

УДК 612.821

ВОСПРИНИМАЕМЫЕ ТРАЕКТОРИИ ЦИКЛИЧЕСКОГО ДВИЖЕНИЯ ЗВУКОВЫХ ОБРАЗОВ

© Л. Б. Шестопалова*, Е. А. Петропавловская, Д. А. Саликова, П. И. Летягин

*Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН,
199034, Санкт-Петербург, набережная Макарова, д. 6, Россия*

** E-mail: shestopalovalb@infran.ru; shestolido@mail.ru*

Поступила в редакцию 12.04.2024

После доработки 28.05.2024

Принята к публикации 02.06.2024

Бинауральные биения – это феномен, возникающий при дихотической стимуляции вследствие бинауральной интеграции. Он проявляется как циклическое движение звукового образа в субъективном пространстве, когда диапазон частот биений лежит ниже 3 Гц. Испытуемым подавались шумовые стимулы, создающие ощущение движения за счет линейного или ступенчатого паттерна изменений междушумной задержки (ΔT). Диапазоны изменений ΔT определяли положение траекторий движения в центральном или латеральном секторах пространства. Результаты подтверждают, что оба паттерна ΔT создавали эффект бинауральных биений. Влияние пространственного положения на воспринимаемую длину траекторий интерпретируется с точки зрения нелинейных свойств латерализации. Влияние паттерна ΔT на воспринимаемую длину траекторий предположительно опосредовано механизмами временной интеграции в бинауральном слухе.

Ключевые слова: бинауральные биения, пространственный слух, бинауральная интеграция, междушумные различия по времени

DOI: 10.31857/S0235009224030033 EDN: BSBTFP

ВВЕДЕНИЕ

Феномен бинауральных биений известен уже более ста лет. Он возникает в условиях дихотической подачи звуковых сигналов и состоит в периодических изменениях громкости или в циклическом движении звукового образа от одного уха к другому. Если подать на два уха тональные сигналы с небольшим отличием по частоте, то у слушателя возникает иллюзия тона промежуточной частоты и пульсирующей громкости, причем частота пульсаций равна разности частот предъявляемых основных тонов.

В общем случае бинауральные биения возникают в области низких частот основного тона (около 1000 Гц или ниже) при разнице частот обоих тонов не более 35 Гц (Licklider et al., 1950). При уменьшении междушумной разности частот до 3 Гц и ниже возникает новое ощущение – слитный звуковой образ движется от одного уха к другому и обратно, создавая иллюзию циклического движения по азимуту. Это явление получило название вращающихся тонов. Важно, что периодические изменения стимула отсутствуют в предъявляемых на каждое из ушей сигналах.

Воспринимаемые биения возникают исключительно за счет бинауральной интеграции, причем их частотный диапазон (ниже 35 Гц) лежит в основном за пределами чувствительности человеческого слуха, но совпадает с диапазоном основных колебаний нейрональной активности мозга (дельта-, тета-, альфа-, бета- и гамма-ритмы).

В классических работах на эту тему эффекты биений создавали посредством динамических изменений бинауральных характеристик звуковых сигналов, задаваемых междушумными различиями по фазе ΔP (Perrott, Nelson, 1969; Perrott, Musicant, 1977), по времени ΔT (Blauert, 1972; Grantham, Wightman, 1978), по интенсивности ΔI (Blauert, 1972, Grantham, 1984) или междушумной корреляции сигналов (Grantham, 1982). Бинауральные биения воспринимаются как циклические перемещения звукового образа только при небольших различиях между частотами двух тонов, порядка 1–3 Гц (Perrott, Musicant, 1977).

Большинство работ по исследованию бинауральных биений были выполнены на тональных стимулах. Однако реальная акустическая среда содержит преимущественно сложные сигналы с широким спектром частот. Бинауральные

биения широкополосных сигналов также были описаны в нескольких психофизических работах (напр., Grantham, Wightman, 1978; McFadden, Pasanen, 1975; Saberi, 1995; Bernstein, Trahiotis, 1996; Akeroyd, 2010).

В частности, в работе Akeroyd (2010) циклическое движение широкополосного сигнала создавалось посредством частотного сдвига каждого компонента Фурье-спектра исходного шума. Было обнаружено более отчетливое восприятие перемещения шумового сигнала, чем в случае тональных сигналов. Следует отметить, что в методическом отношении эти работы были ограничены только задачами различения, и вопросы величины углового смещения звукового образа, длины воспринимаемых траекторий или скорости циклического движения стимула в них не затрагивались. Настоящее исследование нацелено на восполнение этого пробела.

В контексте изучения инерционных свойств бинаурального слуха необходимо различать понятия частоты биений и скорости циклического перемещения звукового образа. Частота биений — это количество циклов в секунду, показывающее, сколько раз в течение секунды звуковой образ возвращается к одному и тому же положению. В пределах одного цикла звуковой образ может перемещаться быстрее или медленнее, в зависимости от паттерна изменений межшумных различий. Паттерн теоретически может быть задан либо линейной, либо нелинейной (в том числе классической синусоидальной) или ступенчатой функцией времени. Настоящая работа предполагает использование плавного движения, создаваемого за счет линейных изменений ΔT , и мгновенного перемещения звукового образа, создаваемого за счет ступенчатых изменений ΔT .

С учетом инерционности бинауральной интеграции (binaural sluggishness), обработка движущихся звуковых стимулов в слуховой системе может рассматриваться в рамках концепции интегратора утечки (leaky integrator: Carlile, Leung, 2016). Эта концепция описывает сглаживающую функцию бинауральной системы и предполагает, что ее отклик на слуховое событие основан на временной интеграции информации, получаемой от обеих ушей (Kollmeier, Gilkey, 1990; Culling, Summerfield, 1998; Bernstein et al., 2001). Сглаживающее действие интегратора утечки приводит к тому, что при малой длительности звуковых сигналов (до 200 мс) психофизическое различение плавного и мгновенного смещения становится возможным только при больших значениях ΔT (600–800 мкс) (Shestopalova et al., 2012), соответствующих перемещению стимула на большие угловые расстояния, а вызванные

потенциалы на мгновенное перемещение и быстрое движение стимула весьма схожи структурно и топографически (Getzmann, Lewald, 2012; Shestopalova et al., 2021).

Таким образом, мгновенное перемещение адекватно моделирует движение с очень высокой скоростью, и эти два паттерна изменений ΔT можно рассматривать как качественно подобные для бинаурального слуха. Применение разных паттернов ΔT в нашем эксперименте позволит исследовать взаимосвязанные эффекты — скорость перемещения между крайними точками и длительность нахождения в них, моделируя плавное и мгновенное циклическое перемещение звукового образа при одной и той же частоте биений.

Задачи данной работы состояли в том, чтобы 1) показать возможность получения эффекта биений шумового сигнала в форме циклического движения, траектории которого расположены в разных областях акустического пространства; 2) исследовать зависимость размаха биений от положения в пространстве и от паттерна циклического движения. Мы предполагали, что вследствие усреднения динамической бинауральной информации в непрерывном сигнале воспринимаемая длина траектории (размах биений) плавного движения может быть меньше, чем в случае мгновенного перемещения.

ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ

Этические нормы. Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях, и одобрены комиссией по этике Института физиологии им. И.П. Павлова РАН (протокол № 22-05). Каждый участник исследования предоставил добровольное письменное информированное согласие, подписанное им после разъяснения ему потенциальных рисков и преимуществ, а также характера предстоящего исследования.

Условия эксперимента и испытуемые. В экспериментах приняли участие 22 праворуких испытуемых в возрасте от 18 до 45 лет с нормальным слухом (по данным тональной аудиометрии) и без истории неврологических заболеваний (по отчетам испытуемых). Группа включала в себя 12 мужчин и 10 женщин, средний возраст 27 ± 7 лет; 17 слушателей были наивными, а пятеро имели опыт участия в слуховых экспериментах.

Во время экспериментов испытуемые располагались в кресле внутри экранированной звукоизолированной камеры, и им дихотическим

способом предъявлялись звуковые сигналы. Эксперимент проводился за 3-4 визита испытуемого. В течение опыта по просьбе испытуемых им предоставлялись перерывы для отдыха.

Стимуляция. Создание эффекта циклического движения широкополосных стимулов предъявляет определенные требования к звуковым сигналам. Поскольку бинауральные биения возникают только при использовании низкочастотных сигналов (Mills, 1960; Альтман, 2011), пространственные эффекты в нашем эксперименте создавались при помощи циклического изменения ΔT с частотой 1 Гц. Следует обратить внимание, что хотя сигнал возвращается в исходную точку один раз в секунду, фактически каждый цикл движения содержит по два слуховых события, соответствующих поворотам в двух крайних точках траектории – исходной и максимально удалённой от неё.

Стимулы содержали начальный и конечный стационарные участки и участок циклического движения между ними (рис. 1, вверху). На начальном и конечном участке величина ΔT принимала одно из постоянных значений ± 800 мкс, ± 400 мкс или 0 мкс в разных стимулах. Движение каждого стимула начиналось в месте расположения начального стационарного фрагмента, достигало максимального удаления от него – точки поворота, в которой величина ΔT отличалась от исходной на 800 мкс. Затем стимул возвращался к началу, цикл повторялся несколько раз, и завершался стационарным фрагментом там же, где начинался. Для того, чтобы оценить влияние положения стационарных участков на воспринимаемую длину траекторий, были созданы три пары траекторий (табл. 1): левосторонние ЛЦ и ЦЛ, центральные ЛП и ПЛ, правосторонние ПЦ и ЦП. В каждой паре траектории различались только по положению начальной/конечной точки и точки поворота.

Исходным сигналом служил отрезок белого шума, синтезированного с частотой дискретизации 96 кГц и фильтрованного в полосе 100–1300 Гц. На его основе созданы следующие виды дихотических стимулов:

1) стимулы, моделирующие плавное циклическое движение по азимуту (см. рис. 1, вверху). Эти стимулы состояли из трех фрагментов, следующих друг за другом без пауз: двух стационарных участков в начале и в конце сигнала, и участка движения между ними. Длительность начального и конечного участков с постоянной величиной ΔT составляла 500 мс. Интенсивность сигнала на начальном участке плавно нарастала, а на конечном участке плавно спадала по косинусоидальному закону в течение всех 500 мс, чтобы

уменьшить влияние реакции на включение и выключение сигнала. В средней части стимула интенсивность была постоянной, а величина ΔT изменялась линейно на 800 мкс (относительно ΔT начального участка) за 500 мс, а затем возвращалась к исходному значению за следующие 500 мс (рис. 1, внизу). Такой цикл изменений ΔT с периодом 1000 мс повторялся 8 раз. Полная длительность стимула составила 9000 мс. Тем самым моделировалось циклическое плавное движение по дуге азимута между двумя фиксированными положениями. Смена направления движения на противоположное происходила каждые 500 мс. Данный сигнал обозначается в дальнейшем как “линейный”;

2) стимулы, моделирующие циклическое мгновенное смещение звукового образа (рис. 1, вверху). В этом случае, в средней части сигнала величина ΔT изменялась мгновенно на 800 мкс (относительно ΔT начального участка) и оставалась постоянной в течение 500 мс, а затем мгновенно возвращалась к исходному значению и снова оставалась постоянной в течение 500 мс. Величина ΔT начального и конечного участка принимала те же постоянные значения ± 800 мкс, ± 400 мкс или 0 мкс, как и в случае плавного движения. Полный цикл также длился 1000 мс и повторялся 8 раз. В этом сигнале положение звукового образа скачкообразно менялось каждые 500 мс между двумя крайними точками. Начальный и конечный стационарные участки полностью соответствовали условиям, описанным для первого типа сигнала. Полная длительность стимула составила 9000 мс. Такой сигнал обозначается в дальнейшем как “ступенчатый”;

3) в качестве реперов каждому испытуемому предъявлялись стимулы, моделирующие неподвижные звуковые образы, расположенные в разных точках левой и правой полусферы субъективного акустического пространства. Межушная задержка в этих стимулах принимала значения ± 800 мкс, ± 600 мкс, ± 400 мкс, ± 200 мкс и 0 мкс. Стимулы с $\Delta T = \pm 600$ мкс и ± 200 мкс, не соответствовавшие крайним значениям ΔT стимулов с циклическим движением, были введены в серию для того, чтобы у слушателя не создавалось ощущение ограниченного набора возможных положений, которое можно запомнить и затем воспроизводить при последующей оценке положения движущихся стимулов. Ответы на дополнительные неподвижные стимулы не брали в анализ. Длительность одного неподвижного стимула составляла 2000 мс, включая фронты нарастания и спада по 500 мс, сглаженные косинусоидальной функцией. При каждом из предъявлений реперного стимула он повторялся по три раза с интервалами 1000 мс. После

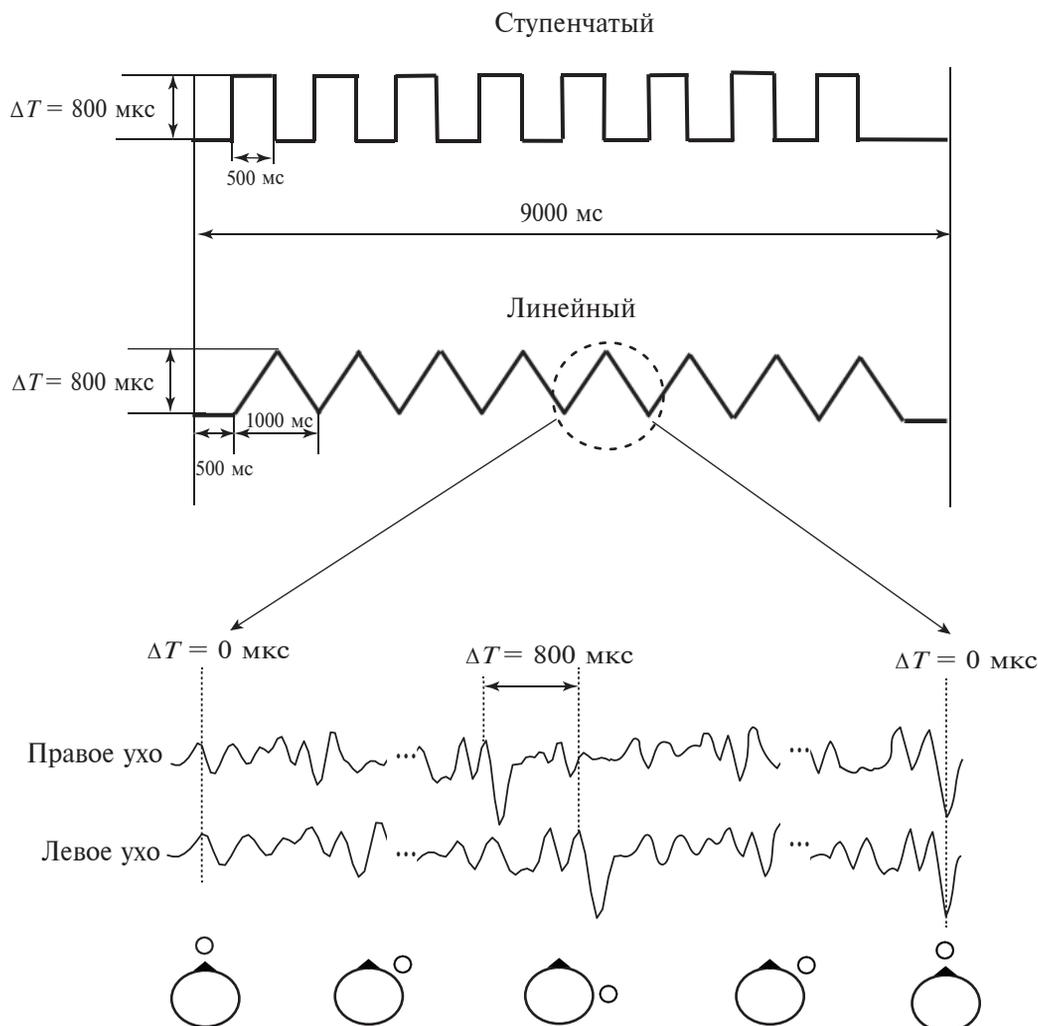


Рис. 1. Изменения величины межушной задержки в бинауральных звуковых стимулах, моделирующих плавное и ступенчатое циклическое движение. Вверху: временная структура стимулов в пределах одной пробы. По горизонтали — время (мс), по вертикали — величина межушной задержки (ΔT , мкс). Разные начальные значения ΔT определяют разные положения траекторий циклического движения в субъективном слуховом пространстве. Внизу: схема дихотической стимуляции в одном цикле линейного паттерна (от 0 мкс до 800 мкс и обратно к 0 мкс). На схемах головы условно изображено последовательное изменение положения звукового образа в соответствии с изменениями ΔT .

этого регистрировали ответ испытуемого о положении звукового образа. Общая длительность эпохи стимуляции от начала первого стимула до конца последнего составила 8000 мс.

Сигналы преобразовывались в аналоговую форму при помощи многоканальной звуковой карты Gina24 (Echo Audio, США) и предъявлялись дихотически с помощью звукоизлучателей Etymotic ER-2 (Etymotic Research Inc., США). Звуководы излучателей фиксировались в слуховых проходах с помощью ушных вкладышей, которые обеспечивали подавление внешних шумов на 30 дБ. Неравномерность амплитудно-частотных характеристик звукоизлучателей в диапазоне 0.1–10 кГц составляла ± 3 дБ.

Процедура эксперимента. На предварительном этапе каждого эксперимента у всех испытуемых измеряли монауральные пороги слышимости с использованием шумовых посылок полосой 100–1300 Гц и длительностью 700 мс. Разница порогов левого и правого уха не превышала 10 дБ. Далее устанавливали уровень интенсивности 50 дБ над порогом на обоих каналах, дихотически предъявляли идентичные шумовые посылки и проводили центрирование звукового образа.

Процедура центрирования состояла в том, что испытуемый сообщал нажатием клавиш на клавиатуре, ощущал ли он при равной интенсивности в правом и левом каналах положение звука как “центральное” (звуковой образ расположен

по средней линии головы) или правее/левее центра. В зависимости от отчётов испытуемого, интенсивность корректировали в пределах 1–3 дБ таким образом, чтобы стимул занял центральное положение. В дальнейшем интенсивность сигналов устанавливалась на уровне 50 дБ над скорректированным порогом слышимости испытуемого.

Во время эксперимента звуковые стимулы были сгруппированы в серии. Тип серии определялся паттерном стимула (линейный, ступенчатый, репер). Испытуемый получал инструкцию прослушать каждый стимул от начала до конца, а затем указать при помощи графического планшета Genius G-pan 450 положение крайних точек, между которыми перемещался звуковой образ, или положение неподвижного репера в контрольных сериях. Для этого на рабочей поверхности планшета была изображена дуга, на которую испытуемый должен был спроецировать воспринимаемое положение звуковых сигналов.

Межстимульный интервал не был фиксирован и подбирался индивидуально, как удобный для работы слушателя промежуток между его ответом и подачей следующего стимула. В ходе одной серии стимулы каждого вида повторялись по 8 раз в псевдослучайном порядке, а каждая серия в полной программе исследования предъявлялась 3 раза. Таким образом, каждый из видов стимулов (движущихся и неподвижных) предъявлялся испытуемому 24 раза. Чередование серий рандомизировали индивидуально и по всей группе испытуемых. Длительность серии – 12–15 минут, в зависимости от темпа работы испытуемого.

Анализ данных. Воспринимаемое угловое положение концов траекторий движущихся стимулов регистрировали в градусах относительно средней линии головы, а затем вычисляли длину воспринимаемых траекторий. Аналогично вычисляли расстояния между воспринимаемыми положениями неподвижных реперных стимулов с $\Delta T = \pm 800$ мкс и 0 мкс, а также между положениями стимулов с $\Delta T = -400$ мкс и 400 мкс. Затем для каждого типа стимулов полученные значения усредняли по данным каждого испытуемого отдельно, а также по всей группе в целом.

После исключения случайных ошибок каждое индивидуальное значение соответствовало усреднению 20–24 измерений. Измеренные величины подвергали 2-факторному дисперсионному анализу (repeated measures ANOVA, rmANOVA) с факторами Паттерн (репер, линейный, ступенчатый) и Положение (ЦЛ, ЦП, ПЦ, ЛЦ, ПЛ, ЛП). При парных сравнениях по фактору Положение использовали поправку Шидака, а для фактора

Паттерн – поправку Бонферрони. Все сравнения проводили с уровнем значимости $p < 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Все слушатели уверенно определяли положение концов траекторий как быстрого, так и медленного движения. Воспринимаемые положения реперов и траекторий движения приведены на рис. 2.

Статистические сравнения при помощи rmANOVA (Паттерн (репер, линейный, ступенчатый) \times Положение (ЦЛ, ЦП, ПЦ, ЛЦ, ПЛ, ЛП)) подтвердили высокую значимость обоих факторов (Паттерн: $F(1.69, 35.45) = 69.18$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.77$; Положение: $F(1.73, 36.42) = 102.34$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.83$) и их взаимодействия ($F(4.69, 98.47) = 11.73$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.36$).

Результаты попарных сравнений приведены на рис. 3. Сравнения по фактору Паттерн показали, что для всех положений траектория плавного движения была значимо короче, чем ступенчатого движения и чем расстояние между неподвижными реперами ($p < 0.001$), при отсутствии других различий ($p > 0.05$). Длина латеральных траекторий составила в среднем 54 ± 3 град для плавного движения, 71 ± 3 град для ступенчатого движения, а расстояние между реперами – 70 ± 2 град. Длина центральных траекторий – 72 ± 4 град для плавного движения и 99 ± 5 град для ступенчатого, при расстоянии между реперами 109 ± 4 град. Кроме того, для положения ПЛ траектория ступенчатого движения также была меньше расстояния между реперами ($p < 0.05$).

Согласно сравнениям по фактору Положение, для всех типов сигналов траектории ПЛ и ЛП не отличались друг от друга ($p > 0.05$), но были длиннее остальных ($p < 0.001$), при отсутствии других различий ($p > 0.05$). Таким образом, анализ показал отсутствие различий внутри пар траекторий ЦЛ и ЛЦ, ЦП и ПЦ, ПЛ и ЛП ($p > 0.05$). Это равносильно отсутствию влияния положения стационарного участка на длину левосторонних, правосторонних и центральных траекторий.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В условиях циклического движения интернализированных шумовых сигналов впервые исследовали влияние паттерна движения и пространственного положения траекторий на их длину. Согласно полученным данным, как плавное, так и ступенчатое движение создавало четкий эффект бинауральных биений у всех слушателей. Разные паттерны изменений ΔT позволили

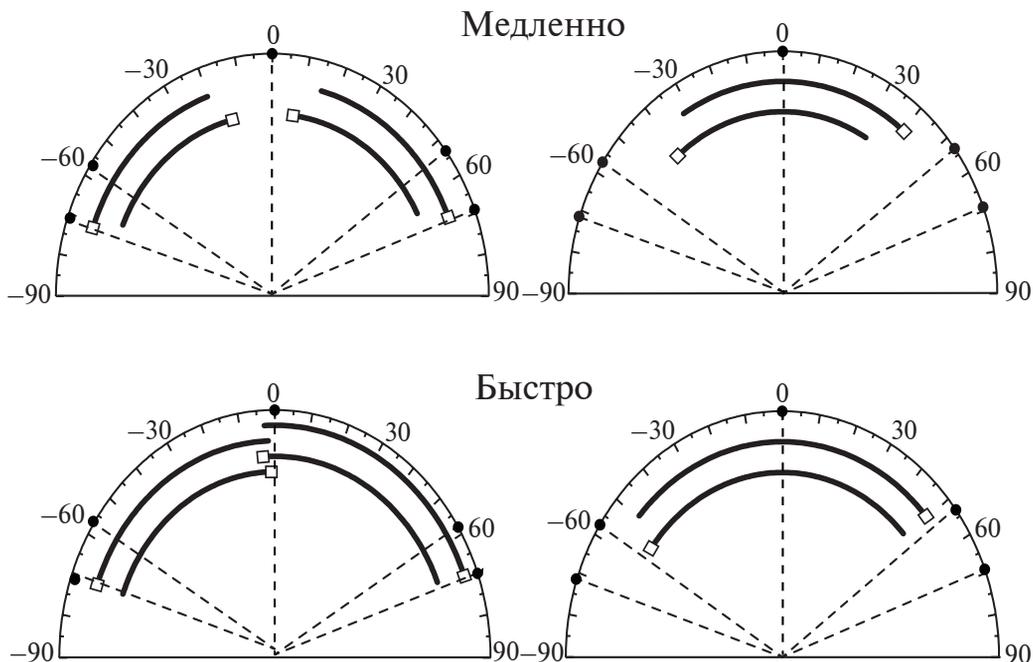


Рис. 2. Воспринимаемое угловое положение траекторий движущихся стимулов и неподвижных реперных стимулов. Дуги соответствуют траекториям движущихся стимулов. Черные точки и пунктирные линии соответствуют положению реперных стимулов. Квадратами на дугах отмечено положение стационарного участка в стимуле. На схемах слева показаны две пары латеральных траекторий – левосторонние (ЛЦ и ЦЛ) и правосторонние (ПЦ и ЦП), на схемах справа – пара центральных траекторий (ПЛ и ЛП).

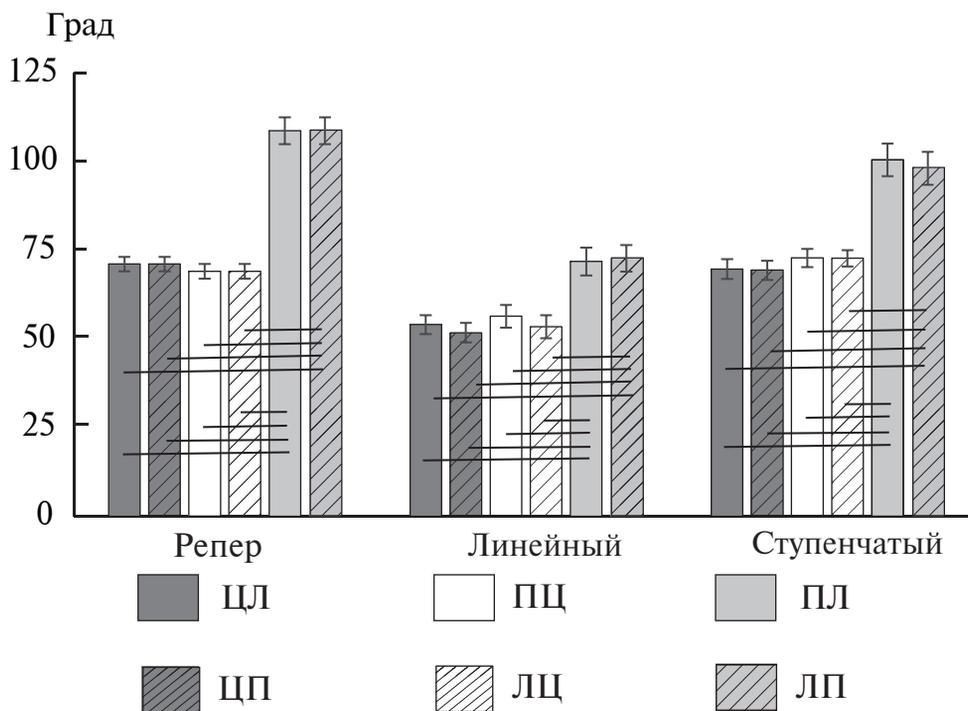


Рис. 3. Угловое расстояние между неподвижными реперами и длины траекторий циклического движения. Горизонтальные линии – достоверные различия при попарных сравнениях ($p < 0.001$). Вертикальными черточками обозначена стандартная ошибка среднего. По вертикали – угловые расстояния в градусах, по горизонтали – тип стимула.

впервые получить и измерить траектории биений, расположенные в разных частях субъективного акустического пространства.

Влияние пространственного положения на длину траекторий. Для обоих паттернов движения центральные траектории оказались длиннее латеральных. Важно отметить, что расстояние между неподвижными реперами с $\Delta T = -400$ мкс и 400 мкс также оказалось больше, чем между стимулами с $\Delta T = \pm 800$ мкс и 0 мкс, хотя разница между крайними величинами ΔT была одинакова и равна 800 мкс. Следовательно, причина различий в длинах центральных и латеральных траекторий не связана с движением. Вероятно, различия в длинах обусловлены нелинейностью связи между ΔT и воспринимаемым положением стимула, особенно характерной для латеральных областей.

S-образные кривые латерализации стимулов с ΔT были приведены в классической работе Блауэрта (1979) и в более современном исследовании Dingle et al. (2013). Зависимости воспринимаемого положения конечной точки траектории при перемещении коротких стимулов от центра к периферии описаны в работе Петропавловской и др. (2011). По данным последних авторов, при $\Delta T = \pm 400$ мкс неподвижный звуковой образ был смещен почти на 60 град азимута, а дальнейшее увеличение ΔT с шагом 100 мкс позволило достичь смещения всего в 70 град при $\Delta T = \pm 800$ мкс, причем при $\Delta T = \pm 600, \pm 700$ и ± 800 мкс положения неподвижных звуковых образов достоверно не различались.

Очевидно, в рамках настоящего эксперимента траектории движущихся стимулов с $\Delta T = \pm 400$ мкс перекрывали линейную область кривых латерализации, где одинаковым приращениям ΔT соответствуют одинаковые приращения азимута, а лево- и правосторонние траектории выходили за пределы линейной области. Максимальная латерализация на периферии составляла не более 70 град, как и в работе Петропавловской и др. (2011), и поэтому латеральные траектории воспринимались как более короткие по сравнению с центральными.

По всей видимости, нелинейная зависимость воспринимаемого положения от ΔT являлась определяющим свойством локализации, действовавшим в равной степени на неподвижные стимулы и на траектории циклического движения. С учетом этого, при ограниченном диапазоне возможных ΔT для создания биений с максимальным размахом следует выбирать траектории в центральном секторе акустического пространства, пересекающие среднюю линию головы.

Влияние положения стационарного фрагмента на длину траекторий. Стимулы каждой пары (ЛП и ПЛ, ЛЦ и ЦЛ, ПЦ и ЦП) различались между собой только положением стационарного фрагмента. Влияние стационарного фрагмента на восприятие последующего за ним движения целесообразно рассматривать с точки зрения избирательной пространственной адаптации (Getzmann, Lewald, 2011).

Известно, что длительное воздействие адаптирующего стимула приводит к снижению чувствительности нейронов, специфичных к его признакам (Barlow and Hill, 1963; Movshon, Lennie, 1979; Maffei et al., 1973; Barlow, 1990). Тем самым избирательная адаптация (т.е. адаптация к определенным признакам стимула) приводит к смещению паттернов последующих ответов популяции нейронов по направлению от паттернов активации, исходно вызываемых адаптером (Clifford et al., 2000; Gutschalk et al., 2008).

Продолжительность воздействия адаптирующего стимула может варьировать в широких пределах, от нескольких секунд до сотен миллисекунд (Getzmann, Lewald, 2011; Андреева, 2015; Шестопалова и др., 2023). Применительно к пространственному слуху избирательная адаптация на уровне восприятия чаще всего проявляется как смещение воспринимаемого положения целевого стимула по направлению от адаптера (Salminen et al., 2012 (обзор); Carlile et al., 2001; Dingle et al., 2012, 2013; Шестопалова и др., 2023). В парадигме отсроченного движения начальный стационарный фрагмент стимула можно рассматривать как неподвижный адаптер, а реакцию на начало движения – как результат освобождения от избирательной адаптации и вовлечения в ответ новых групп нейронов (Getzmann, Lewald, 2011).

Предположительно центральный и латеральные стационарные фрагменты могли оказывать разное влияние на воспринимаемую длину траектории. Расширение воспринимаемой траектории в сторону от центрального адаптера (по сравнению с гипотетической траекторией без адаптации) ограничено пределом максимальной латерализации в области уха. Возможное расширение от латерального адаптера, при движении от периферии к центру, могло пересекать среднюю линию и распространяться вплоть до предела максимальной латерализации с противоположной стороны, поэтому траектории ЛЦ и ПЦ могли бы быть длиннее, чем ЦЛ и ЦП. Однако, различий между ними не обнаружено. Следовательно, влияние центрального и латеральных стационарных фрагментов на размах биений было одинаковым.

Влияние паттерна движения на длину траекторий. Согласно литературным данным (обзоры Garcia-Argibay et al., 2018; Basu, Banerjee, 2022), при изучении влияния бинауральных биений на память, внимание и психофизиологические состояния человека, биения принято характеризовать исключительно их частотным диапазоном, по аналогии с частотами ритмов мозга. Главным образом используются тета-, альфа-, бета- и гамма-полосы. При частотах от тета-полосы и выше бинауральные биения воспринимаются как пульсация, а не как циклическое движение. В целом, данных о влиянии скорости циклического движения на восприятие пространственных признаков звука в литературе нет.

С точки зрения пространственного слуха принципиально важно, что скорость циклического движения не обязательно связана с частотой биений, то есть с количеством циклов в секунду. В нашей работе разные скорости реализованы при одной и той же частоте биений (1 Гц), исключительно за счет паттерна междушумных различий. Проведенный нами эксперимент показал, что длина траектории, определявшая размах биений в субъективном пространстве, сильно зависела от паттерна изменений междушумной задержки ΔT , которым соответствуют разные скорости воспринимаемого движения.

Траектории медленного (плавного) движения были значимо короче, чем быстрого (ступенчатого) движения и чем расстояние между соответствующими неподвижными реперами. Эта закономерность справедлива как для центральных, так и для латеральных траекторий. Длина траекторий ступенчатого движения совпадала с расстоянием между неподвижными стимулами. Это значит, что усреднение бинауральной информации интегратором утечки не приводит к сокращению размаха биений, созданных посредством ступенчатой функции ΔT , по сравнению с расстоянием между неподвижными стимулами.

Описанные результаты кардинально отличаются от результатов недавней работы, в которой участок поступательного (нециклического) движения, создаваемого за счет междушумных различий по интенсивности ΔI , был заключен между двумя стационарными фрагментами (Саликова и др., 2023). По данным этой работы, скорость стимула не влияла на воспринимаемое положение траекторий движения. Можно предположить, что в цитированном исследовании скорость поступательного движения в среднем фрагменте не была значимым фактором из-за того, что начальный и конечный стационарные фрагменты были расположены на разных сторонах траектории, и именно они определяли локализацию движущихся сигналов в целом. Кроме того, в этой работе скорости моделировали как два разных наклона линейного изменения ΔI , что давало меньшую разницу между скоростями движения, чем в нашем эксперименте с плавным и мгновенным смещением.

Принципиальным отличием настоящего исследования является использование циклического движения. Это позволило расположить стационарные фрагменты в начале и конце стимула таким образом, что они совпадали по пространственным признакам, а воспринимаемое положение другого края траектории полностью определялось паттерном изменений ΔT в точке поворота. Если изменение ΔT в стимуле происходило бесконечно быстро, то в следующий интервал времени, соответствующий половине периода бинаурального биения, ΔT было постоянным. Если ширина временного окна интеграции была меньше этого интервала, усреднение бинауральной информации интегратором утечки не приводило к сокращению размаха биений. И наоборот, если изменение ΔT занимало весь полупериод биений, то нахождению в точке поворота соответствовал значительно меньший интервал времени. В таком случае уменьшение длины воспринимаемой траектории может объясняться усреднением

Таблица 1. Условные обозначения и расчетные положения траекторий движения дихотических звуковых стимулов

Код стимула	ΔT начальная и конечная, мкс	ΔT в точке поворота, мкс	Расчетная траектория движения
ЛЦ	-800	0	Слева к центру и обратно
ЦЛ	0	-800	От центра влево и обратно
ЛП	-400	+400	Слева направо и обратно
ПЛ	+400	-400	Справа налево и обратно
ЦП	0	+800	От центра вправо и обратно
ПЦ	+800	0	Справа к центру и обратно

бинауральной информации, предшествующей моменту поворота и следующей сразу после него.

Таким образом, при циклическом движении, длящемся 8 с, влияние положения начального и конечного стационарных фрагментов на воспринимаемую длину траектории движущегося стимула оказывается сведено к минимуму, а значимым фактором становится паттерн изменений ΔT . В основе эффекта паттерна лежат механизмы временной интеграции бинауральных признаков. Очевидно, что временная интеграция дает разные результаты при линейном изменении ΔT , моделирующем медленное движение, и при ступенчатом изменении, т.е. при мгновенном переключении между участками с постоянными ΔT , моделирующем быстрое движение. Эти аспекты слуховой обработки циклического движения требуют более подробного анализа на основе данных не только о длинах траекторий, но и о воспринимаемом положении начальных/конечных точек и точек поворота.

ВЫВОДЫ:

- использование шумовых стимулов как с линейным, так и скачкообразным паттерном междушумных различий позволяет получить выраженный эффект бинауральных биений в форме циклического движения;
- траектории циклического движения могут располагаться в разных частях субъективного пространства, в зависимости от диапазона значений междушумной задержки;
- размах биений зависит от диапазона изменений междушумных задержек. В центральном секторе субъективного слухового пространства размах биений больше, чем с левой или с правой стороны при тех же пределах изменения ΔT ;
- при фиксированной частоте биений их размах зависит от паттерна изменений междушумных задержек. При линейном паттерне воспринимаемые траектории были короче, чем при ступенчатом.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ № 24-25-00106.

УЧАСТИЕ АВТОРОВ

Шестопалова Лидия Борисовна – синтез звуковых стимулов, предварительная обработка данных, анализ результатов, подготовка публикации.

Петропавловская Екатерина Алексеевна – организация эксперимента, разработка скриптов

MatLab для регистрации и обработки данных, анализ результатов, подготовка публикации.

Саликова Диана Алиевна – проведение эксперимента, предварительная обработка данных, работа с источниками.

Летягин Павел Игоревич – проведение эксперимента, визуализация результатов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной статьи подтвердили отсутствие конфликта интересов, о котором необходимо сообщить.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Альтман Я. А. *Пространственный слух*. СПб: Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН, 2011. 311 с.
- Андреева И. Г. Последействие движения как универсальное явление для сенсорных систем, участвующих в ориентации в пространстве. II. Слуховое последействие. *Журнал эволюционной биохимии и физиологии*. 2015. Т. 51. № 3. С. 145–153.
- Блауэрт И. *Пространственный слух*. М.: Энергия, 1979. 225 с.
- Петропавловская Е. А., Шестопалова Л. Б., Вайтулевич С. Ф. Предсказательная способность слуховой системы при плавном движении и скачкообразном перемещении звуковых образов малой длительности. *Журнал ВНД*. 2011. Т. 61. № 3. С. 293–305.
- Саликова Д. А., Петропавловская Е. А., Шестопалова Л. Б. Искажение субъективного пространства в динамической акустической среде. *Интегративная физиология*. 2023. Т. 4. № 2. С. 198–212. DOI: 10.33910/2687-1270-2023-4-2-198-212
- Шестопалова Л. Б., Саликова Д. А., Петропавловская Е. А. Слуховое последействие: влияние неподвижного адаптера на восприятие движущегося стимула. *Журнал ВНД*. 2023. Т. 73. № 2. С. 256–270. DOI: 10.31857/S0044467723020107
- Barlow H. B. Vision: Coding and Efficiency. *A theory about the functional role and synaptic mechanism of visual after-effects*. New York. Ed. Cambridge University Press, 1990. P. 363–375.
- Akeroyd M. A. A binaural beat constructed from noise. *J. Acoust. Soc. Am.* 2010. V. 128. P. 3301–3304. DOI: 10.1121/1.3505122
- Barlow H. B., Hill R. M. Evidence for a physiological explanation of the waterfall phenomenon and figural after-effects. *Nature*. 1963. V. 28. P. 1345–1347. DOI: 10.1038/2001345a0
- Basu S., Banerjee B. Potential of binaural beats intervention for improving memory and attention: insights from meta-analysis and systematic review. *Psychol. Res.* 2022. V. 87(4). P. 951–963. DOI: 10.1007/s00426-022-01706-7
- Bernstein L. R., Trahiotis C. Binaural beats at high frequencies: listeners' use of envelope-based interaural temporal

- and intensity disparities. *J. Acoust. Soc. Am.* 1996. V. 99. P. 1670–1679. DOI: 10.1121/1.414689
- Bernstein L. R., Trahiotis C., Akeroyd M. A., Hartung K. Sensitivity to brief changes of interaural time and interaural intensity. *J. Acoust. Soc. Am.* 2001. V. 109. P. 1604–1615. DOI: 10.1121/1.1354203
- Blauert J. On the lag of lateralization caused by interaural time and intensity differences. *Audiology.* 1972. V. 11(5). P. 265–270. DOI: 10.3109/00206097209072591
- Carlile S., Leung J. The perception of auditory motion. *Trends Hear.* 2016. V. 20. P. 1–19. DOI: 10.1177/2331216516644254
- Carlile S., Hyams S., Delaney S. Systematic distortions of auditory space perception following prolonged exposure to broadband noise. *J. Acoust. Soc. Am.* 2001. V. 110. P. 416–424. DOI: 10.1121/1.1375843
- Clifford C. W., Wenderoth P., Spehar B. A functional angle on some after-effects in cortical vision. *Proc. Biol. Sci.* 2000. V. 267. P. 1705–1710. DOI: 10.1098/rspb.2000.1198
- Culling J. F., Summerfield Q. Measurements of the binaural temporal window using a detection task. *J. Acoust. Soc. Am.* 1998. V. 103. P. 3540–3553. DOI: 10.1121/1.423061
- Dingle R. N., Hall S. E., Phillips D. P. The three-channel model of sound localization mechanisms: Interaural level differences. *J. Acoust. Soc. Am.* 2012. V. 131(5). P. 4023–4029. DOI: 10.1121/1.3701877
- Dingle R. N., Hall S. E., Phillips D. P. The three-channel model of sound localization mechanisms: Interaural time differences. *J. Acoust. Soc. Am.* 2013. V. 133(1). P. 417–424. DOI: 10.1121/1.4768799
- Garcia-Argibay M., Santed M. A., Reales J. M. Efficacy of binaural auditory beats in cognition, anxiety, and pain perception: a meta-analysis. *Psychol. Res.* 2019. V. 83(2). P. 357–372. DOI:10.1007/s00426-018-1066-8
- Getzmann S., Lewald J. The effect of spatial adaptation on auditory motion processing. *Hear. Res.* 2011. V. 272(1-2). P. 21–29. DOI: 10.1016/j.heares.2010.11.005
- Getzmann S., Lewald J. Cortical processing of change in sound location: smooth motion versus discontinuous displacement. *Brain Res.* 2012. V. 1466. P. 119–127. DOI: 10.1016/j.brainres.2012.05.033
- Grantham D. W. Detectability of time-varying interaural correlation in narrow-band noise stimuli. *J. Acoust. Soc. Am.* 1982. V. 72(4). P. 1178–1184. DOI: 10.1121/1.388326
- Grantham D. W. Discrimination of dynamic interaural intensity differences. *J. Acoust. Soc. Am.* 1984. V. 76(1). P. 71–76. DOI:10.1121/1.391009
- Grantham D. W., Wightman F. L. Detectability of varying interaural temporal differences. *J. Acoust. Soc. Am.* 1978. V. 63(2). P. 511–523. DOI: 10.1121/1.381751
- Gutschalk A., Micheyl C., Oxenham A. J. The pulse-train auditory aftereffect and the perception of rapid amplitude modulations. *J. Acoust. Soc. Am.* 2008. V. 123(2). P. 935–945. DOI: 10.1121/1.2828057
- Kollmeier B., Gilkey R. H. Binaural forward and backward masking: evidence for sluggishness in binaural detection. *J. Acoust. Soc. Am.* 1990. V. 87. P. 1709–1719. DOI: 10.1121/1.399419
- Licklider J. C.R., Webster J. C., Hedlun J. M. On the frequency limits of binaural beats. *J. Acoust. Soc. Am.* 1950. V. 22. 468–473. DOI: 10.1121/1.1906629
- Maffei L., Fiorentini A., Bisti S. Neural correlates of perceptual adaptation to gratings. *Science.* 1973. V. 182. P. 1036–1038. DOI: 10.1126/science.182.4116.1036
- McFadden D., Pasanen E. G. Binaural beats at high frequencies. *Science.* 1975. V. 190(4212). P. 394–396. DOI: 10.1126/science.1179219
- Mills A. W. Lateralization of high-frequency tones. *JASA.* 1960. V. 32. P. 132–134
- Movshon J. A., Lennie P. Pattern-selective adaptation in visual cortical neurons. *Nature.* 1979. V. 278. P. 850–852. DOI: 10.1038/278850a0
- Perrott D. R., & Musicant A. D. Rotating tones and binaural beats. *J. Acoust. Soc. Am.* 1977. V. 61(5). P. 1288–1292. DOI: 10.1121/1.381430
- Perrott D. R., Nelson M. A. Limits for the detection of binaural beats. *J. Acoust. Soc. Am.* 1969. V. 46(6). P. 1477–1481. DOI: 10.1121/1.1911890
- Saberi K. Lateralization of comodulated complex waveforms. *J. Acoust. Soc. Am.* 1995. V. 98. P. 3146–3156. DOI: 10.1121/1.413804
- Salminen N. H., Tiitinen H., May P. J. Auditory spatial processing in the human cortex. *The Neuroscientist.* 2012. V. 18(6). P. 602–612. doi:10.1177/1073858411434209
- Shestopalova L., Petropavlovskaja E., Semenova V., Nikitin N. Brain oscillations evoked by sound motion. *Brain Res.* 2021. V. 1752. p. 147232. DOI: 10.1016/j.brainres.2020.147232
- Shestopalova L., Petropavlovskaja E., Vaitulevich S., Vasilenko Yu., Nikitin N., Altman J. Discrimination of auditory motion patterns: mismatch negativity study. *Neuropsychologia.* 2012. V. 50. P. 2720–2729. DOI: 10.1016/j.neuropsychologia.2012.07.043

PERCEIVED TRAJECTORIES OF CYCLIC SOUND MOVEMENT

L. B. Shestopalova[#], E. A. Petropavlovskaja, D. A. Salikova, P. I. Letyagin

Pavlov Institute of Physiology, Russian Academy of Sciences, 199034 St.-Petersburg, Makarova embankment, 6, Russia

[#] *E-mail: shestopalovalb@infran.ru; shestolido@mail.ru*

Binaural beats are a phenomenon that occurs during dichotic stimulation due to binaural integration. It takes the form of cyclic movement of the sound image in the listener's acoustic space when the beat frequency range is below 3 Hz. Our subjects used the inserted earphones to listen to the stimuli that created a sense of sound movement due

to changes in the interaural time difference (ITD). We used three types of dichotic stimuli which simulated smooth azimuthal cyclic movement and cyclic abrupt shifts. The ITD changes determined central or lateral positions of movement trajectories. The results confirm that both types of movement created the effect of binaural beats. The range of beats depended on the spatial position of the trajectory: in the frontal sector of acoustic space, the range of beats was greater than on the left or right. The perceived trajectories of smooth motion were shorter than the trajectories of abrupt shift. The influence of spatial position on the perceived trajectory length is interpreted from the standpoint of nonlinear features of lateralization. It is suggested that the effect of ITD pattern on the perceived trajectory length is mediated by temporal integration mechanisms of binaural hearing.

Keywords: binaural beat, spatial hearing, binaural integration, interaural time difference

REFERENCES

- Altman Ya. A. *Prostranstvennyi slukh*. SPb: Institut fiziologii im. I.P. Pavlova RAN, 2011. 311 s. (In Russian).
- Andreeva I. G. Posledeystvie dvizheniya kak universal'noe yavlenie dlya sensorynykh sistem, uchastvuyushchikh v orientatsii v prostranstve. II. Slukhovoje posledeystvie. *Zhurnal evolyutsionnoy biokhimii i fiziologii*. 2015. V. 51(3). P. 145–153 (In Russian).
- Blauert I. *Prostranstvennyi slukh* [Spatial Hearing]. Moscow: Energiya, 1979. 225 p. (In Russian).
- Petropavlovskaja E. A., Shestopalova L. B., Vaitulevich S. F. Predictive ability of the auditory system during smooth and abrupt movements of low-intensity sound images. *Journal of higher nervous activity*. 2023. V. 61(3). P. 293–305. (In Russian).
- Salikova D., Petropavlovskaja E., Shestopalova L. Distortion of human auditory space in a dynamic acoustic environment. *Integrative Physiology*. 2023. V. 4(2). P. 198–212. DOI: 10.33910/2687-1270-2023-4-2-198-212. (In Russian).
- Shestopalova L., Salikova D., Petropavlovskaja E. Auditory after-effect: stationary adapter changes the perceived trajectories of moving sounds. *Journal of higher nervous activity*. 2023. V. 73(2). P. 256–270. (In Russian).
- Barlow H. B. Vision: Coding and Efficiency. *A theory about the functional role and synaptic mechanism of visual after-effects*. New York. Ed. Cambridge University Press, 1990. P. 363–375.
- Akeroyd M. A. A binaural beat constructed from noise. *J. Acoust. Soc. Am.* 2010. V. 128. P. 3301–3304. DOI: 10.1121/1.3505122
- Barlow H. B., Hill R. M. Evidence for a physiological explanation of the waterfall phenomenon and figural after-effects. *Nature*. 1963. V. 28. P. 1345–1347. DOI: 10.1038/2001345a0
- Basu S., Banerjee B. Potential of binaural beats intervention for improving memory and attention: insights from meta-analysis and systematic review. *Psychol. Res.* 2022. V. 87(4). P. 951–963. DOI: 10.1007/s00426-022-01706-7
- Bernstein L. R., Trahiotis C. Binaural beats at high frequencies: listeners' use of envelope-based interaural temporal and intensity disparities. *J. Acoust. Soc. Am.* 1996. V. 99. P. 1670–1679. DOI: 10.1121/1.414689
- Bernstein L. R., Trahiotis C., Akeroyd M. A., Hartung K. Sensitivity to brief changes of interaural time and interaural intensity. *J. Acoust. Soc. Am.* V. 2001. V. 109. P. 1604–1615. DOI: 10.1121/1.1354203
- Blauert J. On the lag of lateralization caused by interaural time and intensity differences. *Audiology*. 1972. V. 11(5). P. 265–270. DOI: 10.3109/00206097209072591
- Carlile S., Leung J. The perception of auditory motion. *Trends Hear.* 2016. V. 20. P. 1–19. DOI: 10.1177/2331216516644254
- Carlile S., Hyams S., Delaney S. Systematic distortions of auditory space perception following prolonged exposure to broadband noise. *J. Acoust. Soc. Am.* 2001. V. 110. P. 416–424. DOI: 10.1121/1.1375843
- Clifford C. W., Wenderoth P., Spehar B. A functional angle on some after-effects in cortical vision. *Proc. Biol. Sci.* 2000. V. 267. P. 1705–1710. DOI: 10.1098/rspb.2000.1198
- Culling J. F., Summerfield Q. Measurements of the binaural temporal window using a detection task. *J. Acoust. Soc. Am.* 1998. V. 103. P. 3540–3553. DOI: 10.1121/1.423061
- Dingle R. N., Hall S. E., Phillips D. P. The three-channel model of sound localization mechanisms: Interaural level differences. *J. Acoust. Soc. Am.* 2012. V. 131(5). P. 4023–4029. DOI: 10.1121/1.3701877
- Dingle R. N., Hall S. E., Phillips D. P. The three-channel model of sound localization mechanisms: Interaural time differences. *J. Acoust. Soc. Am.* 2013. V. 133(1). P. 417–424. DOI: 10.1121/1.4768799
- Garcia-Argibay M., Santed M. A., Reales J. M. Efficacy of binaural auditory beats in cognition, anxiety, and pain perception: a meta-analysis. *Psychol. Res.* 2019. V. 83(2). P. 357–372. DOI:10.1007/s00426-018-1066-8
- Getzmann S., Lewald J. The effect of spatial adaptation on auditory motion processing. *Hear. Res.* 2011. V. 272(1-2). P. 21–29. DOI: 10.1016/j.heares.2010.11.005
- Getzmann S., Lewald J. Cortical processing of change in sound location: smooth motion versus discontinuous displacement. *Brain Res.* 2012. V. 1466. P. 119–127. DOI: 10.1016/j.brainres.2012.05.033
- Grantham D. W. Detectability of time-varying interaural correlation in narrow-band noise stimuli. *J. Acoust. Soc. Am.* 1982. V. 72(4). P. 1178–1184. DOI: 10.1121/1.388326
- Grantham D. W. Discrimination of dynamic interaural intensity differences. *J. Acoust. Soc. Am.* 1984. V. 76(1). P. 71–76. DOI:10.1121/1.391009
- Grantham D. W., Wightman F. L. Detectability of varying interaural temporal differences. *J. Acoust. Soc. Am.* 1978. V. 63(2). P. 511–523. DOI: 10.1121/1.381751

- Gutschalk A., Micheyl C., Oxenham A. J. The pulse-train auditory aftereffect and the perception of rapid amplitude modulations. *J. Acoust. Soc. Am.* 2008. V. 123(2). P. 935–945. DOI: 10.1121/1.2828057
- Kollmeier B., Gilkey R. H. Binaural forward and backward masking: evidence for sluggishness in binaural detection. *J. Acoust. Soc. Am.* 1990. V. 87. P. 1709–1719. DOI: 10.1121/1.399419
- Licklider J. C.R., Webster J. C., Hedlun J. M. On the frequency limits of binaural beats. *J. Acoust. Soc. Am.* 1950. V. 22. 468–473. DOI: 10.1121/1.1906629
- Maffei L., Fiorentini A., Bisti S. Neural correlates of perceptual adaptation to gratings. *Science*. 1973. V. 182. P. 1036–1038. DOI: 10.1126/science.182.4116.1036
- McFadden D., Pasanen E. G. Binaural beats at high frequencies. *Science*. 1975. V. 190(4212). P. 394–396. DOI: 10.1126/science.1179219
- Mills A. W. Lateralization of high-frequency tones. *JASA*. 1960. V. 32. P. 132–134.
- Movshon J. A., Lennie P. Pattern-selective adaptation in visual cortical neurons. *Nature*. 1979. V. 278. P. 850–852. DOI: 10.1038/278850a0
- Perrott D. R., Musicant A. D. Rotating tones and binaural beats. *J. Acoust. Soc. Am.* 1977. V. 61(5). P. 1288–1292. DOI: 10.1121/1.381430
- Perrott D. R., Nelson M. A. Limits for the detection of binaural beats. *J. Acoust. Soc. Am.* 1969. V. 46(6). P. 1477–1481. DOI: 10.1121/1.1911890
- Saberi K. Lateralization of comodulated complex waveforms. *J. Acoust. Soc. Am.* 1995. V. 98. P. 3146–3156. DOI: 10.1121/1.413804
- Salminen N. H., Tiitinen H., May P. J. Auditory spatial processing in the human cortex. *The Neuroscientist*. 2012. V. 18(6). P. 602–612. DOI: 10.1177/1073858411434209
- Shestopalova L., Petropavlovskaja E., Semenova V., Nikitin N. Brain oscillations evoked by sound motion. *Brain Res.* 2021. V. 1752. P. 147232. DOI: 10.1016/j.brainres.2020.147232
- Shestopalova L., Petropavlovskaja E., 2012 Vaitulevich S., Vasilenko Yu., Nikitin N., Altman J. Discrimination of auditory motion patterns: mismatch negativity study. *Neuropsychologia*. V. 50. P. 2720–2729. DOI:10.1016/j.neuropsychologia.2012.07.043