

## ЛОКАЛИЗАЦИЯ ТОЧЕК ПОВОРОТА ПРИ РИТМИЧЕСКОМ ДВИЖЕНИИ ЗВУКОВОГО ОБРАЗА

© 2024 г. Л. Б. Шестопалова\*, Е. А. Петропавловская, Д. А. Саликова, П. И. Летягин

ФГБУН Институт физиологии имени И.П. Павлова РАН, Санкт-Петербург, Россия

\*E-mail: shestopalovalb@infran.ru, shestolido@mail.ru

Поступила в редакцию 24.05.2024 г.

После доработки 02.07.2024 г.

Принята к публикации 16.07.2024 г.

Исследовали локализацию точек старта и поворота при ритмическом движении звукового образа, созданном путем моделирования бинауральных биений (ББ) широкополосных сигналов. Стимулы для моделирования ББ содержали начальный и конечный неподвижные участки и участок циклического движения между ними. Пространственные эффекты создавались путем изменений межшумной задержки ( $\Delta T$ ). Во время эксперимента испытуемые оценивали положение концов траектории движения или положение неподвижных реперов с помощью графического планшета. Установлено, что интеграционная способность бинауральной слуховой системы существенно влияла на восприятие ритмического движения звукового образа. Результаты показали, что при мгновенном переключении между неподвижными участками воспринимаемое положение концов траекторий (точек старта, точек поворота) совпадало с положением реперов. При плавном движении между теми же крайними значениями наблюдалось смещение положения концов траекторий: точки поворота локализовались дальше от реперов по сравнению с точками старта при всех положениях траекторий в пространстве. Критическим фактором, определяющим локализацию концов траектории, являлось время нахождения звукового образа вблизи точки поворота. Полученные закономерности были значительно выражены в центральной области акустического пространства по сравнению с периферической.

*Ключевые слова:* бинауральные биения, циклическое движение, широкополосные сигналы, траектория движения, локализация звука.

DOI: 10.31857/S0131164624050015, EDN: AORDFG

Способность определять положение движущихся источников звука является важнейшим аспектом пространственного восприятия. Исследования в этой области традиционно фокусировались на обнаружении или распознавании движения. Психологические измерения в таких экспериментах были относительными, поскольку опирались на сравнение слушателем тестового стимула с эталонным. Типичным примером этого подхода являются измерения минимального различимого угла движения (*minimum audible movement angle, МАМА*) [1].

Меньшее количество работ основывалось на локализационных задачах, в которых воспринимаемое положение источника звука или звукового образа измеряется в радиальных координатах. Направление на источник звука в горизонтальной и вертикальной плоскостях (азимут и элевация) измеряют в градусах, а расстояние до источника звука (приближение и удаление) — в метрах. В условиях дихотической стимуляции установлено соответствие между величиной межшумных различий

по времени ( $\Delta T$ ) и интенсивности ( $\Delta I$ ) с азимутальным положением звукового образа [2]. В свободном звуковом поле при движении источника звука в горизонтальной плоскости было показано угловое смещение воспринимаемого положения стимула относительно объективного (напр., [3]). В условиях дихотической стимуляции отсутствует объективно заданное положение сигналов, поэтому при локализации движущихся звуковых образов для сравнения используется воспринимаемое положение неподвижного реперного стимула, имеющего такие же локализационные параметры, как начальные или конечные точки траекторий движения. В частности, в работах [4, 5] в дихотических условиях было показано смещение воспринимаемого положения движущихся стимулов относительно неподвижных. В настоящей работе также применяется этот подход.

Быстродействие и инерционность пространственного слуха в отношении движущихся источников звука определяется интеграционной

способностью бинауральной слуховой системы при обработке информации, поступающей от ушей. Согласно концепции временного интегрирования, пространственное ощущение, возникающее в каждый отдельный момент, является средневзвешенной величиной ощущений от текущего и прошлых событий [1, 6–8]. Интегрирование лежит в основе сглаживающей функции бинауральной системы, которая оказывает разное воздействие на сигналы с разным паттерном междушумных различий.

Достижения современной нейрофизиологии вновь актуализировали применение феномена бинауральных биений, в том числе циклического движения, для изучения инерционных свойств пространственного слуха. ББ — это периодические изменения громкости или циклическое движение звукового образа от одного уха к другому, возникающие в условиях дихотической подачи звуковых сигналов. В классическом варианте парадигма ББ предполагает предъявление на два уха тональных сигналов, немного различающихся по частоте. ББ воспринимаются как циклические перемещения звукового образа только при различиях между частотами двух тонов порядка 1–3 Гц [3, 9]. При дихотической стимуляции шумовыми стимулами в парадигме ББ было показано, что перемещение звукового образа в таком случае различается более отчетливо, чем при использовании тональных стимулов [10]. Для настоящего исследования были созданы шумовые стимулы, содержащие циклическое движение. Для оценки действия сглаживающей функции сравнили восприятие двух паттернов изменений положения — плавного линейного движения и мгновенного скачкообразного перемещения.

В последние десятилетия многие психофизические исследования реакции на движение проводятся на основе парадигмы отсроченного движения, предполагающей разнесение во времени момента включения стимула и момента начала движения. Исходно такой способ стимуляции применялся в электрофизиологии, поскольку позволял получать вызванные потенциалы на начало движения (*motion-onset response, MOR*) как на отдельное слуховое событие, без перекрывания с вызванными ответами на включение сигнала [11, 12]. Стимул с отсроченным движением обычно состоит из неподвижного участка длительностью не менее 500 мс, за которым без паузы следует участок движения. В конце стимула также может быть добавлен неподвижный участок. С перцептивной точки зрения звуковые стимулы с отсроченным движением воспринимаются как один непрерывный звуковой образ, изменяющий свое положение в пространстве.

В настоящей работе при моделировании ББ также используется парадигма отсроченного движения: участок циклического движения заключен между неподвижными участками с одинаковыми пространственными характеристиками. Стимул

перемещается от места расположения начального неподвижного участка до точки поворота и возвращается к началу. Такой цикл повторяется несколько раз и завершается еще одним неподвижным участком, расположенным там же, где и начальный. Таким образом, каждая траектория заключена между положением неподвижного участка на одном конце и точкой поворота на другом. Можно предполагать, что включение и выключение стимула в большей мере привлекают произвольное внимание слушателя, чем смены направления движения в средней части сигнала. Пространственное внимание и наличие неподвижных фрагментов могут оказывать существенное влияние на локализацию и вносить вклад в отличие смещения воспринимаемого положения точек поворота от смещения концов траекторий относительно реперов.

Задача данной работы — исследовать смещение крайних точек траекторий относительно положения реперных стимулов при разной локализации траекторий в пространстве и при разных паттернах изменения междушумных различий по времени. Эти данные позволят оценить влияние бинаурального сглаживания на локализацию неподвижных участков сигнала и участков движения.

## МЕТОДИКА

*Условия эксперимента и испытуемые.* В экспериментах принимали 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 12 мужчин и 10 женщин, средний возраст  $27 \pm 7$  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 предъявляли звуковые сигналы. В исследовании чередовались активные серии с определением воспринимаемого положения сигналов и пассивные серии с регистрацией электроэнцефалограммы при прослушивании тех же сигналов. Исследование с участием каждого испытуемого проводили в течение 3–4 экспериментальных дней (в удобном для испытуемого режиме) по 2–4 ч работы, с перерывами на отдых по требованию. Активные серии занимали приблизительно четверть экспериментального времени. В данной работе рассматривали только результаты психофизического эксперимента в активных сериях.

*Стимулы.* В условиях моделирования ББ стимулы содержали начальный и конечный неподвижные участки и участок циклического движения между ними (рис. 1, А). Пространственные эффекты создавали при помощи изменений междушумной задержки ( $\Delta T$ ). На начальном и конечном участках

величина  $\Delta T$  принимала одно из постоянных значений:  $\pm 800$ ,  $\pm 400$  или  $0$  мкс в разных стимулах. Интенсивность сигнала на начальном участке плавно нарастала, а на конечном участке плавно спадала по косинусоидальному закону в течение  $500$  мс, чтобы минимизировать влияние включения и выключения на локализацию сигнала. Движение каждого стимула начиналось в месте расположения начального участка, достигало максимального удаления от него – точки поворота, величина  $\Delta T$  в которой отличалась от исходной на  $800$  мкс. Затем стимул возвращался к началу, цикл повторялся несколько раз и завершался неподвижным участком там же, где начинался. Концы каждой траектории имеют названия – “точка старта” (расположенная в области неподвижных участков) и “точка поворота” (наиболее удаленная от неподвижных участков).

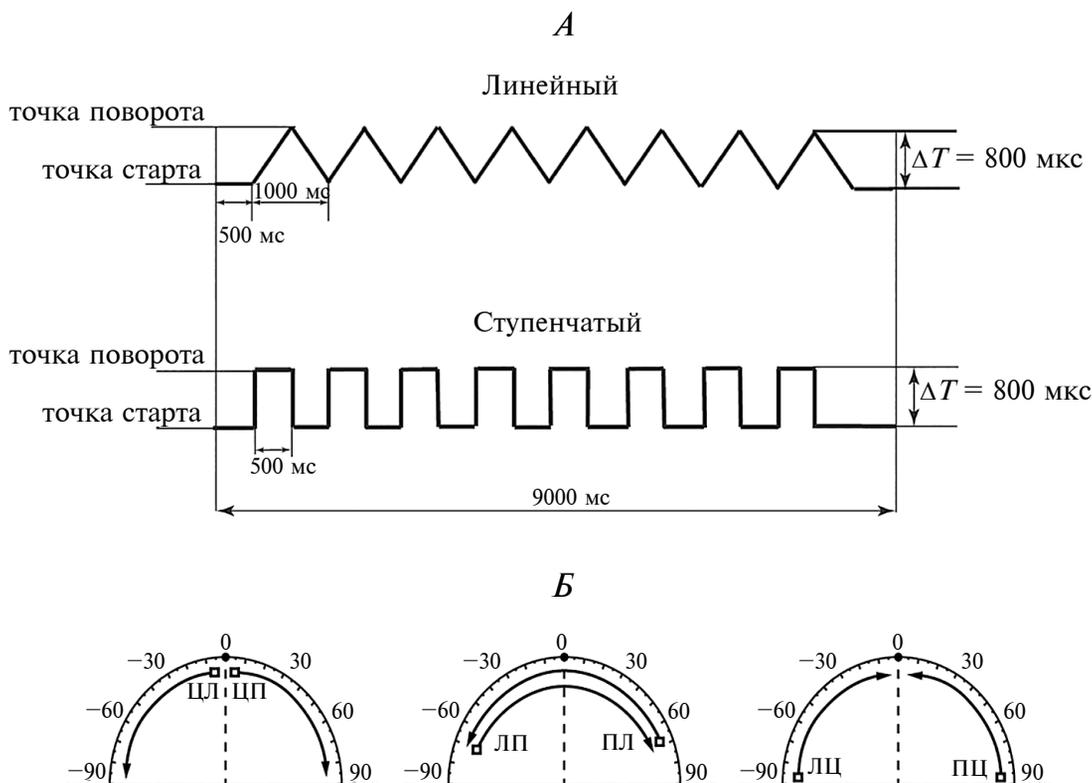
Для оценки влияния положения неподвижных участков на воспринимаемую длину траекторий были созданы три пары траекторий (рис. 1, Б): с точкой старта в центре (ЦЛ и ЦП), с точкой старта левее или правее центра (ЛП и ПЛ), с точкой старта около левого или правого уха (ЛЦ и ПЦ).

Расположение точек поворота показано на рис. 1, Б стрелками.

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 длительностью  $9000$  мс:

1. Стимулы, моделирующие плавное циклическое движение по азимуту между двумя фиксированными положениями, соответствовавшими  $\Delta T = \pm 800$ ,  $\pm 400$  или  $0$  мкс. В средней части стимула (между неподвижными участками) величина  $\Delta T$  изменялась линейно на  $800$  мкс за  $500$  мс (относительно  $\Delta T$  начального участка), а затем возвращалась к исходному значению за следующие  $500$  мс. Такой цикл изменений  $\Delta T$  с периодом  $1000$  мс повторялся  $8$  раз. Смена направления движения на противоположное происходила каждые  $500$  мс. Данный сигнал обозначается в дальнейшем как “линейный” (Лин).

2. Стимулы, моделирующие циклическое мгновенное перемещение звукового образа. В этом случае в средней части сигнала величина  $\Delta T$  изменялась мгновенно (относительно  $\Delta T$  начального участка) на  $800$  мкс и оставалась постоянной в



**Рис. 1.** Схема изменения межуршной задержки  $\Delta T$  и расчетные положения траекторий движения бинауральных звуковых стимулов.

А – по горизонтали – время (мс), по вертикали – величина межуршной задержки ( $\Delta T$ , мкс). Б – разные положения траекторий циклического движения в субъективном слуховом пространстве.

течение 500 мс, а затем мгновенно возвращалась к исходному значению и снова оставалась постоянной в течение 500 мс. В этом сигнале положение звукового образа скачкообразно менялось каждые 500 мс между двумя фиксированными положениями, соответствовавшими  $\Delta T = \pm 800, \pm 400$  или 0 мкс. Полный цикл движения также длился 1000 мс и повторялся 8 раз. Такой сигнал обозначается в дальнейшем как “ступенчатый” (Ступ).

3. Реперные стимулы (Рп), моделирующие неподвижные звуковые образы, расположенные в разных точках левой и правой полусферы субъективного акустического пространства. Межушная задержка в этих стимулах принимала постоянные значения  $\pm 800, \pm 600, \pm 400, \pm 200$  и 0 мкс. Длительность стимула составляла 2000 мс, включая фронты нарастания и спада по 500 мс, сглаженные косинусоидальной функцией. При каждом предъявлении репер повторялся по три раза с интервалами 1000 мс, после чего регистрировался ответ испытуемого о положении звукового образа.

Сигналы преобразовывали в аналоговую форму при помощи многоканальной звуковой карты *Gina24 (Echo Audio, США)* и предъявляли дихотически с помощью звукоизлучателей *Etymotic ER-2 (Etymotic Research Inc., США)*. Звуководы излучателей фиксировали в слуховых проходах с помощью ушных вставок, которые обеспечивали подавление внешних шумов на 30 дБ. Неравномерность амплитудно-частотных характеристик звукоизлучателей в диапазоне 0.1–10 кГц составляла  $\pm 3$  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. В дальнейшем интенсивность сигналов на левом и правом канале устанавливали на уровне 50 дБ над порогом слышимости.

Во время эксперимента звуковые стимулы были сгруппированы в серии в соответствии с типом сигнала, задаваемым паттерном  $\Delta T$  (ступенчатый, линейный, репер). Испытуемый получал инструкцию, прослушать каждый стимул до конца (все 8 циклов движения либо все 3 повторения репера), а затем при помощи графического планшета указать на схеме положение концов траектории движения или положение репера. При локализации движущихся стимулов испытуемых просили по возможности игнорировать положение звукового образа в момент включения и выключения и оценивать только траекторию циклического движения в средней части стимула. Временной интервал между ответом слушателя и подачей следующего стимула подбирался индивидуально, как удобный для работы промежутков, и составлял 1200–1500 мс.

В ходе одной серии стимулы каждого вида повторялись 8 раз в псевдослучайном порядке, а каждую серию предъявляли 3 раза. Таким образом, каждый вид стимула предъявляли испытуемому 24 раза. Чередуя серии рандомизировали индивидуально и по всей группе испытуемых. Длительность серии – 12–15 мин, в зависимости от темпа работы испытуемого.

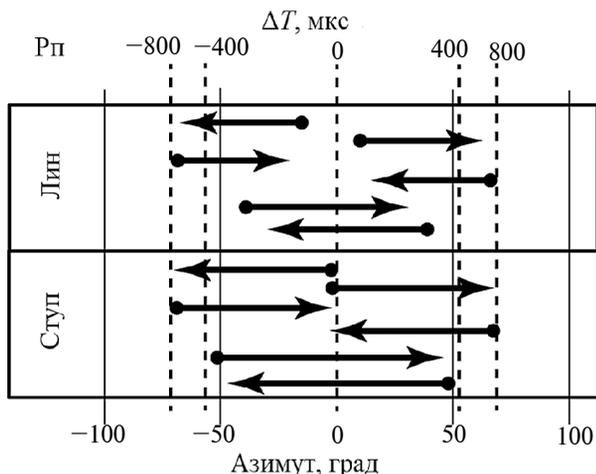
*Анализ данных.* Воспринимаемое положение концов траекторий стимулов регистрировали в градусах относительно средней линии головы. Регистрацию ответов испытуемого осуществляли при помощи графического планшета *Genius G-pen (KYE Systems Corp., Тайвань)* 450 с изображением дуги на рабочем поле, на которую испытуемый должен был мысленно спроецировать воспринимаемое положение интернализованного звукового образа и отметить его стилусом.левой половине слухового пространства соответствовали отрицательные величины, а правой – положительные. Затем для каждого типа стимулов полученные значения усредняли по индивидуальным данным, а также по всей группе в целом. После исключения случайных ошибок (касание стилуса за пределами дуги) каждое индивидуальное значение соответствовало усреднению 20–24 измерений. Для дальнейшего статистического анализа все значения, полученные при предъявлении сигналов слева, умножали на  $-1$ , чтобы они располагались в том же диапазоне числовой оси, что и значения, соответствующие правой стороне. Для сигналов, у которых  $\Delta T$  изменялась в пределах  $\pm 400$  мкс, сторону предъявления определяли по точке старта. После такого преобразования положительные значения соответствуют случаям, когда воспринимаемое положение находилось в той же половине субъективного слухового пространства, что и расчетное, а отрицательные значения – в противоположном относительно расчетного.

Для последующего анализа были приняты следующие названия фактора, связанного со структурой циклического движения, и его уровней: Событие (Реперный стимул (Рп), неподвижный участок сигнала с линейным изменением  $\Delta T$  (Нп\_Лин), поворот сигнала с линейным изменением  $\Delta T$  (П\_Лин), неподвижный участок сигнала с мгновенным (ступенчатым) изменением  $\Delta T$  (Нп\_Ступ), поворот сигнала с мгновенным (ступенчатым) изменением  $\Delta T$  (П\_Ступ)).

Измеренные величины подвергали 3-факторному дисперсионному анализу (*repeated measures ANOVA, rmANOVA*) с факторами Событие (Рп, Нп\_Лин, П\_Лин, Нп\_Ступ, П\_Ступ)  $\times \Delta T$  (0, 400, 800 мкс)  $\times$  Сторона (Слева, Справа). При парных сравнениях по фактору Событие использовали поправку Шидака, а для факторов  $\Delta T$  и Сторона – поправку Бонферрони. Все сравнения проводили с уровнем значимости 0.05.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Все слушатели уверенно определяли положение концов траекторий как плавного, так и ступенчатого сигнала. Воспринимаемые положения реперных стимулов и траектории стимулов с циклическим движением приведены на рис. 2. В результате 3-факторного дисперсионного анализа *rmANOVA* (Событие (Рп, Нп\_Лин, П\_Лин, Нп\_Ступ, П\_Ступ) ×  $\Delta T$ (0, 400, 800 мкс) × Сторона (Слева, Справа)) обнаружены значимые главные эффекты События ( $F(2.53, 53.15) = 4.76, p < 0.01, \eta^2 = 0.19$ ) и  $\Delta T$  ( $F(1.56, 32.79) = 514.79, p < 0.001, \eta^2 = 0.96$ ), а также их взаимодействие ( $F(3.80, 79.85) = 40.68, p < 0.001, \eta^2 = 0.66$ ). Сторона звучания не оказывала значимого воздействия на ответы слушателей, поэтому дальнейший анализ проводился



**Рис. 2.** Воспринимаемые траектории движущихся стимулов (стрелки) и локализация реперов с  $\Delta T = \pm 800, \pm 400$  и 0 мкс (пунктирные линии). Острый конец стрелки показывает локализацию точки поворота, тупой конец – локализацию точки старта. Шкала внизу – азимутальный угол в градусах. Отрицательные значения азимута соответствуют левой половине субъективного акустического пространства, положительные – правого.

после усреднения лево- и правосторонних ответов. Воспринимаемые положения точек старта и точек поворота (в градусах азимута), усредненные между сторонами предъявления, приведены в табл. 1.

Как и следовало ожидать, ответы на разные  $\Delta T$  достоверно различались при всех типах стимула ( $p < 0.001$ ). Интерес для настоящей работы представляют сравнения воспринимаемого положения крайних точек траекторий плавного и ступенчатого движения между собой и с неподвижными реперами.

Сравнения Нп\_Лин и Нп\_Ступ с Рп показывают смещение воспринимаемого положения точек старта относительно положения репера. Сравнения П\_Лин и П\_Ступ с Рп показывают смещение воспринимаемого положения точек поворота относительно репера. В случае линейного изменения  $\Delta T$ , Нп\_Лин отличается от Рп при  $\Delta T = 0$  и 400 мкс ( $p < 0.05$  и  $p < 0.001$ ), а П\_Лин – при  $\Delta T = 0, 400$  и 800 мкс ( $p < 0.001$ ) (рис. 3). При мгновенном изменении  $\Delta T$  ни Нп\_Ступ, ни П\_Ступ не отличаются от соответствующих реперов ( $p > 0.05$ ).

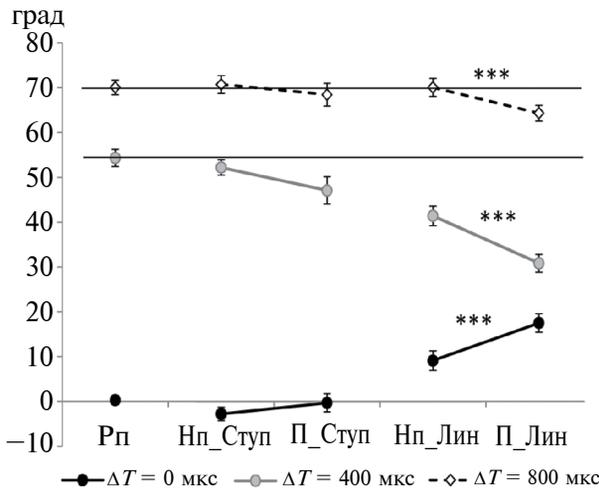
Сравнения между типами сигналов Нп\_Лин и Нп\_Ступ, П\_Лин и П\_Ступ показывают зависимость локализации концов траекторий не от факта движения как такового (как в предыдущем сравнении с неподвижным репером), а от паттерна изменения  $\Delta T$ . В этом сравнении проявляется значимое взаимодействие Событие ×  $\Delta T$ . Нп\_Лин отличается от Нп\_Ступ, а П\_Лин отличается от П\_Ступ при  $\Delta T = 0$  и 400 мкс ( $p < 0.001$ ), но характер различий противоположный: при  $\Delta T = 0$  мкс Нп\_Лин и П\_Лин расположены дальше от средней линии головы, чем Нп\_Ступ и П\_Ступ, а при  $\Delta T = 400$  мкс – ближе. В то же время Нп\_Лин и П\_Лин локализованы дальше от неподвижных реперов с  $\Delta T = 0$  и 400 мкс, чем Нп\_Ступ и П\_Ступ.

Далее следует сравнить воспринимаемое положение точек старта и точек поворота при одном и том же паттерне движения и значении  $\Delta T$ : Нп\_Лин и П\_Лин, Нп\_Ступ и П\_Ступ (рис. 3). Важно подчеркнуть, что в это сравнение входят не крайние точки одной и той же траектории, а положения

**Таблица 1.** Воспринимаемые угловые положения точек старта и точек поворота (среднее значение ± стандартная ошибка)

Тип События	$\Delta T = 0$ мкс	$\Delta T = 400$ мкс	$\Delta T = 800$ мкс
Рп	0±1	54±2	70±2
Нп_Ступ	-3±2	52±2	71±2
П_Ступ	0±2	47±3	68±3
Нп_Лин	<b>9±2</b>	<b>41±2</b>	70±2
П_Лин	<b>18±2</b>	<b>31±2</b>	<b>64±2</b>

*Примечание:* жирным шрифтом выделены значения, значимо отличающиеся от реперных в попарных сравнениях (пояснения в тексте).



**Рис. 3.** Воспринимаемое положение точек старта и точек поворота при разных значениях  $\Delta T$ . По оси  $X$  – виды слуховых событий, по оси  $Y$  – локализация соответствующих им звуковых образов (градусы азимута). Тонкими горизонтальными линиями показано воспринимаемое положение реперов. Звездочками обозначены статистически значимые различия между положениями точек старта и поворота, локализованных вблизи одного и того же репера.

точек старта и поворота, принадлежащих разным траекториям, но локализуемых вблизи одного и того же репера. Нп\_Ступ и П\_Ступ не различаются ни при каких значениях  $\Delta T$  ( $p > 0.05$ ), тогда как в случае плавного движения данное сравнение дополнительно проясняет суть значимого взаимодействия Событие  $\times \Delta T$ . При  $\Delta T = 0$  мкс П\_Лин находится дальше от средней линии, чем Нп\_Лин ( $p < 0.001$ ), а при  $\Delta T = 400$  и  $800$  мкс – наоборот, П\_Лин ближе к средней линии, чем Нп\_Лин ( $p < 0.001$ ). Однако при всех  $\Delta T$  общая закономерность такова, что поворот П\_Лин локализован дальше от репера, чем неподвижный участок Нп\_Лин. Во всех случаях это соответствует сближению воспринимаемых положений крайних точек и сокращению длины траектории для стимулов, содержащих плавное циклическое движение.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследовали локализацию крайних точек траекторий ББ, воспринимаемых как циклическое перемещение звуковых образов в разных частях субъективного акустического пространства. Начальный и конечный стационарные участки стимулов соответствовали парадигме отсроченного движения (*delayed motion*), а средняя часть – циклическому изменению положения. Плавное движение в пределах каждого цикла моделировали при помощи линейных изменений межзудной задержки  $\Delta T$ , а мгновенное перемещение – при помощи

скачкообразных переключений между двумя фиксированными значениями  $\Delta T$ .

Согласно полученным данным, воспринимаемое положение концов траекторий (как точек старта, так и точек поворота) отличалось от положения реперов только при плавном движении. При  $\Delta T = 0$  и  $400$  мкс концы траекторий плавного движения были расположены дальше от реперов, чем концы траекторий мгновенного перемещения. Иными словами, крайние точки траекторий плавного движения сближались в пространстве, а длина траекторий движения уменьшалась. В основе данного эффекта лежит инерционность (*sluggishness*) бинауральной слуховой системы, из-за которой смещение источника звука обнаруживается не мгновенно, а только после некоторого промежутка времени, необходимого для интеграции акустической информации. Механизмы временной интеграции обеспечивают сглаживающую функцию бинаурального слуха [1].

Анализ литературы показывает, что ширина временного окна интеграции определялась разными авторами при помощи различных несопоставимых друг с другом методик, поэтому результаты варьируются от нескольких десятков миллисекунд (граничные условия возникновения ощущения движения: [2, 13]) до нескольких сотен миллисекунд (определение пространственной разрешающей способности слуха: [1, 14, 15]). В целом, эти и ряд других авторов сходятся в оценке ширины окна интеграции как интервала менее  $500$  мс [16–19].

Интерпретируя результаты с точки зрения окна интеграции, нужно подчеркнуть, что в случае ступенчатого паттерна величина  $\Delta T$  была постоянной в течение половины каждого периода ББ ( $500$  мс) и совпадала с  $\Delta T$  соответствующих реперов. Поскольку интервал с постоянной  $\Delta T$  в каждом цикле был заведомо больше предположительной ширины окна интеграции ( $500$  мс, см. ранее), усреднение бинауральной информации функцией сглаживания не приводило к смещению концов траектории относительно реперов. И наоборот, если изменение  $\Delta T$  занимало весь полупериод ББ, как это происходило в случае линейного паттерна, то нахождению в точке поворота соответствовал интервал времени, ограниченный лишь частотой дискретизации при синтезе стимулов. При частоте дискретизации  $96$  кГц одному отсчету соответствует длительность порядка  $10$  мкс, что на несколько порядков меньше известной из литературы нижней границы окна интеграции (десятки миллисекунд). В таком случае усреднение бинауральной информации, предшествующей моменту поворота и следующей сразу после него, обусловило смещение концов воспринимаемой траектории и уменьшение ее длины.

Данные о локализации крайних точек траекторий, представленные в настоящей работе,

позволили выявить еще один эффект: точки поворота плавного движения локализовались дальше от реперов, чем точки старта, при всех положениях траекторий в пространстве. Вероятно, локализация точек старта в значительной степени определялась влиянием неподвижных участков. В этой связи представляет особый интерес работа *S. Getzmann* [20], в которой целенаправленно изучалось влияние длины неподвижного участка сигнала с отсроченным движением на время реакции в задачах обнаружения движения и распознавания его направления. В первом эксперименте *S. Getzmann* получил снижение времени реакции в обеих задачах при увеличении длительности неподвижного участка и предложил три варианта интерпретации. Более быстрая обработка движения при длинных неподвижных участках могла в принципе объясняться тремя факторами: временной интеграцией пространственной информации, предварительной подготовкой (если неподвижный участок служил предупреждающим сигналом) или переключением пространственного внимания (если неподвижный участок задавал положение старта движения). Второй эксперимент этой работы [20] был направлен на разделение трех возможных факторов и содержал специальные предупреждающие сигналы. В результате было обнаружено, что снижение времени реакции нельзя отнести исключительно за счет пространственного внимания или предварительной подготовки, хотя их влияние тоже нельзя отрицать. Взаимосвязь времени реакции и длины неподвижного участка сохранялась при наличии предупреждающего сигнала. *S. Getzmann* пришел к выводу, что обнаружение движения запускается после накопления и интеграции пространственной информации в пределах некоторого временного окна.

Поскольку в настоящем исследовании единственным отличительным признаком точек старта в сигнале от точек поворота была их близость к неподвижным участкам, можно предположить влияние неподвижного участка на сенсорную обработку движения, как и в описанной ранее работе [20]. Несмотря на то, что испытуемых просили по возможности игнорировать положение звукового образа в момент его включения и выключения, окно интеграции частично захватывало неподвижные участки в начале и в конце плавного движения, в результате чего воспринимаемое положение точек старта смещалось в их сторону, а значит, и в сторону соответствующих реперов.

Данный эффект был сильнее выражен в центральном секторе акустического пространства, чем на периферии. Вероятно, это является следствием нелинейной зависимости воспринимаемого положения от межушных различий. Близкая к линейной зависимость углового положения от  $\Delta T$ , при которой одинаковым приращениям задержки

соответствует одинаковое изменение воспринимаемого положения, характерна только для центрального сектора. При увеличении  $\Delta T$  до  $\pm 400$  мкс и более тем же приращениям задержки соответствуют меньшие изменения в воспринимаемом угловом положении, а при  $\Delta T = \pm 600$  мкс и более наступает насыщение – полная латерализация [2], когда увеличение  $\Delta T$  даже на 100 мкс вызывает изменение воспринимаемого положения всего на 1–2 град [5]. Таким образом, один и тот же паттерн изменений  $\Delta T$  в разных частях субъективного акустического пространства по-разному преобразуется в воспринимаемое угловое положение, что приводит к разным результатам после интеграции пространственной информации во времени.

Безусловно, нужно иметь в виду, что точки старта располагались вблизи неподвижных участков только в первом и последнем циклах движения. Это снижает возможный вклад процесса интеграции в близость точек старта к реперам, так как в промежуточных циклах окно интеграции не захватывало неподвижные участки. Вблизи места расположения неподвижного участка каждый стимул создавал одинаковую последовательность слуховых событий: старт движения, семь поворотов и остановка движения (рис. 1). Согласно инструкции, слушатели определяли положение крайних точек траектории, а не начальных и конечных участков в отдельности. Они прослушивали последовательность из семи одинаковых событий (поворотов) с интервалом 1 с и двух отличающихся (в начале и в конце). Такую стимуляцию можно рассматривать как короткую *oddball*-последовательность, в которой повороты играли роль стандартов, а старт и остановка движения – роль девиантов [21]. Есть все основания предполагать, что восприятие такой последовательности сопровождалось процессами, разворачивающимися при *oddball*-стимуляции: формированием следа стандарта в сенсорной памяти, произвольным переключением внимания на девиант и обнаружением различий. Переключение внимания, связанное с обнаружением нарушения акустической закономерности, вполне типично для *oddball*-стимуляции [22, 23]. В случае наших стимулов конечный неподвижный участок (расчетное положение которого было таким же, как у начального) мог вызывать произвольное переключение внимания, в результате чего этот конец траектории локализовался слушателем ближе к расчетному положению конечного участка и соответствующего репера. Таким образом, хотя старт и остановка движения представляли собой только два из девяти слуховых событий в течение стимула, их роль в локализации оказывалась значительной. Влияние пространственного внимания было, по всей вероятности, большим, чем в эксперименте *S. Getzmann* [20], именно из-за наличия акустической закономерности и ее нарушения в сигнале.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При циклическом движении звукового образа, созданном за счет мгновенных переключений между двумя неподвижными участками длительностью по 500 мс, воспринимаемое положение концов траекторий (как точек старта, так и точек поворота) не отличалось от положения неподвижных реперов. При линейном изменении  $\Delta T$ , моделирующем плавное движение между теми же крайними значениями, наблюдалось смещение воспринимаемого положения концов траекторий: точки поворота локализовались дальше от реперов, чем точки старта (совпадающие с неподвижными участками стимула в момент его включения и выключения), при всех положениях траекторий в пространстве. Критическим фактором, определяющим смещение концов воспринимаемой траектории, являлось время нахождения звукового образа вблизи точки поворота. Полученные закономерности были сильнее выражены в центральном секторе субъективного акустического пространства, чем в периферическом. Результаты соответствуют представлениям о бинауральном сглаживании как результате временного интегрирования пространственной информации. Помимо процессов интеграции, определенную роль в локализации сигналов могло иметь переключение внимания, связанное с обнаружением нарушения акустической закономерности.

**Финансирование работы.** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (грант № 24-25-00106).

**Соблюдение этических стандартов.** Все исследования проводились в соответствии с принципами биомедицинской этики, изложенными в Хельсинкской декларации 1964 г. и последующих поправках к ней. Они также были одобрены Комиссией по этике Института физиологии им. И.П. Павлова РАН (Санкт-Петербург), протокол № 22-05 от 02.11.2022 г.

Каждый участник исследования дал добровольное письменное информированное согласие после получения разъяснений о потенциальных рисках и преимуществах, а также о характере предстоящего исследования.

**Конфликт интересов.** Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Carlile S., Leung J.* The perception of auditory motion // *Trends Hear.* 2016. V. 20. P. 2331216516644254.
2. *Альтман Я.А.* Пространственный слух. СПб.: Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН, 2011. 311 с.
3. *Perrott D.R., Musicant A.D.* Minimum audible movement angle: Binaural localization of moving sound sources // *J. Acoust. Soc. Am.* 1977. V. 62. № 6. P. 1463.
4. *Петропавловская Е.А., Шестопалова Л.Б., Вайтулевич С.Ф.* Проявления инерционности слуховой системы при локализации движущихся звуковых образов малой длительности // *Физиология человека.* 2010. Т. 36. № 4. С. 34.
5. *Петропавловская Е.А., Шестопалова Л.Б., Вайтулевич С.Ф.* Предсказательная способность слуховой системы при плавном движении и скачкообразном перемещении звуковых образов малой длительности // *Журн. высш. нервн. деят. им. И.П. Павлова.* 2011. Т. 61. № 3. С. 293.
6. *Kollmeier B., Gilkey R.H.* Binaural forward and backward masking: evidence for sluggishness in binaural detection // *J. Acoust. Soc. Am.* 1990. V. 87. № 4. P. 1709.
7. *Culling J.F., Summerfield Q.* Measurements of the binaural temporal window using a detection task // *J. Acoust. Soc. Am.* 1998. V. 103. P. 3540.
8. *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.
9. *Grantham D.W., Wightman F.L.* Detectability of varying interaural temporal differences // *J. Acoust. Soc. Am.* 1978. V. 63. P. 511.
10. *Akeroyd M.A.* A binaural beat constructed from a noise // *J. Acoust. Soc. Am.* 2010. V. 128. P. 3301.
11. *Варфоломеев А.Л., Старостина Л. В.* Слуховые вызванные потенциалы человека при иллюзорном движении звукового образа // *Росс. физiol. журн. им. И.М. Сеченова.* 2006. Т. 92. № 9. С. 1046.
12. *Krumbholz K., Hewson-Stoate N., Schönwiesner M.* Cortical response to auditory motion suggests an asymmetry in the reliance on inter-hemispheric connections between the left and right auditory cortices // *J. Neurophysiol.* 2007. V. 97. P. 1649.
13. *Альтман Я.А.* Локализация движущегося источника звука. Л.: Наука, 1983. 176 с.
14. *Chandler D.W., Grantham D.W.* Minimum audible movement angle in the horizontal plane as a function of stimulus frequency and bandwidth, source azimuth, and velocity // *J. Acoust. Soc. Am.* 1992. V. 91. № 3. P. 1624.
15. *Saberi K., Hafter E.R.* Experiments on auditory motion discrimination / *Binaural and Spatial Hearing in Real and Virtual Environments.* NJ: Erlbaum Publ., 1997. P. 315.
16. *Altman J.A., Romanov V.P.* Psychophysical characteristics of the auditory image movement perception during dichotic stimulation // *Int. J. Neurosci.* 1988. V. 38. P. 369.
17. *Strybel T.Z., Manligas C.L., Chan O., Perrott D.R.* A comparison of the effects of spatial separation on

- apparent motion in the auditory and visual modalities // *Percept. Psychophys.* 1990. V. 47. № 5. P. 439.
18. *Zuk N., Delgutte B.* Neural coding and perception of auditory motion direction based on interaural time differences // *J. Neurophysiol.* 2019. V. 122. № 4. P. 1821.
  19. *Shestopalova L.B., Petropavlovskaya E.A., Salikova D.A., Semenova V.V.* Temporal integration of sound motion: Motion-onset response and perception // *Hear. Res.* 2024. V. 441. P. 108922.
  20. *Getzmann S.* Effects of velocity and motion-onset delay on detection and discrimination of sound motion // *Hear. Res.* 2008. V. 246. P. 44.
  21. *Шестопалова Л.Б., Петропавловская Е.А.* Негативность рассогласования и пространственный слух // *Успехи физиол. наук.* 2019. Т. 50. № 3. С. 14.
  22. *Friedman D., Cycowicz Y.M., Gaeta H.* The novelty P3: an event-related brain potential (ERP) sign of the brain's evaluation of novelty // *Neurosci. Biobehav.* 2001. V. 25. P. 355.
  23. *Polich J.* Updating P300: an integrative theory of P3a and P3b // *Clin. Neurophysiol.* 2007. V. 118. P. 2128.

## REFERENCES

1. *Carlile S., Leung J.* The perception of auditory motion // *Trends Hear.* 2016. V. 20. P. 2331216516644254.
2. *Altman Ya. A.* [Spatial hearing]. SPb.: Pavlov Institute of Physiology, RAN, 2011. 311 p.
3. *Perrott D.R., Musicant A.D.* Minimum audible movement angle: Binaural localization of moving sound sources // *J. Acoust. Soc. Am.* 1977. V. 62. № 6. P. 1463.
4. *Petropavlovskaya E.A., Shestopalova L.B., Vaitulevich S.F.* Sluggishness of auditory perception during localization of short moving sound images // *Human Physiology.* 2010. V. 36. № 4. P. 399.
5. *Petropavlovskaya E.A., Shestopalova L.B., Vaitulevich S.F.* Predictive ability of the auditory system during smooth and abrupt movements of low-intensity sound images // *Neurosci. Behav. Physiol.* 2012. V. 42. № 8. P. 911.
6. *Kollmeier B., Gilkey R.H.* Binaural forward and backward masking: evidence for sluggishness in binaural detection // *J. Acoust. Soc. Am.* 1990. V. 87. № 4. P. 1709.
7. *Culling J.F., Summerfield Q.* Measurements of the binaural temporal window using a detection task // *J. Acoust. Soc. Am.* 1998. V. 103. P. 3540.
8. *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.
9. *Grantham D.W., Wightman F.L.* Detectability of varying interaural temporal differences // *J. Acoust. Soc. Am.* 1978. V. 63. P. 511.
10. *Akeroyd M.A.* A binaural beat constructed from a noise // *J. Acoust. Soc. Am.* 2010. V. 128. P. 3301.
11. *Varfolomeev A.L., Starostina L.V.* [Auditory event-related potentials to the apparent auditory image motion] // *Russ. Fiziol. Zh. Im. I.M. Sechenova.* 2006. V. 92. № 9. P. 1046.
12. *Krumbholz K., Hewson-Stoate N., Schönwiesner M.* Cortical response to auditory motion suggests an asymmetry in the reliance on inter-hemispheric connections between the left and right auditory cortices // *J. Neurophysiol.* 2007. V. 97. P. 1649.
13. *Altman Ya.A.* [Localization of moving sound source]. L.: Nauka, 1983. 176 p.
14. *Chandler D.W., Grantham D.W.* Minimum audible movement angle in the horizontal plane as a function of stimulus frequency and bandwidth, source azimuth, and velocity // *J. Acoust. Soc. Am.* 1992. V. 91. № 3. P. 1624.
15. *Saberi K., Hafter E.R.* Experiments on auditory motion discrimination / *Binaural and Spatial Hearing in Real and Virtual Environments.* NJ: Erlbaum Publ., 1997. P. 315.
16. *Altman J.A., Romanov V.P.* Psychophysical characteristics of the auditory image movement perception during dichotic stimulation // *Int. J. Neurosci.* 1988. V. 38. P. 369.
17. *Strybel T.Z., Manligas C.L., Chan O., Perrott D.R.* A comparison of the effects of spatial separation on apparent motion in the auditory and visual modalities // *Percept. Psychophys.* 1990. V. 47. № 5. P. 439.
18. *Zuk N., Delgutte B.* Neural coding and perception of auditory motion direction based on interaural time differences // *J. Neurophysiol.* 2019. V. 122. № 4. P. 1821.
19. *Shestopalova L.B., Petropavlovskaya E.A., Salikova D.A., Semenova V.V.* Temporal integration of sound motion: Motion-onset response and perception // *Hear. Res.* 2024. V. 441. P. 108922.
20. *Getzmann S.* Effects of velocity and motion-onset delay on detection and discrimination of sound motion // *Hear. Res.* 2008. V. 246. P. 44.
21. *Shestopalova L.B., Petropavlovskaya E.A.* [Mismatch negativity and spatial hearing] // *Usp. Fiziol. Nauk.* 2019. V. 50. № 3. P. 14.
22. *Friedman D., Cycowicz Y.M., Gaeta H.* The novelty P3: an event-related brain potential (ERP) sign of the brain's evaluation of novelty // *Neurosci. Biobehav.* 2001. V. 25. P. 355.
23. *Polich J.* Updating P300: an integrative theory of P3a and P3b // *Clin. Neurophysiol.* 2007. V. 118. P. 2128.

## Localization of Turn Points in the Rhythmic Movement of Sound Image

L. B. Shestopalova\*, E. A. Petropavlovskaja, D. A. Salikova, P. I. Letyagin

*Pavlov Institute of Physiology, RAS, St. Petersburg, Russia*

*\*E-mail: shestopalovalb@infran.ru, shestolido@mail.ru*

The localization of start and turn points in rhythmic sound movement created through the modeling of binaural beats (BB) was investigated. The BB-modeled broadband stimuli consisted of stationary initial and final segments with a section of cyclic motion between them. Spatial effects were induced by changes in the interaural time difference (ITD). During the experiment, subjects assessed the position of the movement trajectory ends or the position of reference points using a graphic tablet. It was discovered that the perception of rhythmic movement of the sound image was significantly influenced by the integrative ability of the binaural auditory system. The results indicated that with instantaneous switching between stationary segments, the perceived positions of the trajectory ends (start point and turn point) matched the positions of the reference points. Conversely, the smooth movement between the same extreme values showed a displacement of the trajectory ends: the turn points were localized further from the reference points compared to the start points, at all trajectory positions in space. Localization of the trajectory end crucially depended on the time that the sound had stayed near the turning point. These patterns were expressed stronger in the central area of the acoustic space compared to the periphery.

*Keywords:* binaural beats, cyclic motion, broadband signals, movement trajectory, sound localization.