем постепенно и более высокими. В конце недели, когда его состояние было признано удовлетворительным, он мог слышать биения, производимые тонами частотой примерно до 650 гц. Открыты также половые различия в ощущении бинауральных биений. Дж. В. Тобиас из Федерального авиационного управления Оклахома-сити изучал спектр бинауральных биений на ряде добровольцев и обнаружил, что верхний предел несущих частот у мужчин выше, чем у женщин. Он проверял восприимчивость трёх женщин на протяжении шести недель и обнаружил, что спектр тонов расширяется в область высоких частот в начале менструации, затем сужается, после чего достигает нового пика спустя 15 дней от начала менструации. Последний пик можно сопоставить со временем овуляции, когда женщина наиболее жизнеспособна.

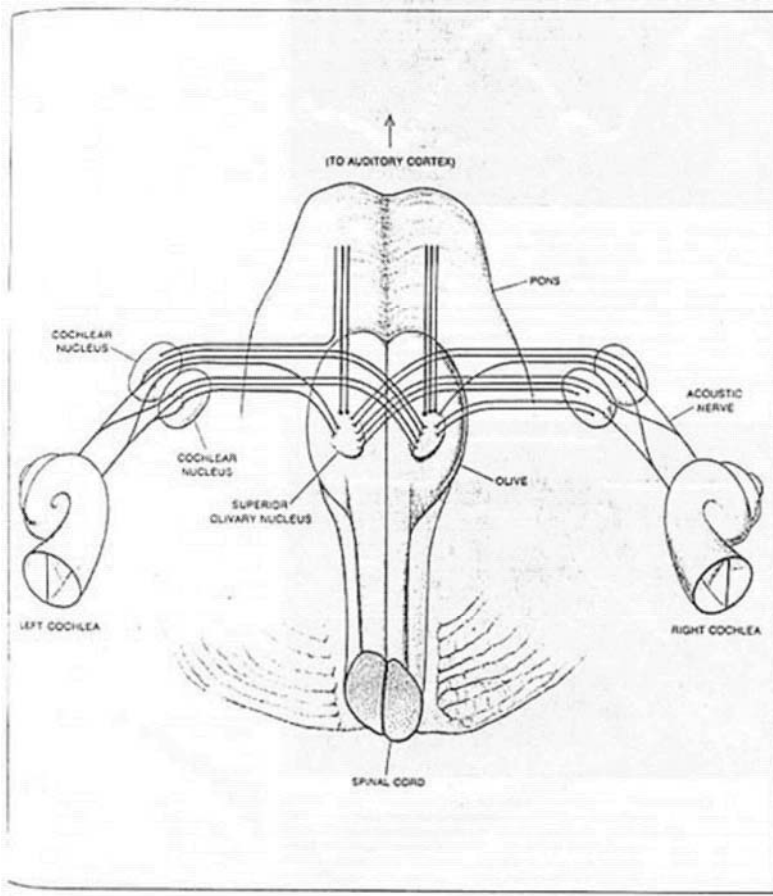


БИНАУРАЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ, проведенный при тех же условиях, за исключением того, что тоны подавались раздельно в каждое ухо. Вызванные потенциалы также записывались в результате последовательных повторений, но они отличны от своих аналогов в монауральных условиях по амплитуде, форме волны и времени синхронизации со стимулом. Эти отличия подразумевают, что бинауральные биения обрабатываются другим способом и другим отделом мозга, нежели монауральные биения. Амплитуда показанных на иллюстрации вызванных потенциалов кажется примерно такой же, как в случае монауральных биений.

На самом деле, она намного меньше, просто для ясности вертикальная шкала осциллографа увеличена, что можно увидеть, если сравнить амплитуды сигналов синхронизации. На обеих иллюстрациях яркие области, не связанные с основной волной, являются посторонними сигналами, возникающими за счёт остаточного шума, производимого записывающей аппаратурой.

Я проверял несколько женщин репродуктивного возраста, и мои результаты, похоже, согласуются с выводами Тобиаса. Оказывается, что некоторые женщины действительно демонстрируют значительные вариации восприимчивости бинауральных биений во время менструального цикла. Когда биения не ощущаются, женщины зачастую слышат два различных звука. У мужчины, с другой стороны, нет никаких изменений слышимости в течение месяца. Это позволяет предположить, что на спектр бинауральных биений может оказывать влияние уровень эстрогенов в крови.

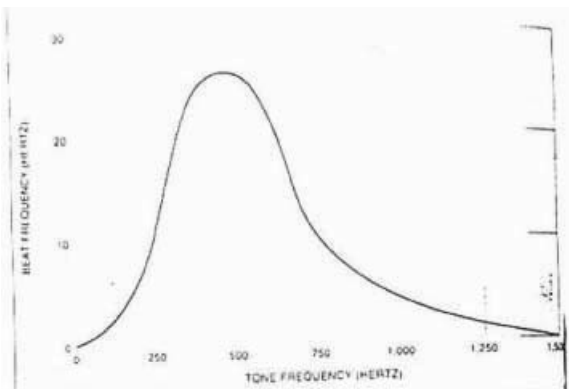
Как правило, бинауральные биения рассматриваются просто как курьёз. Последний учебник по физиологии слуха вообще о них не упоминает. Тем не менее, измерение бинауральных биений может объяснить такой важнейший аспект восприятия процесс как локализации звуков. Улучшение ощу-



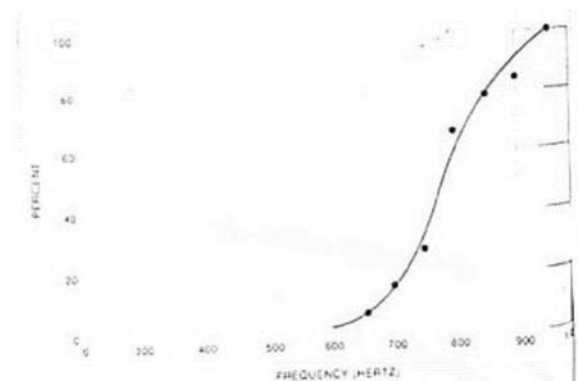
НИЖНИЕ СЛУХОВЫЕ ОБЛАСТИ МОЗГА расположены в продолговатом мозге; здесь они изображены схематически со стороны задней части шеи. Нервные импульсы от правого (цветное) и левого (чёрное) уха первый раз встречаются в левой или правом верхнем оливарном ядре. Эти структуры являются частью оливарного ядра, органа, находящегося на данной схеме за стволом мозга. Бинауральные биения обнаруживаются, вероятно, здесь.

щения биений при помощи шума является моделью механизма отделения слуховых сообщений от шумового фона. Эффективное выявление бинауральными биениями подпороговых звуков позволяет предположить, что могут быть и другие неосознаваемые стимулы, которые мозг, тем не менее, способен обрабатывать.

Наконец, возможно, что путём измерения спектра бинауральных биений получится выявлять гормонально индуцируемые физиологические или поведенческие изменения, которые слишком слабы для обнаружения обычными средствами.



СПЕКТР БИНАУРАЛЬНЫХ БИЕНИЙ, измеренный Дж. С. Р. Ликлайдером, Дж. С. Уэбстером и Дж. М. Хедламом. Быстрые биения, числом до 26 в секунду, когда производящие их тоны имеют частоту около 440 гц. С повышением или понижением частоты тонов максимальная частота биений уменьшается. При повышении интервалом 30 гц слышны два тона.



ПОЛОВЫЕ РАЗЛИЧИЯ в восприятии бинауральных биений построены по данным, собранным Дж. В. Тобиасом. С повышением частоты тонов, производящих бинауральные биения, как мужчины, так и женщины, перестают их слышать. Женщины, однако, теряют эту способность на более низких частотах. У некоторых испытуемых-женщин также наблюдались изменения этого показателя в течение менструального цикла.