

Санкт-Петербургский городской дворец творчества юных  
Эколого-биологический центр «Крестовский остров»  
Отделение общей биологии

**Исследование variability  
порогов пространственного слуха  
у подростков 15–16 лет**

Автор:

Колодяжная Вероника

Научный руководитель:

Задевалова Мария Игоревна

## Оглавление

Обозначения и сокращения	3
Введение	4
1. Литературный обзор	7
1.1. Фундаментальные механизмы пространственного слуха	7
1.2. Развитие слуховой системы в подростковом возрасте	12
2. Материалы и методы	15
2.1. Условия и участники эксперимента	15
2.2. Допуск к исследованию и этические нормы	17
2.3. Оборудование и стимульный материал	17
2.4. Процедура эксперимента	19
3. Результаты	21
4. Обсуждение результатов	27
Выводы	33
Список литературы	36
Приложения	38
Приложение №1: Информированное согласие.	39
Приложение №2: Анкета здоровья	40
Приложение №3: Инструктаж о ходе проведения исследования	41

## Обозначения и сокращения

В данной работе использовались следующие обозначения и сокращения:

ITD — Межушная разность времени (Interaural Time Difference)

ILD — Межушная разность интенсивности (Interaural Level Difference)

МАО — Минимальный различимый угол (Minimum Audible Angle)

МАМО — Минимальный различимый угол движения (Minimum Audible Movement Angle)

MOR — Ответ на начало движения (Motion-onset response)

$\Delta T$  — Межушная задержка

ЗД — Заднее двухолмие

$\delta$ - $\theta$ -ИТС — Дельта-Тета Внутриулитковый (Delta-Theta-IntraCochlear )

HRTF — Акустическая передаточная функция головы (Head-Related Transfer Function)

## Введение

В современном мире изучение особенностей восприятия звуковых сигналов человеком становится всё более актуальным. Способность человека локализовать источник звука в пространстве – фундаментальная функция слуховой системы, обеспечивающая ориентацию, коммуникацию и выживание. Ключевыми параметрами для локализации являются междушная разница во времени (задержка) и интенсивность звука. Количественной мерой пространственной разрешающей способности слуха является минимальный различимый угол (Minimum Audible Angle, МАА), а для движущихся источников – минимальный различимый угол движения (Minimum Audible Movement Angle, МАМА).

Для подростковой аудитории характерна практика систематической повышенной акустической нагрузки, ключевым компонентом которой является регулярное и продолжительное использование персональных аудиоустройств (преимущественно наушников внутриканального типа) с установленными уровнями громкости, существенно превышающими рекомендуемые гигиенические нормативы. Данная поведенческая модель усугубляется частым пребыванием в условиях шумового загрязнения городской среды и постоянным ношением головных телефонов (наушников)(Rideout V., Robb M. B; 2019).

У подростков 15-16 лет идёт активное созревание коры головного мозга. Этот возрастной период представляет собой критическую точку в развитии нервной системы: происходит активное созревание коры головного мозга, включая центральные слуховые пути. В это время могут формироваться как высокие показатели пространственной локализации, так и низкие, связанные с недостаточным развитием нейронных сетей, ответственных за обработку временных параметров звука. Отсутствие нормативных данных по пороговым углам различения у подростков затрудняет разработку эффективных методик

диагностики, коррекции слуховых нарушений и проектирования аудиоустройств, адаптированных к их физиологическим особенностям.

Данное исследование обусловлено дефицитом нормативных данных о порогах пространственного слуха у подростков, что ограничивает возможности объективной диагностики и разработки возраст-специфичных аудиологических решений. Работа нацелена на получение этих данных для заполнения существующего пробела.

Целью данной работы является определение минимальных и максимальных угловых порогов различения звуковых сигналов у подростков 15–16 лет с нормальным слухом.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

1. Проанализировать существующие научные исследования по теме.
2. Провести экспериментальное исследование с участием подростков.
3. Обработать и проанализировать полученные данные.
4. Сравнить полученные результаты с литературными данными исследований взрослых.

Результаты исследования позволят не только глубже понять особенности развития слуховой системы в подростковом возрасте, но и будут полезны для разработчиков слуховых аппаратов, систем звукоусиления в образовательных учреждениях и аудиоинтерфейсов в цифровой среде.

Актуальность данной темы обусловлена несколькими ключевыми факторами. Так как в подростковый период происходят активные изменения в функциях мозга, что напрямую влияет на восприятие звуковых сигналов. Изучение особенностей обработки этих сигналов позволяет понять, как созревают подкорковые слуховые структуры. При этом большинство существующих исследований было проведено на взрослых, из-за чего подростковый возраст остается недостаточно изученным, и остается много неясностей в том, как слуховая система развивается на этом этапе.

Сведения об угловых характеристиках слуха подростков позволят создать более совершенные аудиосистемы, которые обеспечат хорошую слышимость и комфорт для учеников с учетом возрастных особенностей. Также эти знания могут помочь при диагностике и коррекции нарушений слуха у подростков, к примеру, знания угловых значений могут помочь для выявления проблем с пространственным слухом. Выявленные закономерности могут быть использованы как нормативные базы данных для диагностики поражений центрального мозга и органов слуха. Также полученные данные можно будет использовать для создания систем акустической виртуальной реальности. Полученные результаты помогут лучше понимать принципы пространственной информации в слуховой системе и в других сенсорных системах.

Таким образом, актуальность настоящего исследования определяется острой необходимостью получения объективных возрастных нормативов пространственного слуха в критический период нейроонтогенеза подростков, внесут вклад в понимание механизмов созревания бинаурального слуха и послужат основой для дальнейших исследований в области возрастной психоакустики и нейрофизиологии.

Выражаем искреннюю благодарность Семеновой Варваре Викторовне, кандидату психологических наук, старшему научному сотруднику лаборатории слуха Института физиологии им. И.П. Павлова РАН, за неоценимую научную и методическую поддержку в ходе выполнения данного исследования.

## 1. Литературный обзор

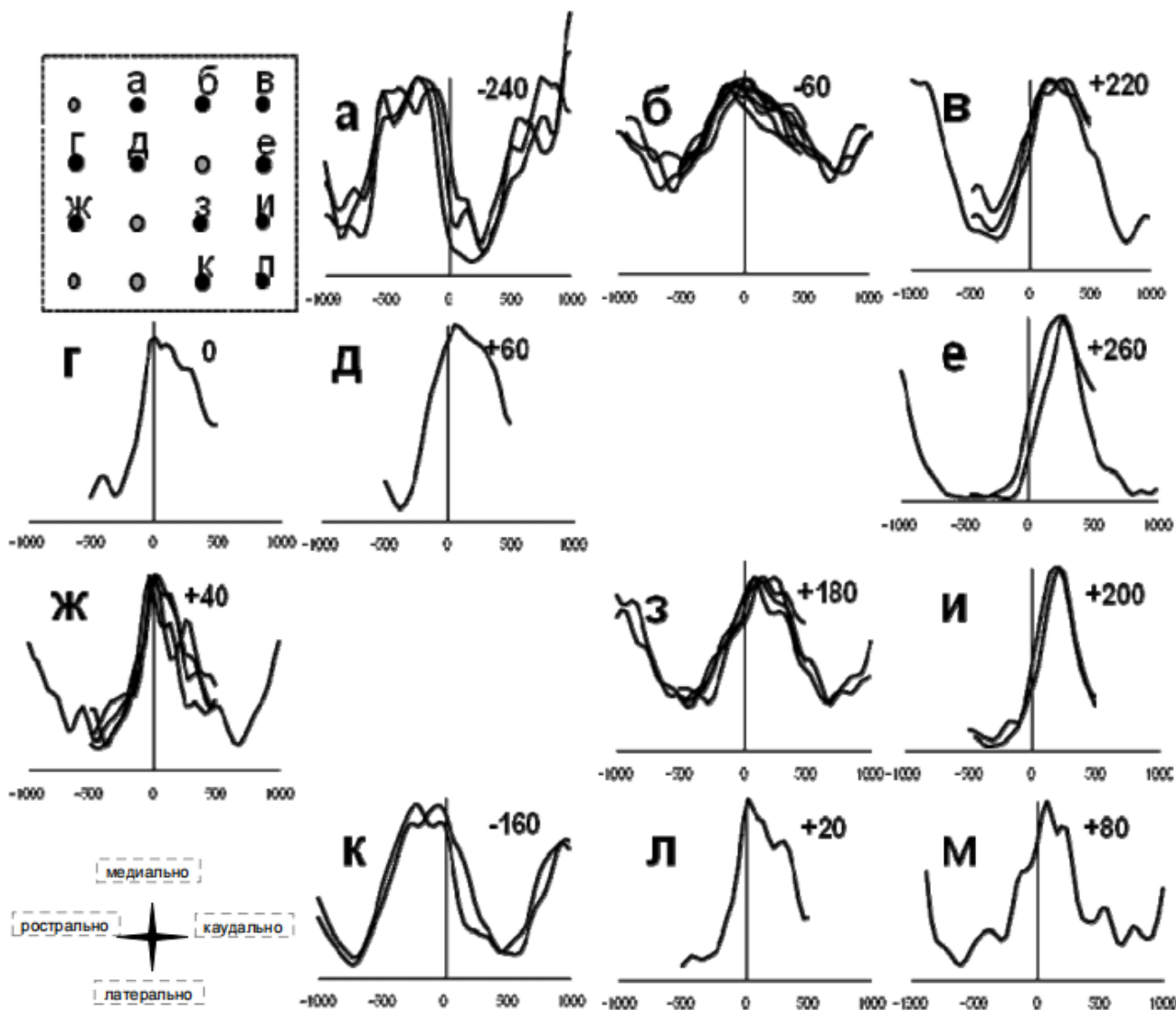
### 1.1. Фундаментальные механизмы пространственного слуха

Изучение способности человека локализовать источники звука имеет давнюю историю, уходящую корнями в физиологию XIX века. Первые теоретические основы были заложены в работах Гельмгольца, который описал роль бинауральных подсказок – разницы во времени и уровне звука – в определении направления на источник (Helmholtz, 1863, цит. по Ржевкин, 1936). В XX веке эти идеи были экспериментально подтверждены и развёрнуты в рамках психофизики и нейрофизиологии.

Одним из ключевых понятий в этой области стало МАА (Minimum Audible Angle), представляющий собой наименьший угловой сдвиг источника звука, который человек может надежно обнаружить. По данным (Harris J. D., 1971) и (Perrott D.R., 1977), величина МАА для неподвижных источников составляет около 1–3 градусов при расположении источника вблизи средней линии головы и увеличивается до  $7^\circ$  и более при смещении от центра. Для движущихся источников используется аналогичный показатель МАМА (Minimum Audible Movement Angle), который, согласно (Perrott D.R., 1977), монотонно увеличивается с ростом скорости движения источника звука. Эти работы установили фундаментальные зависимости между углом, скоростью и частотой сигнала, а также продемонстрировали, что лучшее пространственное разрешение обеспечивается низкочастотными сигналами, ниже 1000 Гц.

Важную роль в понимании нейрофизиологических механизмов пространственного слуха сыграла работа М.И. Рочевой, которая исследовала топическую организацию нейронов в заднем двухолмии – ключевом центре среднего мозга, интегрирующем бинауральную информацию. Автор показала, что в пределах одного изочастотного слоя нейроны, чувствительные к междушной задержке ( $\Delta T$ ), распределены в виде градиента: оптимальная задержка постепенно возрастает от ростральной к каудальной области. Изочастотный слой

– это термин, описывающий группу нейронов в слуховой коре, которые реагируют на одну и ту же звуковую частоту (Рочева М.И., 2011).



*Рисунок 1.* Топография распределения оптимальной междушной задержки в реакции на низкочастотный шум (0,2–1 кГц),  $\Delta T$ -функции нейронов (а–м) (Рочева М.И., 2011).

Цифрами обозначена величина оптимальной междушной задержки, мкс. Диапазон изменения междушной задержки и сторона опережения приведены внизу каждого графика. Слева вверху на Рис.1 показана схема микроэлектродного пучка; черные кружки – места регистрации нейронов; буквы

– нейроны, данные которых приведены на графиках. Слева внизу – ориентация пучка относительно заднего холма (Рочева М.И., 2011).

Это свидетельствует о том, что заднее или нижнее двухолмие (Рис. 2) содержит несколько карт представительства  $\Delta T$ , что позволяет системе гибко реагировать на различные акустические сценарии.

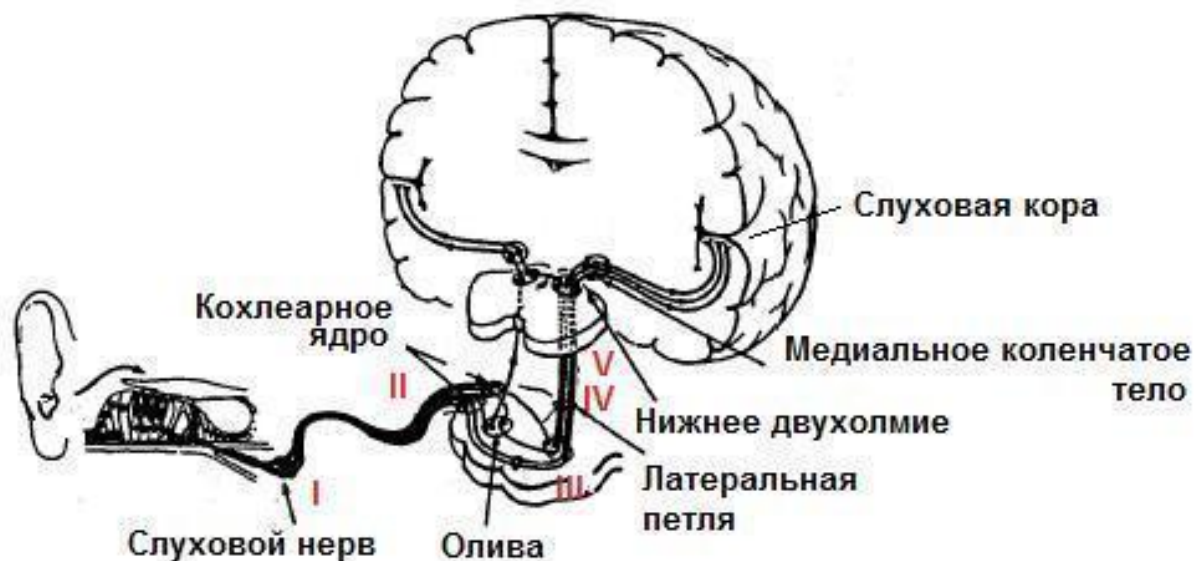


Рисунок 2. Схема проведения слухового импульса (Халфина В.В., 2013).

Ключевым центром интеграции  $\Delta T$  является заднее двухолмие (ЗД), где, согласно данным, осуществляется топографически упорядоченное представительство оптимальных задержек: от малых значений ( $\approx 0$  мкс, центральный источник) в ростральных отделах к большим ( $\pm 300$ – $800$  мкс, боковые источники) – в каудальных (Рочева М.И., 2011). При этом в одном изочастотном слое возможны множественные карты  $\Delta T$ , отражающие гибкость и избыточность системы.

Низкочастотные сигналы (до 2 кГц) являются основными для ИТД-кодирования, что объясняет выбор именно такого диапазона в большинстве современных исследований.

Современные подходы к изучению пространственного слуха смещаются от чисто поведенческих тестов к электрофизиологическим методам. Работа Л.Б. Шестопаловой представляет собой важный шаг в этом направлении. Авторы

исследовали вызванную ритмическую активность мозга MOR (Motion-onset response, MOR) при прослушивании движущихся звуковых стимулов. Они показали, что реакция на начало движения состоит из раннего негативного компонента cN1 (раннего негативный компонент (“change”-N1,) и позднего позитивного колебания (“change”-P2, cP2), которые зависят от скорости движения и направления внимания. Ключевым открытием стало то, что фазовая когерентность медленных ритмов (дельта-тета) является более чувствительным маркером обработки движения, чем амплитуда суммарного вызванного потенциала. Это указывает на то, что процессы пространственной локализации в значительной степени опираются на колебательную активность мозга, а не только на синхронизированную по событиям активность (Шестопалова Л.Б., 2020).

Способность центральной слуховой системы человека определять азимутальное положение источника звука в горизонтальной плоскости (звуковая локализация) является результатом сложной нейронной обработки междушумных задержек. Пространственное восприятие, измеряемое в градусах азимута ( $0^\circ$  – прямо спереди,  $90^\circ$  – справа,  $180^\circ$  – сзади,  $270^\circ$  – слева), базируется на двух ключевых бинауральных сигналах: временной и уровневой разнице между ушами. Межушная временная разница (Interaural Time Difference, ITD): разность времени прихода звуковой волны к ближнему и дальнему относительно источника уху.

Межушная уровневая разница (Interaural Level Difference, ILD): Разность в интенсивности звука между ушами, возникающая из-за акустической тени, создаваемой головой. ILD становится основным сигналом для высокочастотных компонент ( $> 1500$  Гц). Её величина зависит от частоты и азимута, достигая максимумов (более 20 дБ для высоких частот) также при боковом расположении источника ( $90^\circ/270^\circ$ ) (Blauert, J. 1997).

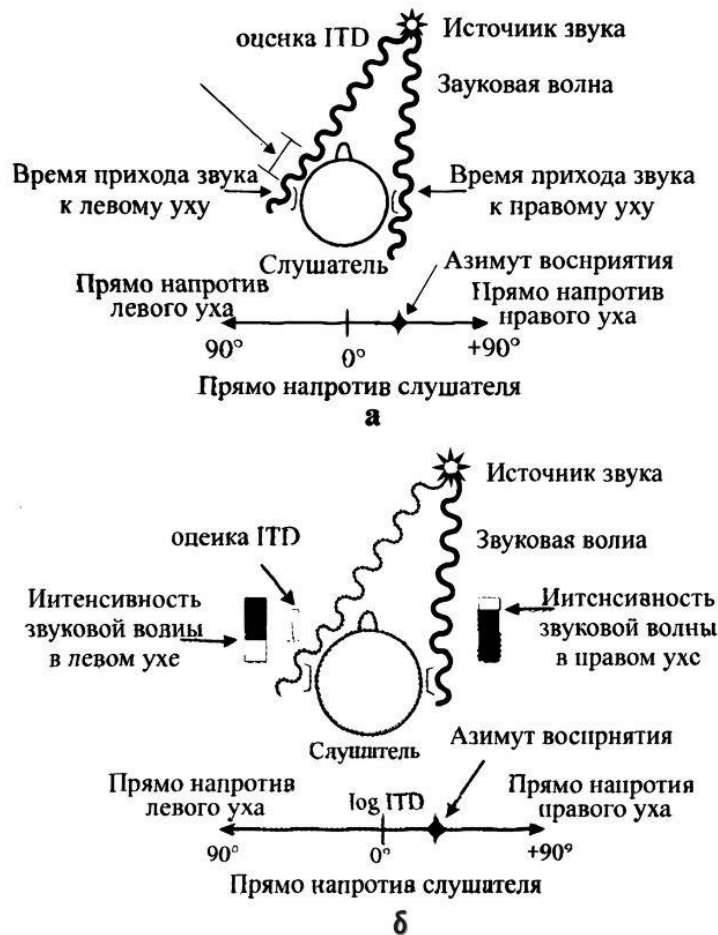


Рисунок 3. Механизмы локализации в горизонтальной плоскости: а — разность хода лучей по времени — ITD; б — разность по интенсивности — ILD (А.Смирнов, 2020)

ITD является доминирующим сигналом для локализации низкочастотных тонов ( $< 1500$  Гц), где дифракционные эффекты незначительны. Максимальные значения ITD ( $\sim 0.6$ – $0.7$  мс) наблюдаются при азимуте источника  $90^\circ$  или  $270^\circ$  (Blauert, J. 1997). Согласно упрощенной сферической модели головы, зависимость ITD от азимута  $\theta$  (в радианах) описывается формулой:

$$ITD(\theta) \approx (a/c) * (\theta + \sin \theta)$$

где  $a$  — эффективный радиус головы ( $\sim 0.0875$  м),  $c$  — скорость звука ( $\sim 343$  м/с) (Duda, R. O., Martens, W. L. 1998).

## 1.2. Развитие слуховой системы в подростковом возрасте

Развитие слуховой системы представляет собой длительный гетерохронный процесс, который начинается на эмбриональной стадии и продолжается вплоть до позднего подросткового возраста. Формирование периферических структур (улитки) в основном завершается к рождению, однако созревание центральных отделов — стволовых, подкорковых и, что наиболее важно, корковых слуховых центров — продолжается многие годы после рождения, достигая ключевых точек в подростковом периоде (Moore, 2002; Eggermont, 2015).

Подростковый возраст (12-18 лет) признан критической фазой нейроразвития, характеризующейся интенсивными процессами синаптического прунинга (устранения избыточных нейронных связей), усиления эффективных нейронных сетей и активной миелинизации аксонов, особенно в лобной и височной коре (Giedd et al., 1999; Paus, 2005). Слуховая кора, ответственная за сложный анализ акустических признаков, включая пространственную локализацию, претерпевает значительные структурные и функциональные перестройки. Исследования методом магнитно-резонансной томографии (МРТ) показывают, что объем белого вещества в слуховых путях продолжает увеличиваться до 18-20 лет, что напрямую коррелирует с улучшением скорости и точности передачи и обработки слуховой информации (Paus et al., 2008; Lebel, Beaulieu, 2011).

Созревание структур, ответственных за пространственный слух, имеет особую траекторию. Нижнее двухолмие и медиальное верхнеоливариальное ядро — ключевые центры бинауральной интеграции, где происходит кодирование междушумной разности времени (Interaural Time Difference, ITD) и междушумной разности интенсивности (Interaural Level Difference, ILD), — также демонстрируют пролонгированное созревание. Экспериментальные работы на

животных моделях указывают на то, что тонотопическая и пространственная организация карт в нижнем двухолмии продолжает уточняться в постнатальный период под влиянием акустического опыта (Sanes, Woolley, 2011). У человека электрофизиологические исследования, такие как регистрация слуховых вызванных потенциалов (Auditory Brainstem Responses, ABR), показывают, что латентности волн, отражающие проведение сигнала по стволу мозга, постепенно сокращаются, достигая взрослых значений лишь к 14-16 годам (Skoe, Kraus, 2010).

Именно эта незавершенность морфофункционального созревания центральной слуховой системы делает подростковый возраст уникальным «окном» для изучения становления высших слуховых функций, к которым относится пространственный слух. В этот период могут наблюдаться значительные индивидуальные различия в слуховых порогах, обусловленные разной скоростью нейроразвития, генетическими факторами и особенностями акустического опыта (Moore, Linthicum, 2007). При этом подавляющее большинство классических психоакустических исследований, установивших базовые параметры пространственного слуха (такие как минимальный различимый угол — МАА), были выполнены на взрослых испытуемых (Mills, 1958; Perrott, Musicant, 1977). Это создает существенный пробел в нормативных данных для подростков, затрудняя дифференциальную диагностику нормы и патологии, оценку влияния шумовой нагрузки, а также проектирование аудиотехнологий, адаптированных к возрастным особенностям восприятия.

Изучение пороговых угловых значений у подростков 15-16 лет актуально не только как прикладная задача получения возрастных норм, но и как фундаментальная нейрофизиологическая проблема, позволяющая исследовать, как тонкие слуховые способности коррелируют с финальными этапами созревания центральной нервной системы.

Таким образом, современная наука рассматривает пространственный слух как сложную систему, включающую периферические механизмы межухная разность времени (Interaural Time Difference, ITD) и межухная разность интенсивности (Interaural Level Difference, ILD), центральные кодирующие структуры (заднее двуххолмие) и когнитивные процессы (внимание, фазовая подстройка). Все эти уровни взаимосвязаны, и их развитие в подростковом возрасте требует специального изучения, поскольку именно в этот период происходят решающие изменения в нейропластичности и созревании корковых структур. Настоящее исследование стремится внести свой вклад в эту область, предоставляя первые систематические данные по пороговым углам различения у подростков 15–16 лет.

## 2. Материалы и методы

### 2.1. Условия и участники эксперимента

Исследования проводились на базе Эколого-Биологического центра “Крестовский остров” в период с 2024 - 2025 год, при поддержке лаборатории слуха ПСПБГМУ им. Павлова.

В исследовании приняло участие 15 подростков в возрасте 15-16 лет (2008-2009 г.р.) с нормальным слухом. В нашем исследовании под нормальным слухом мы подразумеваем, что испытуемый слышит в диапазоне от 16-20 Гц до 18-20 тысяч Гц (согласно данным Рочева М.И., 2011) имеет здоровый слух, без патологии, хронических заболеваний слуха и воспалительных процессов.

В ходе исследования испытуемым через головные телефоны (наушники) подавалось по 24 шумовых послышки, из них 12 на левое ухо и 12 на правое ухо с интервалами междушумной временной задержки ( $\Delta T$ ): 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 150, 200, 400, 600, 800 мкс. Внутренняя структура посылок содержала по 30 идентичных звуковых стимулов, равномерно распределенных по ее длительности.

Данная структура позволяет исследовать пороги и динамику латерализации звука при систематическом варьировании ключевого бинаурального признака. Каждому испытуемому присваивался трех буквенный идентификатор с целью сохранения конфиденциальности данных. Под понятием съемка мы понимаем эксперимент, в котором при помощи головных телефонов (наушники), подавались звуковые стимулы. Для каждого участника было проведено от двух до трех звуковых экспериментов. Повторения проводились с интервалом не менее недели, для того чтобы избежать запоминания сигналов, утомления.

Таблица 1. Протокол проведения звукового эксперимента

Идентификатор (код)	Дата съёмок	Количество съёмок
AMD	21.05.2025 23.10.2024 26.05.2025	3
EIM	02.10.2024 12.02.2025 15.01.2025	3
IMI	07.03.2025 02.04.2025 31.01.2025	3
KAC	14.11.2024 04.12.2024 16.10.2024	3
KED	06.12.2024 13.12.2024 20.12.2024	3
SGS	30.09.2024 10.01.2025 26.02.2025	3
RTA	16.06.2024 22.06.2024 23.05.2025	3
REA	16.06.2024 20.06.2024	2
DNN	04.12.2024 18.12.2024	2
MNN	09.10.2024 18.12.2024	2
GDD	17.01.2025 04.03.2025	2
BAK	30.04.25 23.05.25	2
AIH	12.02.25 30.05.25	2

Идентификатор – трехбуквенный код участника; дата съёмок – дата проведения исследования; количество съёмок — число независимых экспериментальных сессий, проведённых с каждым испытуемым для сбора повторных данных.

## **2.2. Допуск к исследованию и этические нормы**

Протокол исследования был одобрен Этической комиссией Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физиологии им. И.П. Павлова Российской академии наук (Протокол № 22-05 от 02.11.2022).

Обязательным условием участия испытуемого в исследовании являлось заполненное подписанное информированное согласие от родителей испытуемого (Приложение №1, информированное согласие). Информированное согласие содержало сведения о ходе эксперимента, о рисках, также сообщало родителям о том, что в любой момент ребенок может отказаться от участия в исследовании.

Каждый испытуемый заполнял анкету здоровья (Приложение №2: Анкета здоровья), содержащую сведения о том, наблюдаются ли у испытуемого отклонения от нормального слуха. Заполнение анкеты здоровья проводилось обязательно каждый раз, чтобы убедиться, что у испытуемого нет проблем со здоровьем ушей на момент проведения исследования. Перед исследованием испытуемый и экспериментатор проходили инструктаж по технике безопасности (Приложение №3: инструктаж о ходе проведения исследования).

Испытуемый допускался к исследованию после заполнения согласия и анкеты.

Во время исследования были предусмотрены перерывы на отдых по устному запросу испытуемого.

## **2.3. Оборудование и стимульный материал**

Исследования проводились с использованием портативного компьютера, компьютерных программ Stairs DX и MasterVolume, головных телефонов (фирмы Sven модели AP-G999MV). Аппаратуру и материалы для исследования предоставила лаборатория слуха ПСПБГМУ им. Павлова.

В качестве шумовой посылки для исследований лабораторией слуха было разработано 12 звуковых сигналов белого шума. Сигналами служили отрезки

белого шума полосой 100 – 1300 Гц. Длительность всех звуковых посылок составляла 2000 мс, не считая фронтов нарастания и спада длительностью по 10 мс, сглаженных косинусоидальной функцией. Пространственное положение сигналов задавалось величиной междушумной задержки  $\Delta T$  между бинаурально предъявляемыми сигналами.

В экспериментах использовались три типа звуковых стимулов, условно обозначенных как “неподвижный”, “медленный”, “быстрый”. Каждый стимул имел двухфазную структуру: неподвижная фаза (1000 мс), звук воспринимался как статичный, расположенный по средней линии головы; фаза движения (следующие 1000 мс), где моделировалось плавное перемещение звукового образа от центра к правому или левому уху. Переход между фазами был бесшовным.

Эксперимент начинался с неподвижного фрагмента длительностью 1000 мс, в течение которого звук воспринимался испытуемым как неподвижный, расположенный в области средней линии головы. За ним без паузы следовал фрагмент, моделирующий плавное перемещение источника звука от средней линии головы в сторону правого или левого уха. Пространственное положение сигналов задавалось величиной междушумной задержки  $\Delta T$  между бинаурально предъявляемыми сигналами. Стимулы синтезировали на основе одного и того же исходного сигнала и моделировали движение путем линейного сдвига отсчетов на определенном участке в соответствии с заданной величиной  $\Delta T$  (Альтман и др, 2010, Altman et al., 2010). Для создания эффекта движения на одно из ушей подавали преобразованный сигнал, а на другое – исходный сигнал. Таким образом, испытуемые работали с иллюзией движения звукового стимула. В дальнейшем под термином “движущийся” звуковой стимул/звук мы будем понимать программно созданную иллюзию движения источника звука.

Лабораторией ПСПБГМУ им. Павлова были разработаны специфичные шумовые посылки для левого (Var\_Left) и правого (Var\_Right) уха.

Специфичность звуковых сигналов обуславливается тем, что для достоверности результатов, нужно равномерно поочередно воздействовать шумовыми сигналами на уши испытуемого.

Несмотря на то, что в обычных условиях в оба уха звуки поступают с определенным различием во времени, по интенсивности и спектру, мы воспринимаем один слуховой образ. Точнее, в оба уха поступают подобные, но не идентичные звуки, сливающиеся в единый образ. Этот процесс носит название бинаурального слияния. Слуховая система воспроизводит бинауральное слияние в течение всего времени подачи в оба уха звуков, сходных в определенном отношении, однако совершенно разные звуки не сливаются. Наиболее важным для бинаурального слияния являются звуки с частотой ниже 1500 Гц (Harris J. D., 1971).

#### **2.4. Процедура эксперимента**

Исследование состояло из двух этапов: 1. Подготовительный этап 2. Основной эксперимент.

В ходе подготовительного этапа настраивалось оборудование с учетом индивидуальных особенностей слуха каждого испытуемого. Для этого использовалась компьютерная программа MasterVolume, позволяющая центрировать воспринимаемый звуковой сигнал. Программа воспроизводила сигналы с разной  $\Delta T$  (величиной междуушной задержки) до тех пор, пока испытуемому не начинало казаться, что звуковой образ приходит на среднюю линию головы.

После настройки центра звука испытуемому подавалась шумовая посылка в тестовом режиме, для настройки безопасного и комфортного уровня интенсивности звукового сигнала. Данные на реакцию подготовительного этапа не учитывались при итоговых математических подсчетах.

Во второй части исследования при помощи головных телефонов непосредственно к барабанной перепонке подавались звуковые сигналы с отсроченным началом. Первый сигнал был подготовительным и представлял собой минимальный угловой диапазон, приходящий в центр и воспринимаемый испытуемым как единый образ. Второй сигнал, всегда подавался через фиксированный временной интервал после первого стимула. Его основными варьируемыми параметрами были длительность и угловое расхождение (задаваемое  $\Delta T$ ) относительно центра. Этот сигнал варьировался от минимального звукового угла (воспринимаемый испытуемым как единый образ, до широкого угла, воспринимаемого испытуемым как два звука).

Задача испытуемого: определить, воспринимаются ли два бинаурально предъявленных сигнала как один слитный звуковой образ или как два отдельных звуковых события. Порог слияния или разделения определялся в зависимости от комбинации временной и пространственной задержек.

Экспериментатор нажимал клавишу с цифрой 1 или 2 в зависимости от ответа испытуемого. Если испытуемый говорил, что сигналов один, то есть звук приходил в среднюю линию, то экспериментатор нажимал клавишу с цифрой 1. Если же испытуемый говорил, что слышал два звука, то экспериментатор нажимал клавишу с цифрой 2.

## Результаты

Результаты исследования показали, что подростки различают звуковые сигналы в диапазоне от 800 мкс до 60 мкс. Это свидетельствует о высокой чувствительности слуховой системы испытуемых.

Значения межзудной задержки ( $\Delta T$ ), используемые в эксперименте, были: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 150, 200, 400, 600, 800 мкс. Для каждой  $\Delta T$  и каждого испытуемого рассчитывался процент ошибок – доля случаев, когда испытуемый неправильно определил число звуков, например, сказал «один», когда был подан «движущийся» сигнал. Полученные данные представлены в виде графика, рис 2. Для каждого испытуемого была построена отдельная линия, а также рассчитана средняя линия (AVERAGE) по всей группе задержки. Это позволило сгладить влияние случайных факторов (например, кратковременной утомляемости, неустойчивости внимания, моторного шума при вербализации ответа) и выделить устойчивый системный паттерн, характерный для возрастной группы в целом.

В нейрофизиологических и психофизических исследованиях пространственного слуха, включая работы лаборатории слуха ПСПБГМУ им. Павлова, усреднение индивидуальных профилей является стандартной процедурой для описания групповой тенденции. Например, в работе Шестопаловой и др. (2020) грэнд-усреднённые вызванные потенциалы (grand-average ERPs) и частотно-временные представления (ERSP/ITC) использовались для выявления надёжных компонентов MOR (Motion-onset response, MOR), несмотря на выраженную индивидуальную вариабельность. Аналогично, в нашем случае усреднение позволило выявить общий «критический диапазон»  $\Delta T = 50\text{--}100$  мкс, где наблюдается максимум ошибок, — паттерн, не всегда чётко выраженный у отдельных испытуемых.

На рис. 4 каждая цветная линия на графике соответствует одному испытуемому (обозначен кодом, например, AMD, ВАК и т.д.). Линия AVERAGE представляет собой среднее значение по всем 15 испытуемым.

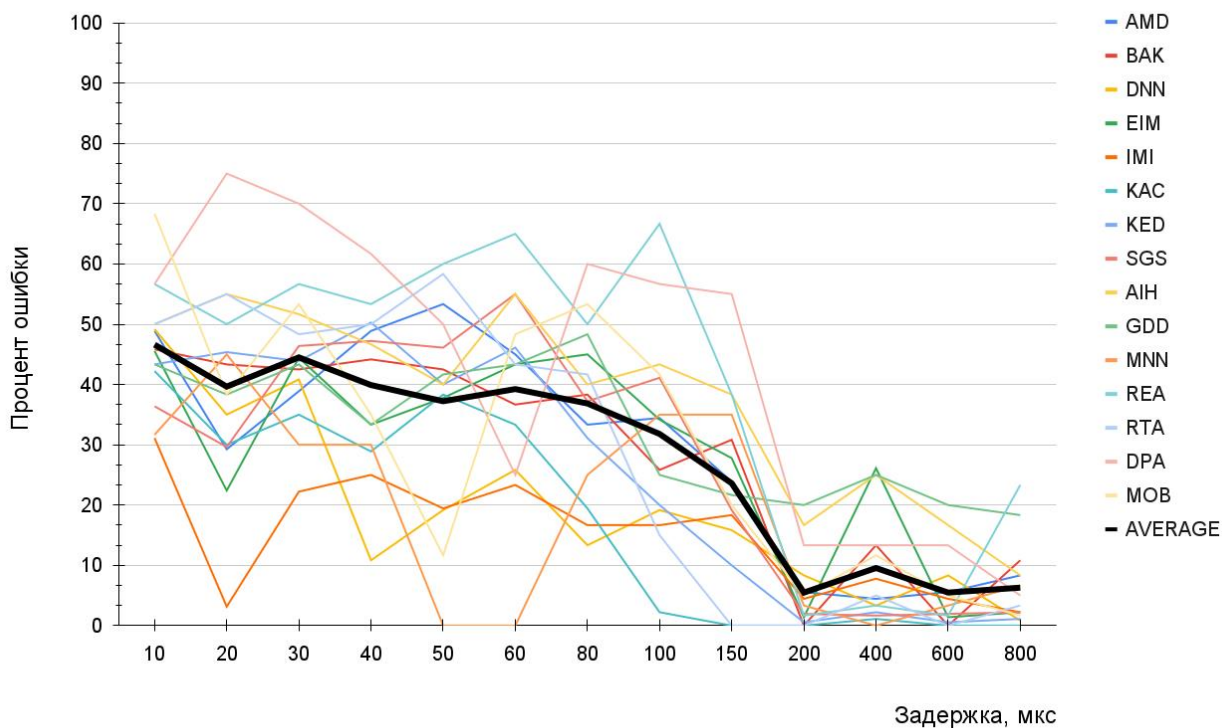


Рисунок 4. Зависимость процента ошибки ответа испытуемого от значения задержки.

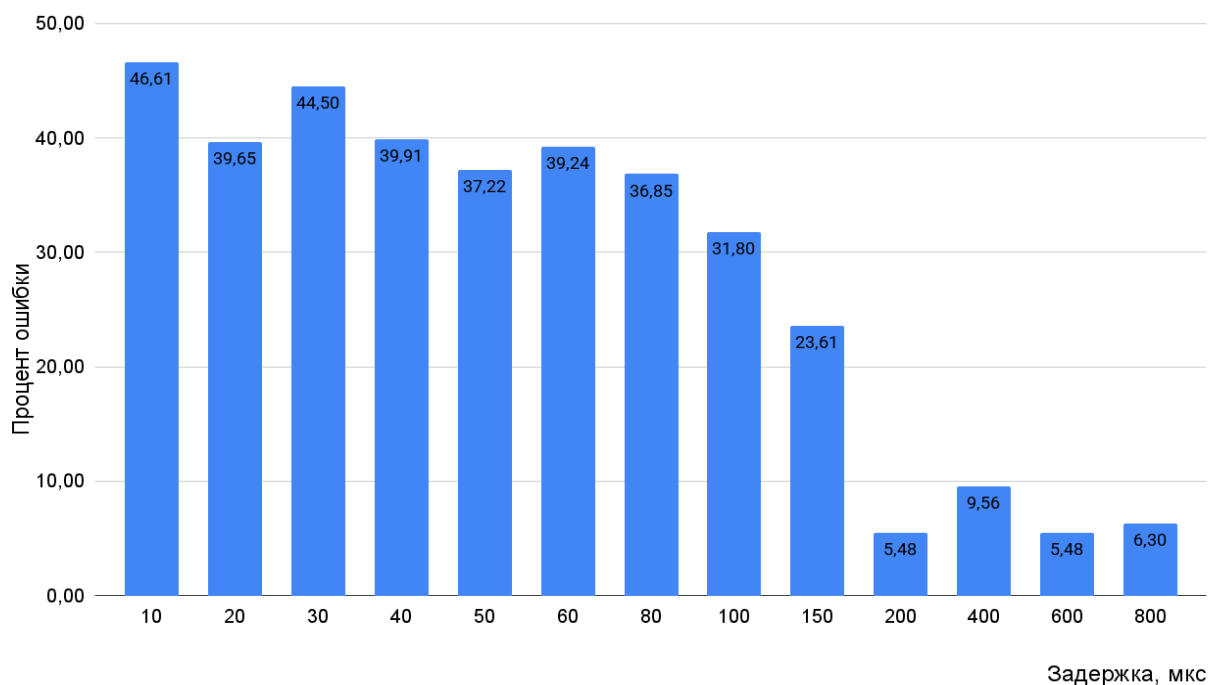
По оси X временная задержка  $\Delta T$  (мкс), по оси Y – процент ошибок.

У большинства испытуемых наблюдается снижение процента ошибок с увеличением значения  $\Delta T$ . То есть, чем больше угловое смещение звука (чем больше разница во времени прихода к ушам), тем выше вероятность того, что испытуемый правильно определит, что звук движется или приходит с двух сторон. В диапазоне  $\Delta T$  от 10 до 60 мкс (что соответствует примерно 3–6° азимута) наблюдается пик ошибок. Средний процент ошибок в этой зоне достигает 55–65%. Это означает, что в этом диапазоне большинство испытуемых испытывают наибольшие трудности в различении. Хорошо видно, что кривые разных испытуемых значительно отличаются друг от друга. Например,

испытываемый IMI (бордовая линия) демонстрирует очень низкий процент ошибок уже при  $\Delta T = 20$  мкс менее 5%, тогда как испытываемый DPA (желтая линия) имеет высокий процент ошибок более 70%. При значениях  $\Delta T$  выше 200 мкс (азимут  $> \sim 15^\circ$ ) процент ошибок у большинства испытываемых резко падает и стабилизируется на уровне ниже 10%. Это говорит о том, что при таких углах различение становится надежным.

У некоторых испытываемых наблюдаются необычные значения. Например, у испытываемого REA (голубая линия) процент ошибок падает до нуля при  $\Delta T = 60$  мкс, а затем снова растет, что может указывать на особенности восприятия или случайные ошибки. У других, например, RTA наблюдается плато ошибок до  $\Delta T = 150$  мкс.

Средняя линия подтверждает общую тенденцию: пик ошибок в районе 10–60 мкс, резкое снижение после 200 мкс и стабильный низкий уровень ошибок при больших  $\Delta T$ .



*Рисунок 5.* Средняя зависимость процента ошибки ответа испытываемого от значения задержки.

По оси X временная задержка  $\Delta T$  (мкс), по оси Y – процент ошибок.

Наибольший процент ошибки у испытуемых 46.6%, он наблюдается при минимальной задержке в 10 мкс. При данной  $\Delta T$  испытуемые наиболее часто совершали ошибки. Слуховая система человека способна обнаруживать ITD менее 10 мкс для частот ниже 1.5 кГц. Это возможно благодаря точной настройке "линий задержки" аксонам, по которым сигнал от каждого уха поступает к множеству совпаденческих детекторов, которые максимально возбуждаются (генерирует наибольшее количество потенциалов действия) только тогда, когда входные сигналы от левого и правого ушей приходят к нему абсолютно синхронно. Если импульсы приходят с разницей во времени, их воздействие суммируется неэффективно, и выходит сигнал слабее.

Полученный результат, при котором междушная задержка в 20 мкс вызывает достаточно высокий уровень ошибок при локализации 39,7%, не является случайной погрешностью. Напротив, он отражает важный психофизиологический феномен: данный временной интервал, вероятно, функционирует как сильный, но "обманчивый" локализационный сигнал. Мозг интерпретирует малую ITD как естественный, но ошибочный признак смещения источника. Центральные компенсаторные механизмы не успевают или не могут активироваться для таких малых, но физиологически значимых рассогласований. Возникает сенсорный конфликт, приводящий к дезориентации и случайным ответам. Это подтверждается исследованиями, показывающими, что адаптация к малым асимметричным задержкам затруднена, так как они попадают в рабочий диапазон естественной локализации (Kacelnik O., 2006).

По мере увеличения задержки точность локализации резко повышается (процент ошибок падает). Примерно в районе 150-200 мкс кривая выходит на "плато" или минимум ошибок. Здесь система слуха достигает своей максимальной точности.

При дальнейшем увеличении задержки 400-800 мкс процент ошибок незначительно возрастает с 5.48% до 6.30%, что может объясняться не естественностью столь больших задержек.

Таблица 2. Процент ошибок различения для каждого значения междушумной задержки у испытуемых.

	10	20	30	40	50	60	80	100	150	200	400	600	800
IMI	31,11	3,15	22,22	25	19,44	23,33	16,67	16,67	18,33	4,44	7,78	4,44	2,22
DNN	49,17	35	40,83	10,83	19,17	25,83	13,33	19,17	15,83	8,33	3,33	8,33	0,83
KED	43,33	45,37	43,89	50,28	40	46,11	31,11	20	10	0,56	2,22	0,56	1,11
GDD	43,33	38,33	43,33	33,33	41,67	43,33	48,33	25	21,67	20	25	20	18,33
MOB	68,33	38,33	53,33	35	11,67	48,33	53,33	41,67	20	5	11,67	5	1,67
AMD	48,89	29,26	38,89	48,89	53,34	45	33,34	34,45	23,89	5,56	4,44	5,56	8,33
EIM	45,56	22,41	44,44	33,33	37,78	43,33	45	34,17	27,78	1,39	26,11	1,39	2,22
SGS	36,39	29,63	46,39	47,22	46,11	55	37,22	41,11	19,17	1,94	1,67	1,94	2,22
AIH	50	55	51,67	46,67	40	55	40	43,33	38,33	16,67	25	16,67	8,33
REA	56,67	50	56,67	53,33	60	65	50	66,67	38,33	1,67	3,33	1,67	23,33
BAK	45,83	43,33	42,5	44,17	42,5	36,67	38,33	25,83	30,83	0	13,33	0	10,83
RTA	50	55	48,33	50	58,33	43,33	41,67	15	0	0	5	0	3,33
KAC	42,22	30	35	28,89	38,33	33,33	19,44	2,22	0	0	1,11	0	0
MNN	31,67	45	30	30	0	0	25	35	35	3,33	0	3,33	6,67
DPA	56,67	75	70	61,67	50	25	60	56,67	55	13,33	13,33	13,33	5
AVERAGE	48,89	43,11	48,21	44,48	37,93	41,48	42,47	42,1	32,04	5,43	10,99	5,43	7,62

Примечание к табл.2: Строка содержит измерения для одного испытуемого при разных задержках звукового сигнала для испытуемого, ячейка содержит процент ошибки испытуемого при определенной задержке. Выделено желтым процент ошибки 0%, зеленым процент ошибки от 0% - 30%, красным процент ошибки от 70% - 100%.

Для удобства анализа данных мы распределили ошибки междушумной задержки у испытуемых на три группы: группа I низкий уровень ошибок (0–30 %), группа II средний уровень ошибок (30–70 %), группа III высокий уровень ошибки (70–100 %).

У испытуемых IMI, KAC, MNN наблюдается низкий уровень ошибки, уже при  $\Delta T = 20\text{--}40$  мкс ( $\approx 1\text{--}2^\circ$ ) процент ошибок падает ниже 25 %, а при  $\Delta T \geq 100$  мкс почти до 0 %.

У испытуемых AMD, ВАК, DNN, EIM, KED, SGS, АИИ, GDD, RTA, МОВ выявлен средний уровень ошибок. У данной группы пик ошибок приходится на  $\Delta T = 50\text{--}100$  мкс (40–65 %), а при  $\Delta T > 200$  мкс точность резко возрастает .

У испытуемых REA, DPA наибольший уровень ошибок при  $\Delta T = 20\text{--}40$  мкс ошибка  $\geq 50$  %, снижение пика ошибок происходит только при  $\Delta T \geq 400$  мкс.

Таблица наглядно демонстрирует, что способность к различению угловых смещений звука варьируется индивидуально, но существует общий «критический» диапазон, в котором система пространственного слуха работает с наибольшей нагрузкой.

Эксперименты показали, что если подавать через наушники два высокочастотных звука с разными частотами, то они воспринимаются как отдельные звуковые сигналы, однако если эти сигналы промодулировать каким-либо низкочастотным звуком, то оба сигнала сливаются в единый слуховой образ.

## Обсуждение результатов

Полученные в ходе настоящего исследования эмпирические данные формируют основу для ряда значимых выводов, которые находят свое осмысление в свете ключевых работ, посвященных классическим и современным аспектам пространственного слуха. Они открывают возможность для сравнительного анализа как с фундаментальными результатами Perrott D.R. (1977), установившего базовые закономерности восприятия минимального угла движущегося звукового сигнала (Minimum Audible Movement Angle, МАМА) в условиях бинаурального слушания, так и с современными нейрофизиологическими исследованиями. Последние представлены работой Шестопаловой Л.Б. (2020) о ритмической активности мозга, ассоциированной с движением звуковых стимулов, и исследованием Семеновой В.В. (2022), изучившей временное «окно интеграции» пространственной слуховой информации на уровне электрофизиологических и психофизических коррелятов восприятия. Сопоставление полученных пороговых значений с выводами указанных исследований позволяет оценить как сходства в базовых психоакустических параметрах, так и возможные различия, обусловленные возрастным фактором.

Нам было обнаружено, что общая тенденция снижения процента ошибок с увеличением междушной задержки ( $\Delta T$ ) полностью согласуется с классическими представлениями о работе бинауральной системы. Чем больше разница во времени прихода звука к ушам, тем легче мозгу определить направление, что подтверждается работами (Perrott D.R., 1977) и (Perrott D.R., 1977). Это фундаментальное свойство ITD-кодирования сохраняется и у подростков.

Мы выявили, что при минимальной задержке в 10 мкс наблюдается наибольший процент ошибки у испытуемых 46.6%. Мы связываем такие

показатели ошибки с тем, что это достаточно редкая разница прихода звука на оба уха и задние двухолмие не было привычно к такой междушной задержке.

Так же нами был выявлен критический диапазон  $\Delta T = 10\text{--}60$  мкс. В данный диапазон представляет собой область перехода от бинаурального слияния к раздельному восприятию, испытуемые подростки в 80% испытывали затруднения в распознавании углового междушного сигнала. Тогда как у взрослых средний минимальный порог составил 66 мкс (Perrott D.R., 1977). Об этом говорится в работе Рочевой М.И 2011 года, автор в своей работе название “Выявление топического представительства бинауральных характеристик среднемозгового отдела слуха заднего двухолмия” это согласуется с проведенными нами исследованиями.

В этой зоне звуковые образы еще не успевают полностью «распадаться» на два отдельных источника, что создает для испытуемого сенсорную неопределенность. Этот феномен хорошо описан в литературе как «окно интеграции» (Семенова В. В., 2022). Наше исследование показывает, что это окно у подростков 15–16 лет находится в диапазоне 10–60 мкс, что соответствует углам 3–6°, что близко к данным для взрослых (Perrott D.R., 1977). Это говорит о том, что базовый механизм бинаурального слияния уже сформирован в этом возрасте.

Однако наиболее интересными являются результаты, связанные с высокой индивидуальной вариабельностью. Некоторые подростки, например, ІМІ демонстрируют порог различения, сравнимый с порогами взрослых испытуемых (порядка 1–2°, что соответствует  $\Delta T \approx 20$  мкс) (Perrott D.R., 1977).

С другой стороны, у ряда испытуемых, например, DNN порог различения был значительно выше — около 125 мкс (~7.5°). Это противоречит представлению о завершённом созревании системы к 15–16 годам. Еще одним неожиданным результатом является отсутствие значимой разницы между «быстрым» и «медленным» стимулами в итоговом анализе. В классических

работам (Perrott D.R., 1977) МАМА растёт с увеличением скорости движения. Мы считаем, что данный результат обусловлен тем, что в программе Stairs  $D\dot{X}$  движение реализовано линейным нарастанием  $\Delta T$ , в то время как в классических работах использовалось равномерное угловое перемещение физического источника. При линейной  $\Delta T(t)$  угловая скорость не постоянна – она максимальна в начале движения и падает по мере приближения к 800 мкс, что может «сглаживать» эффект скорости.

Высокая вариабельность может объясняться через модель Рочевой: которая говорит, что у подростков топографический градиент  $\Delta T$  в заднее двухолмие ещё не полностью стабилизирован, т.е. у одних уже сформированы задние двухолмия, у других еще нет (М.И Рочева, 2011).

Предложенная в настоящем исследовании классификация испытуемых на три группы по уровню ошибок локализации: группа I, 0–30%; группа II, средний 30–70%; группа III, высокий 70–100%. Такое распределение позволяет не только систематизировать данные, но и выдвинуть гипотезу о различных стадиях созревания бинауральных механизмов в подростковом возрасте. Такое распределение хорошо согласуется с современными представлениями о гетерохронности развития нервной системы. В частности, модель Рочевой М.И. (2011) о неравномерном формировании топографических карт в заднем двухолмии предлагает нейрофизиологическое объяснение наблюдаемого феномена: испытуемые с низким уровнем ошибок могут отражать группу с относительно зрелой организацией детекторов междушной задержки, в то время как высокая вариативность в группах со средним и высоким уровнем ошибок соответствует переходному периоду, когда синаптическое ремоделирование и миелинизация соответствующих проводящих путей ещё не завершены. Таким образом, континуум ошибок, выявленный в нашем эксперименте, может

напрямую отражать континуум индивидуальных траекторий нейроонтогенеза слуховой системы в возрасте 15–16 лет.

Так в группе I процесс созревания топографических карт межужной задержки ( $\Delta T$ ) в заднем двухолмии, возможно, завершён или находится на финальной стадии. Согласно данным Рочевой (2011), зрелая организация нейронов в ростральных отделах ЗД обеспечивает высокую чувствительность к малым  $\Delta T$  (10–30 мкс). Это может быть обусловлено ранним завершением миелинизации слуховых путей или богатым аудиальным опытом (музыка, иностранные языки, активное участие в диалогах), или генетически обусловленной скоростью нейрональной пластичности.

В группе II у большинства подростков система пространственного слуха находится в активной фазе созревания. Топографический градиент  $\Delta T$  в заднем двухолмии сформирован частично, но еще нестабилен. Нейроны, настроенные на малые задержки, присутствуют, но их активность недостаточно согласована с корковыми механизмами внимания. Согласно Л.Б. Шестопаловой “Ритмическая активность мозга человека, связанная с движением звуковых стимулов” 2020 год, эффективная локализация требует фазовой подстройки  $\delta$ – $\theta$ -ритмов, которая зависит от внимания. У этих подростков, возможно, внимание к задаче колеблется (усталость, мотивация) или корково-подкорковые связи ещё не оптимизированы, или бинауральное слияние и отдельное восприятие четко разделены только при больших  $\Delta T$ . Эта группа представляет нормативный вариант онтогенеза — большинство подростков находятся именно здесь.

В группе III у этих подростков процесс формирования  $\Delta T$ -карт в заднем двухолмии либо задержан, либо протекает атипично. Возможно, позднее созревание слуховых центров (гетерохрония развития) или ограниченный аудиальный опыт в критические периоды (например, частые отиты в детстве, мало разговорной практики). Также, возможно, биометрическое несоответствие:

размер головы и ушных раковин ещё не соответствует «взрослой» HRTF (Head-Related Transfer Function, HRTF), что снижает эффективность бинауральных подсказок при виртуальной стимуляции еще мог повлиять низкий уровень вовлеченности внимания: согласно Шестопаловой, без активной фокусировки  $\delta$ - $\theta$ -ITC (Delta-Theta-IntraCochlear,  $\delta$ - $\theta$ -ITC) не усиливается, и система полагается только на «грубые» подсказки (большие  $\Delta T$ ). Это не патология, а естественный крайний вариант нормы — подростки, у которых созревание пространственного слуха завершится ближе к 18–20 годам.

Разделение на три группы отражает естественный спектр гетерохронного созревания слуховой системы в подростковом возрасте. Это согласуется с современными данными нейровизуализации (Lebel & Beaulieu, 2011), согласно которым миелинизация ассоциативных слуховых путей продолжается до 20 лет.

Нами был построен график индивидуальных кривых, который демонстрирует высокую вариабельность. Усреднение служит опорной осью для интерпретации: к нему привязываются как средние значения, например, пик ошибок 60 %, так и отклонения от него, например, «чувствительные» и «менее чувствительные» субъекты. Усреднение обеспечивает оценку центра распределения поведенческого отклика и позволяет сопоставить полученные данные с литературными нормами (например, МАА/МАМА у взрослых), которые также основаны на групповых усреднениях.

С точки зрения нейрофизиологии, наши результаты согласуются с данными (Шестопалова Л.Б., 2020). Авторы показали, что фазовая когерентность медленных ритмов  $\delta$ - $\theta$  является более чувствительным маркером восприятия движения, чем амплитуда суммарного вызванного потенциала. Высокая вариабельность в нашем исследовании может быть связана с нестабильностью фазовой синхронизации в  $\delta$ - $\theta$  колебаний у подростков. Работа Л. Б. Шестопаловой также показала, что привлечение внимания к движению звука

усиливает фазовую подстройку и мощность  $\delta$ - $\theta$  колебаний. В нашем случае внимание было направлено на задачу, но не на скорость или направление, что могло повлиять на результаты.

Средний процент ошибок у подростков выше, чем у взрослых при тех же  $\Delta T$  – что ставит под сомнение гипотезу о завершённом созревании к 12–13 годам и соотносится с данными МРТ о продолжении миелинизации до 18–20 лет.

Бинауральная стимуляция через наушники – валидный, но неполный аналог реального пространственного слуха, из-за чего это может влиять на результат и для клинического применения её следует дополнять индивидуальными (Head-Related Transfer Function, HRTF) или проводить сопоставление с тестированием в свободном звуковом поле (free-field тесты). HRTF описывает, как звук от источника в пространстве преобразуется до того, как достигает барабанной перепонки. На преобразование звука влияет форма ушной раковины, также влияет то, как звук огибает голову (создавая задержку и ослабление – ILD и ITD), преломляется, частично поглощается. Free-field тесты – это методы аудиологического или психоакустического тестирования, при которых звук предъявляется через громкоговорители в акустически подготовленном помещении, а не через наушники или вставные наушники. Если применять вышеперечисленные методы, то возможно снижение процента ошибки, так как игнорирование индивидуальных показателей ведет к плохой локализации звука, ощущению, что звук «в голове» или «сзади», когда должен быть спереди.

Таким образом, полученные данные позволяют сделать вывод, что пространственный слух у подростков 15-16 лет – это не «усреднённое» состояние, а динамический профиль, отражающий баланс между биологической зрелостью и сенсомоторным опытом. Индивидуальные различия указывают на необходимость персонализированного подхода в аудиологической диагностике и реабилитации подростков.

## Выводы

На основании проведенного теоретического анализа и экспериментального исследования с участием 15 подростков 15-16 лет с нормальным слухом были сделаны следующие выводы:

1. Экспериментально подтверждена фундаментальная зависимость, лежащая в основе пространственного слуха: точность различения звуковых сигналов достоверно возрастает с увеличением междушной задержки ( $\Delta T$ ). Чем больше временная разница в поступлении звука к правому и левому уху, тем легче слуховой системе определить и различить два звуковых сигнала. Данный факт свидетельствует о функциональной зрелости как периферических, так и основных подкорковых механизмов бинаурального слуха у участников исследуемой возрастной группы.

2. Установлено, что максимальное количество ошибок (максимальная сенсорная неопределённость) наблюдается в диапазоне междушных задержек от 50 до 100 мкс. Этот интервал соответствует угловому смещению источника звука примерно на  $3-6^\circ$  и представляет собой зону перехода от бинаурального слияния (когда два сигнала воспринимаются как единый) к отдельному восприятию двух слуховых стимулов. Полученные результаты согласуются с понятием «окна интеграции» в нейрофизиологии слуха. Из этого следует что у подростков центральный механизм ответственный за этот процесс уже активный.

3. Также исследование выявило индивидуальный разброс в точности пространственного слуха среди испытуемых. Пороговые углы различия варьировались от  $\Delta T$  20 мкс около  $2^\circ$  (что сопоставимо с чувствительностью взрослых), до  $\Delta T$  125 мкс, около  $8^\circ$ . Это указывает на разновременность созревания центральных отделов слуховой системы у испытуемых подростков, то есть у испытуемых данного возраста, и, вероятно, связано с тем, что пока слуховое восприятие ещё продолжает формироваться, и что на данном этапе,

миелинизация нейронных сетей ещё не закончена, и не до конца сформирована кора, которая воспринимает звуковые сигналы.

4. Полученные данные позволяют нам говорить о том, что к 15–16 годам пространственный слух является функционально уже полноценным, однако его окончательное нейрофизиологическое созревание ещё завершено не до конца. И что, несмотря на то, что уже имеются рабочие механизмы восприятия, ещё продолжается процесс оптимизации и стабилизации слуховой информации, который ответственен за тонкий анализ временных параметров звука. Об этом говорит, высокий по сравнению со взрослыми средний уровень ошибок и высокая вариабельность.

5. Мы видим в этой работе практическую значимость и видим дальнейшие направления для исследований. Полученные данные подчёркивают, необходимость продолжать диагностику, нарушения, особенности, и общие процессы обработки слуха у подростков с учётом естественность созревания. Работа может быть важна для создания аудиосистем, адаптированных для подростков с учётом особенностей восприятия слуховой информации в подростковом возрасте. Также, мы видим необходимость изучать и проводить более комплексные исследования, которые покажут больше детальной информации про особенности слуха подростков.

Таким образом, наше исследование вносит вклад в понимание того, что слуховая система в подростковом возрасте представляет собой вариабельную стадию развития. Это ещё незрелая система, в которой ещё не завершена тонкая настройка слуховой коры. Его характеристики зависят от степени созревания топонейронных карт в заднем двухолмии и уровня вовлечения внимания. Такие выводы имеют важное значение для развития технологий и диагностических норм, в областях, которые взаимодействуют со слуховыми процессами подростков. Например, они важны для разработки адаптивных

слуховых аппаратов и оптимизации аудиоинтерфейсов в образовательных и развлекательных средах для подростков.

## Список литературы

1. Harris J. D. Sergeant R. E. The effect of source motion on localization. [Журнал]. - [б.м.] : Journal of the Acoustical Society of America., 1971. - 2 : Т. 49.
2. Perrott D.R. Musicant A.D. Minimum audible movement angle: Binaural localization moving sound. - [б.м.] : J. Acoustical Society of America., 1977 г.. - 65 : Т. 6.
3. Perrott D.R. Tucker J. Minimum audible movement angle as a function of signal frequency and the velocity of the source. - [б.м.] : J. Acoustical Society of America., 1977 г.. - 83 : Т. 4.
4. ГОСТ Р ИСО 12124-2009: Акустика. Методы измерения акустических характеристик слуховых аппаратов на ухе человека.
5. Рочева М.И. Выявление топического представительства бинауральных характеристик среднемозгового отдела слуха заднего двухолмия. - [б.м.] : Вестник Томского государственного университета. Биология., 2011 г.. - 3 : Т. 15.
6. Семенова В. В. Окно интеграции пространственной слуховой информации у человека: электропсихофизиологические аспекты восприятия. - 2022.
7. Шестопалова Л. Б. Петропавловская Е. А., Семенова В. В., Никитин Н. И., Ритмическая активность мозга человека, связанная с движением звуковых стимулов. - [б.м.] : Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова., 2020 г.. - 5 : Т. 70.
8. Халфина В.В., Насыров М.В., Объективные методы исследования слуха: Научный медицинский журнал Кыргызской государственной медицинской академии., 2013 г.
9. Blauert, J. Spatial Hearing. The Psychophysics of Human Sound Localization. 1997.
10. Duda, R. O., & Martens, W. L. Range dependence of the interaural time difference. The Journal of the Acoustical Society of America, 1998, 103(5), 2530-2540

11. Eggermont, J. J., Auditory temporal processing and its disorders. Oxford University Press., 2015.
12. Giedd, J. N., Blumenthal, J., Jeffries, N. O., Castellanos, F. X., Liu, H., Zijdenbos, A., & Rapoport, J. L., Brain development during childhood and adolescence: a longitudinal MRI study. *Nature Neuroscience*, 1999, 2(10), 861-863.
13. Lebel, C., & Beaulieu, C., Longitudinal development of human brain wiring continues from childhood into adulthood. *Journal of Neuroscience*, 2011, 31(30), 10937-10947.
14. Moore, D. R., Auditory development and the role of experience. *British Medical Bulletin*, 2002, 63(1), 171-181.
15. Moore, J. K., & Linthicum, F. H., The human auditory system: A timeline of development. *International Journal of Audiology*, 2007, 46(9), 460-478.
16. Paus, T., Mapping brain maturation and cognitive development during adolescence. *Trends in Cognitive Sciences*, 2005, 9(2), 60-68.
17. Paus, T., Keshavan, M., & Giedd, J. N., Why do many psychiatric disorders emerge during adolescence? *Nature Reviews Neuroscience*, 2008, 9(12), 947-957.
18. Sanes, D. H., & Woolley, S. M. A behavioral framework to guide research on central auditory development and plasticity. *Neuron*, 2011, 72(6), 912-929.
19. Skoe, E., & Kraus, N., Auditory brainstem response to complex sounds: a tutorial. *Ear and Hearing*, 2010, 31(3), 302.
20. Mills, A. W., On the minimum audible angle. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1958, 30(4), 237-246.
21. Rideout V., Robb M. B. *The Common Sense census: Media use by tweens and teens*, 2019. San Francisco, CA: Common Sense Media, 2019. 104 p
22. Kacelnik, O., Nodal, F. R., Parsons, C. H., & King, A. J. Training-induced plasticity of auditory localization in adult mammals, 2006
23. <https://textarchive.ru/c-2574237.html>

# Приложения

## Приложения

### Приложение №1: информированное согласие

#### ИНФОРМИРОВАННОЕ СОГЛАСИЕ

Уважаемые родители!

В период с 1.09.2024 – 30.05.2025 на отделении Общей Биологии ЭБЦ «Крестовский остров» будет проведен комплекс исследований, посвящённый изучению пространственного слуха детей в возрасте 14-18 лет.

Проект организован совместно с лабораторией физиологии слуха ФГБУН Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН. Для набора данных в исследовании принимают участие учащиеся ЭБЦ «Крестовский остров».

**Приглашаем Вашего ребенка для участия в исследовании, просим Вас заполнить это информированное согласие.**

В ходе исследования планируется определять индивидуальное пороговое угловое расстояние между звуковыми сигналами (слуховые пороги) возрастных групп 14-18 лет при помощи оборудования: наушники, компьютерная программа. Звуковые сигналы будут предъявляться слушателям через головные телефоны (наушники). Изменяемым параметром в эксперименте будет угловое расстояние между слуховыми объектами в горизонтальной плоскости. При большом угловом расстоянии будут отчетливо слышны два сигнала, а при сближении к центру они постепенно начнут сливаться в один. Звуковой сигнал будет подаваться с безопасным, комфортным уровнем интенсивности. Минимальное расстояние, при котором слушатель различает два сигнала, называется пороговым. Испытуемый информирует исследователя о наличии звука, который он слышит. Исследование занимает около 50-80 минут, планируется в 3-х кратной повторяемости.

**Конфиденциальность всех медицинских и личных данных Вашего ребенка Вам гарантирована.**

Вы можете в любое время по Вашему желанию отказаться от дальнейшего участия Вашего ребенка в исследовании.

Пожалуйста, подтвердите участие Вашего ребёнка в исследовательской программе (передайте с ребёнком это согласие).

Я, \_\_\_\_\_,  
вписать Ф.И.О.

СОГЛАСЕН/СОГЛАСНА на участие моего ребенка \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_ в исследовании.

вписать Ф.И.О.

Дата

Подпись

С уважением, педагог «Отделения общей биологии» ЭБЦ «Крестовский остров», Задевалова Мария Игоревна (Телефон)

## Приложение №2: Анкета здоровья.

### АНКЕТА ЗДОРОВЬЯ

Дата \_\_\_\_\_

ФИО \_\_\_\_\_

Дата рождения \_\_\_\_\_

Есть ли у вас проблемы со слухом (отит, тугоухость, другое) НЕТ ДА

Если да, то какие \_\_\_\_\_

Имеются ли у вас какие-либо неврологические проблемы (эпилепсия, тики) другие \_\_\_\_\_

Если \_\_\_\_\_ да, \_\_\_\_\_ то \_\_\_\_\_ какие \_\_\_\_\_

Принимаете ли вы психотропные препараты, транквилизаторы \_\_\_\_\_

Страдаете ли вы клаустрофобией НЕТ ДА

Имеются ли у вас хронические заболевания НЕТ ДА

Если \_\_\_\_\_ да, \_\_\_\_\_ то \_\_\_\_\_ какие \_\_\_\_\_

Имеются ли у вас вредные привычки НЕТ ДА

Если \_\_\_\_\_ да, \_\_\_\_\_ то \_\_\_\_\_ какие \_\_\_\_\_

## Приложение №3: инструктаж о ходе проведения исследования

### ИНСТРУКТАЖ о ходе проведения исследования

1. Пройти инструктаж техники безопасности проведения эксперимента.
2. Включить компьютер.
3. Подготовить испытуемого к исследованию
  - **взять у испытуемого информированное согласие на исследование**, согласие должно быть подписано родителями/законными представителями (положить согласие в папку);
    - убедиться, что испытуемый чувствует себя в норме;
    - рассказать о ходе эксперимента;
    - провести инструктаж по технике безопасности.
4. **Открыть программу в панели задач Master Volume**
  - проверить, чтобы рычаг громкости был зафиксирован на минимальном значении;
    - произвести настройку принимаемого испытуемым и подаваемого экспериментатором звука, в настройке Master Voice выставить флажок, чтобы испытуемый ощущал восприятие звука в центре (найти индивидуальную середину для каждого испытуемого, не обязательно этот центр будет совпадать с центральным расположением флажка в программе).
5. **Открыть программу StairsDX**
  - в программе нажать окно File;
  - выбрать вкладку Open Session;
  - выбрать место расположения программы Dick C.;
  - выбрать папку, из которой будут подаваться звуковые сигналы  
DizProgs далее Stairs\_ORN\_stimuli далее Filt\_Front\_new  
(Путь аудиосигнала **Dick C:\DizProgs\Stairs\_ORN\_stimuli\Filt\_Front\_new.**

6. Открыть книгу учета эксперимента, вписать

- ДАТА;

- ФИО исследователя.

**7. Вписать данные испытуемого**

- ФИО, индивидуальный код испытуемого;

- дата проведения эксперимента;

- время проведения эксперимента;

- убедиться, что испытуемый готов начинать исследование.

8. Начать подавать сигналы, ход эксперимента фиксировать в книге учета.

- Последовательно подавать сигналы от 800-10mlc.

Выбрать первый сигнал Psy\_function 800mlc.

9. Сохранить результаты в папку ДискС – DizProgs-- ORN\_test\_results в формате **KOD\_800\_VarLeft\_DATA**.

10. Проверить готовность испытуемого. **После нажатия кнопки SAVE программа начнет предъявлять звуковой стимул.** После предъявления 30 стимулов нажать STOP.

**Фиксировать ход эксперимента в книге учета.**

800 мкс – VarLeft.sts 30 trails	80 мкс – VarLeft.sts 30 trails
800 мкс – VarRight.sts 30 trails	80 мкс – VarRight.sts 30 trails
600 мкс – VarLeft.sts 30 trails	60 мкс – VarLeft.sts 30 trails
600 мкс – VarRight.sts 30 trails	60 мкс – VarRight.sts 30 trails
400 мкс – VarLeft.sts 30 trails	40 мкс – VarLeft.sts 30 trails
400 мкс – VarRight.sts 30 trails	40 мкс – VarRight.sts 30 trails
200 мкс – VarLeft.sts 30 trails	30 мкс – VarLeft.sts 30 trails
200 мкс – VarRight.sts 30 trails	30 мкс – VarRight.sts 30 trails
150 мкс – VarLeft.sts 30 trails	20 мкс – VarLeft.sts 30 trails
150 мкс – VarRight.sts 30 trails	20 мкс – VarRight.sts 30 trails
100 мкс – VarLeft.sts 30 trails	10 мкс – VarLeft.sts 30 trails
100 мкс – VarRight.sts 30 trails	10 мкс – VarRight.sts 30 trails