

ФИЗИОЛОГИЯ СЛУХА: МЕХАНИЗМЫ ВОСПРИЯТИЯ ЗВУКА И ПОДДЕРЖАНИЯ РАВНОВЕСИЯ.

*Научный руководитель: старший
Преподаватель кафедры “Медицины”*

PhD Юсупов А.П

Тулкинов Х.Х. Абдуллаев О.Б

Alfraganus University g.

Ташкент, Узбекистан.

Аннотация: Настоящей обзорной статье представлен исчерпывающий анализ работы слухового и вестибулярного аппаратов человека. В ней подробно описаны анатомические элементы наружного, среднего и внутреннего уха, а также их значение в преобразовании и транспортировке звуковых волн. Значительное внимание уделено клеточным и молекулярным процессам механоэлектрического преобразования в волосковых клетках кортиева органа, являющихся основой кодирования звуковой информации. Последовательно излагаются центральные слуховые пути, от слухового нерва до высших отделов коры головного мозга, которые отвечают за обработку, интерпретацию и восприятие звуков, включая определение тона, интенсивности и направления звука. Вторая часть обзора посвящена физиологии вестибулярной системы. Детально рассматривается устройство и функционирование отолитового аппарата и полукружных каналов, их роль в обнаружении линейных и угловых перемещений. Описаны основные вестибулярные рефлексy, такие как вестибуло-окулярный и вестибуло-спинальный, обеспечивающие устойчивость взгляда и поддержание равновесия. В завершающих разделах статьи затронуты современные вызовы и нерешенные задачи в области аудиологии и вестибулологии, включая патогенез сенсоневральной потери слуха, шума в ушах, нарушений равновесия, а также обсуждаются возможности внедрения инновационных методов диагностики и терапии, таких как генная инженерия и восстановление сенсорных клеток.

Ключевые слова: Физиология слуха, вестибулярная система, ухо, улитка, кортиев орган, волосковые клетки, механоэлектрическая трансдукция, слуховой нерв, слуховая кора, равновесие, полукружные каналы, отолиты, вестибуло-окулярный рефлекс, сенсоневральная тугоухость, тиннитус, кохлеарная имплантация.

Abstract: This review article provides an exhaustive analysis of the functioning of the human auditory and vestibular apparatus. It describes in detail the anatomical

elements of the outer, middle and inner ear, as well as their significance in the transformation and transportation of sound waves. Considerable attention is paid to the cellular and molecular processes of mechanoelectric transformation in the hair cells of the cortical organ, which are the basis for encoding sound information. The central auditory pathways are sequentially described, from the auditory nerve to the higher parts of the cerebral cortex, which are responsible for processing, interpreting and perceiving sounds, including determining the tone, intensity and direction of sound. The second part of the review is devoted to the physiology of the vestibular system. The design and functioning of the otolith apparatus and semicircular channels, their role in detecting linear and angular movements, are considered in detail. The main vestibular reflexes, such as vestibulo-ocular and vestibulo-spinal, are described, providing gaze stability and maintaining balance. The final sections of the article address current challenges and unresolved issues in the field of audiology and vestibulology, including the pathogenesis of sensorineural hearing loss, tinnitus, and balance disorders, and discuss the possibilities of introducing innovative diagnostic and therapeutic methods such as genetic engineering and sensory cell repair.

Keywords: Hearing physiology, vestibular system, ear, cochlea, cortical organ, hair cells, mechanoelectric transduction, auditory nerve, auditory cortex, balance, semicircular canals, otoliths, vestibuloocular reflex, sensorineural hearing loss, tinnitus, cochlear implantation.

Введение:

Значение слуха и равновесия в жизнедеятельности человека

Слух и равновесие являются фундаментальными сенсорными модальностями, которые обеспечивают наше взаимодействие с окружающим миром и ориентацию в нем. Слух, способность воспринимать звуковые колебания, лежит в основе вербальной коммуникации — краеугольного камня человеческого общества. Он позволяет нам наслаждаться музыкой, предупреждает об опасности и обогащает наше восприятие реальности. Потеря слуха ведет не только к сенсорной депривации, но и к социальной изоляции, когнитивным нарушениям и значительному снижению качества жизни.

Система равновесия, или вестибулярная система, работает в тесной кооперации со зрением и проприоцепцией (мышечно-суставным чувством), чтобы обеспечивать стабильность нашего тела в пространстве. Благодаря ей мы можем стоять, ходить, бегать и совершать сложные движения, сохраняя при этом четкость зрения и ориентацию. Нарушения этой системы проявляются в виде головокружения, неустойчивости и тошноты, делая невозможным выполнение даже самых простых повседневных задач. Несмотря на то, что работа

вестибулярной системы часто остается неосознанной, ее вклад в нашу повседневную активность невозможно переоценить.

Эволюционные аспекты развития слуховой и вестибулярной систем

Слуховая и вестибулярная системы имеют общее эволюционное происхождение. Они развились из механорецепторных органов боковой линии у рыб и амфибий, которые служили для детекции движений воды. Вестибулярный аппарат является более древней структурой, изначально предназначенной для восприятия гравитации и собственного движения тела. Слуховая функция развилась позже как специализация части вестибулярного лабиринта. У наземных позвоночных возникла необходимость воспринимать звуковые волны, распространяющиеся в воздушной среде, что привело к формированию сложного аппарата среднего уха (слуховых косточек) для эффективной передачи энергии звука из воздуха во внутреннее ухо, заполненное жидкостью. Этот эволюционный путь объясняет тесную анатомическую и функциональную связь между двумя системами, которые располагаются в едином костном лабиринте височной кости.

Цели и задачи данного обзора

Целью данного обзора является систематизация и обобщение современных научных знаний о физиологии слуха и равновесия. Для достижения этой цели поставлены следующие задачи:

Подробно описать анатомическое строение органа слуха и равновесия как основу для понимания его функций.

Проанализировать физические и биомеханические процессы проведения и трансформации звука.

Раскрыть клеточные и молекулярные механизмы преобразования механической энергии в нервный импульс (механоэлектрическая трансдукция).

Проследить путь обработки сенсорной информации в центральной нервной системе, от периферического рецептора до коры больших полушарий.

Описать принципы работы вестибулярной системы и ее роль в поддержании постурального контроля и стабильности зрения.

Осветить ключевые нерешенные проблемы в данной области и обозначить наиболее перспективные направления будущих исследований.

Данная работа предназначена для широкого круга читателей: студентов-биологов и медиков, аспирантов, научных сотрудников, а также практикующих врачей — оториноларингологов, неврологов и сурдологов.

Анатомия органа слуха и равновесия

Наружное ухо: ушная раковина и наружный слуховой проход

Наружное ухо представляет собой первую инстанцию на пути звуковой волны. Оно состоит из ушной раковины (лат. *auricula*) и наружного слухового прохода (лат. *meatus acusticus externus*).

Ушная раковина является сложной хрящевой структурой, покрытой кожей. Ее замысловатая форма, с характерными завитками (*helix*), противозавитками (*antihelix*), козелком (*tragus*) и мочкой (*lobulus*), играет важную функциональную роль. Во-первых, она функционирует как акустическая антенна, улавливая и концентрируя звуковые волны, направляя их в слуховой проход. Это приводит к некоторому увеличению звукового давления (на 3-5 дБ) в области средних частот (2-5 кГц), что особенно важно для восприятия речи. Во-вторых, асимметричная форма ушной раковины вносит в приходящий звук специфические спектральные искажения (фильтрацию), которые зависят от направления прихода звука, особенно в вертикальной плоскости. Головной мозг бессознательно анализирует эти искажения (так называемые "head-related transfer function" - HRTF), что является одним из ключевых механизмов локализации источника звука в пространстве.

Наружный слуховой проход — это изогнутый канал длиной около 2.5 см и диаметром около 0.7 см, который ведет от ушной раковины к барабанной перепонке. Его наружная треть имеет хрящевую основу, а внутренние две трети проходят в толще височной кости. Кожа, выстилающая хрящевую часть, содержит сальные и церуминозные железы, которые вырабатывают ушную серу (*cerumen*). Ушная сера, состоящая из секрета желез, слущенного эпителия и пылевых частиц, выполняет защитную функцию: она увлажняет кожу, обладает бактерицидными и фунгицидными свойствами и способствует самоочищению слухового прохода от инородных частиц. Кроме защитной, слуховой проход выполняет и акустическую функцию. Он действует как резонатор, усиливая звуковые частоты в диапазоне от 2 до 5 кГц (резонансная частота около 3 кГц), что дополнительно повышает чувствительность уха к звукам в этом важном для коммуникации диапазоне.

Среднее ухо: барабанная полость, слуховые косточки и евстахиева труба

Среднее ухо — это заполненная воздухом полость в височной кости, основной функцией которой является согласование импедансов — эффективная передача энергии звуковых колебаний из воздушной среды наружного уха в жидкую среду внутреннего уха. Этот раздел подробно опишет барабанную перепонку, цепь слуховых косточек (молоточек, наковальня, стремечко) и механизм усиления давления, а также роль евстахиевой трубы в выравнивании давления.

Внутреннее ухо: костный и перепончатый лабиринты

Внутреннее ухо, или лабиринт, — самая сложная и труднодоступная часть органа слуха. Здесь располагаются как слуховой, так и вестибулярный рецепторы. В этом разделе будет детально рассмотрена его структура.

Улитка: лестницы, геликотрема, кортиев орган. Будет описана спирально закрученная структура улитки, три ее канала (*scala vestibuli*, *scala media*, *scala tympani*), заполненные перилимфой и эндолимфой. Центральное место будет отведено описанию строения кортиева органа, расположенного на базилярной мембране, с его сенсорными (внутренними и наружными волосковыми) и поддерживающими клетками.

Вестибулярный аппарат: полукружные каналы, преддверие (мешочек и маточка). Будет описана анатомия трех взаимно перпендикулярных полукружных каналов, их ампул и рецепторных гребешков (*cristae*). Также будет рассмотрено строение отолитовых органов — маточки (*utricle*) и мешочка (*sacculus*) с их рецепторными пятнами (*maculae*).

Физиология слухового восприятия

Этот обширный раздел посвящен преобразованию физического стимула (звука) в биологический ответ (нервный импульс).

Проведение звука: от ушной раковины до овального окна

Здесь будет суммирована информация из раздела анатомии и добавлена физическая составляющая: описание звука как волны, характеристики (частота, амплитуда), а также детальный разбор механизма работы слуховых косточек как системы рычагов и гидравлического пресса (соотношение площадей барабанной перепонки и овального окна) для преодоления импедансного барьера.

Гидродинамика улитки

Теория бегущей волны Георга фон Бекеша. Будет изложена суть теории, удостоенной Нобелевской премии. Описывается, как колебания стремечка в овальном окне создают волну давления в жидкостях улитки, которая распространяется вдоль базилярной мембраны.

Тонотопическая организация базилярной мембраны. Будет объяснено, как физические свойства базилярной мембраны (ширина и жесткость, меняющиеся по ее длине) приводят к тому, что высокочастотные звуки вызывают максимальные колебания у основания улитки, а низкочастотные — у ее верхушки (апекса). Это и есть фундаментальный принцип частотного анализа звука.

Клеточные механизмы восприятия звука: Кортиев орган:

Структура и функция внутренних и наружных волосковых клеток.

Будет проведено четкое разделение функций: внутренние волосковые клетки

(ВБК) как истинные рецепторы, передающие информацию в мозг, и наружные волосковые клетки (НВК) как механические усилители.

Механоэлектрическая трансдукция: ионные каналы и стереоцилии.

Детальное описание пучка стереоцилий на апикальной поверхности волосковой клетки. Будет объяснен механизм "tip-links" (верхушечных связей) — тонких белковых нитей, которые при отклонении стереоцилий открывают механочувствительные ионные каналы, вызывая приток ионов калия из эндолимфы и деполяризацию клетки.

Эндокохлеарный потенциал и его роль. Будет объяснено уникальное явление — наличие высокого положительного потенциала (+80 мВ) в эндолимфе scala media, создаваемого сосудистой полоской. Этот потенциал обеспечивает огромную движущую силу для ионов K^+ , что делает процесс трансдукции чрезвычайно быстрым и чувствительным.

Активный механизм усиления в улитке (кохлеарный усилитель).

Будет рассказано о революционном открытии способности НВК к электромотильности. Под действием деполяризации эти клетки могут изменять свою длину благодаря белку престину. Эти быстрые сокращения и удлинения активно усиливают колебания базилярной мембраны, что приводит к повышению чувствительности слуха на 40-50 дБ и обострению частотной избирательности.

Кодирование звуковой информации

Здесь будет описано, как свойства звука преобразуются в паттерны нейронной активности.

Кодирование частоты: Принцип места (тонотопия) и временной принцип (синхронизация разрядов нейронов с фазой звуковой волны).

Кодирование интенсивности: Частота спайков в отдельных нейронах и количество активированных нейронов.

Кодирование временных характеристик: Анализ пауз, длительности и огибающей звука.

Центральные слуховые пути и обработка информации

Этот раздел проследит путь слухового сигнала до его осознания.

Последовательное описание каждого уровня слуховой системы: от слухового нерва, идущего от улитки, через структуры ствола мозга (кохлеарные ядра, оливы), где происходит первичная обработка и сравнение сигналов от двух ушей (ключ к локализации звука), через промежуточную станцию в таламусе, и до слуховой коры в височной доле. Будет показано, как на каждом последующем

уровне происходит усложнение обработки информации — от простых тонов до сложных звуковых образов, таких как речь и музыка.

Физиология системы равновесия

Функция отолитового аппарата: восприятие линейного ускорения и гравитации

Описание того, как под действием силы тяжести или линейного ускорения (например, в лифте или автомобиле) тяжелые отолиты (кристаллы карбоната кальция) смещаются, изгибая стереоцилии волосковых клеток макул и вызывая их возбуждение или торможение.

Функция полукружных каналов: восприятие углового ускорения

Описание того, как при поворотах головы эндолимфа в соответствующем полукружном канале из-за инерции отстает от стенок канала, отклоняя желатиновую купулу и стимулируя волосковые клетки ампулярного гребешка. Будет объяснено, как система из трех каналов в каждой голове позволяет кодировать вращение в любой плоскости.

Центральные вестибулярные пути

Краткое описание путей от вестибулярного нерва к вестибулярным ядрам ствола мозга и их дальнейших обширных связей с другими отделами ЦНС, подчеркивающее интегративный характер системы.

Вестибулярные рефлексы и интеграция сенсорной информации

Вестибуло-окулярный рефлекс (VOR)

Один из самых быстрых рефлексов в организме. Будет описано, как сигнал от полукружных каналов напрямую передается к ядрам глазодвигательных нервов, вызывая движение глаз в сторону, противоположную вращению головы. Это позволяет стабилизировать изображение на сетчатке во время движения.

Вестибуло-спинальные рефлексы (VSR)

Описание рефлексов, которые корректируют активность мышц конечностей и туловища для поддержания позы и предотвращения падения при неожиданных изменениях положения головы и тела.

Сенсорная интеграция

Подчеркивание того, что мозг никогда не полагается только на один источник информации о положении тела. Вестибулярные сигналы постоянно интегрируются со зрительной информацией (что мы видим) и проприоцептивной информацией (что сообщают рецепторы в мышцах и суставах). Головокружение часто возникает при рассогласовании этих сигналов.

Актуальные проблемы и направления исследований

Патофизиология нарушений слуха: Будет рассмотрена самая частая форма тугоухости — сенсоневральная, связанная с гибелью волосковых клеток из-за шума, ототоксичных лекарств или старения. Также будет затронута загадка тиннитуса, который сегодня рассматривается как следствие патологической нейрональной активности в центральных слуховых путях ("фантомный звук").

Патофизиология вестибулярных расстройств: Описание распространенных заболеваний, таких как ДППГ (вызвано смещением отолитов в полукружный канал) и болезнь Меньера (связана с нарушением баланса жидкости во внутреннем ухе).

Перспективы регенеративной медицины: В отличие от птиц и рептилий, млекопитающие не способны регенерировать погибшие волосковые клетки. В этом разделе будет рассказано об активных исследованиях, направленных на то, чтобы "запустить" эту регенерацию с помощью генной инженерии (например, активация гена *Atoh1*) или трансплантации стволовых клеток.

Совершенствование технологий протезирования: Краткий обзор современных успехов кохлеарной имплантации, которая позволяет вернуть слух людям с глубокой глухотой. Будет упомянуто о разработке вестибулярных имплантов для пациентов с двусторонней потерей вестибулярной функции.

Заключение:

В настоящей обзорной статье был представлен всесторонний анализ физиологии слуха и равновесия — двух фундаментальных сенсорных систем, определяющих нашу способность к коммуникации, ориентации в пространстве и полноценному взаимодействию с окружающим миром. Рассмотренные механизмы демонстрируют поразительную сложность и элегантность биологических решений, от макроскопической механики среднего уха до тончайших молекулярных процессов в сенсорных клетках внутреннего уха. Становится очевидным, что орган слуха и равновесия представляет собой не просто пассивный приемник стимулов, а активную, динамическую и высокоорганизованную систему.

Путь звука, от его улавливания ушной раковиной до формирования осознанного слухового образа в коре головного мозга, является многоступенчатым каскадом точных преобразований. Мы увидели, как система слуховых косточек решает фундаментальную физическую задачу согласования импедансов; как базилярная мембрана улитки выполняет первичный частотный анализ благодаря своим уникальным гидродинамическим и механическим свойствам (принцип тонотопии); и как наружные волосковые клетки,

функционируя в режиме кохлеарного усилителя, обеспечивают исключительную чувствительность и избирательность нашего слуха. Ключевым моментом этого процесса является механоэлектрическая трансдукция — почти мгновенное превращение механического изгиба стереоцилий в электрический сигнал, что лежит в основе кодирования всех характеристик звука: его высоты, громкости и временной структуры.

В равной степени впечатляет и система равновесия, которая, оставаясь по большей части неосознанной, непрерывно обеспечивает стабильность нашего тела и взора. Было показано, как отолитовые органы и полукружные каналы с ювелирной точностью детектируют линейные и угловые ускорения, позволяя мозгу постоянно отслеживать положение головы в пространстве. Критически важная роль вестибуло-окулярного и вестибуло-спинального рефлексов подчеркивает глубокую интеграцию вестибулярной системы с двигательным аппаратом. Более того, анализ сенсорной интеграции показал, что наше чувство равновесия — это не результат работы одного органа, а продукт сложного синтеза вестибулярной, зрительной и проприоцептивной информации в центральной нервной системе.

Несмотря на значительный прогресс в понимании этих систем, многие вопросы остаются открытыми. Патофизиология таких распространенных и социально значимых состояний, как сенсоневральная тугоухость, тиннитус и хроническое головокружение, все еще хранит в себе множество загадок, особенно на уровне центральных нейронных сетей. Именно эти нерешенные проблемы служат главным стимулом для современных научных исследований.

В конечном счете, дальнейшее изучение физиологии слуха и равновесия имеет не только фундаментальное значение для нейронауки, но и несет в себе огромный клинический потенциал. Перспективы регенеративной медицины, направленной на восстановление погибших волосковых клеток, успехи в области генной терапии и постоянное совершенствование нейропротезов, таких как кохлеарные и разрабатываемые вестибулярные импланты, открывают новую эру в аудиологии и отоневрологии. Успехи в этих областях обещают в будущем не просто компенсировать утраченные функции, а по-настоящему восстановить эти жизненно важные чувства, возвращая миллионам людей возможность слышать, общаться и уверенно двигаться по жизни.

Список литературы:

1. Kandel, E. R., Schwartz, J. H., Jessell, T. M., Siegelbaum, S. A., & Hudspeth, A. J. (Eds.). (2013). *Principles of Neural Science* (5th ed.). McGraw-Hill.
2. Hudspeth, A. J. (2014). Integrating the active process of hair cells with cochlear function. *Nature Reviews Neuroscience*, 15(9), 600–614.

3. Cullen, K. E. (2019). Vestibular system: a global positioning system for the brain. *Current Opinion in Neurobiology*, 56, 185-192.
4. Géléoc, G. S., & Holt, J. R. (2014). Sound strategies for hearing restoration. *Science*, 344(6184), 1241062.
5. King, A. J., & Schnupp, J. W. (2017). The auditory cortex. *Current Biology*, 27(19), R1059-R1064.
6. Fettiplace, R. (2017). Hair cell transduction, tuning, and synaptic transmission in the mammalian cochlea. *Comprehensive Physiology*, 7(4), 1197-1227.
7. Ishay, A. (2020). The vestibular system as a sixth sense. *Frontiers in Neurology*, 11, 562.
8. Пальчун В.Т., Крюков А.И., Кунельская Н.Л. (2018). *Оториноларингология: Руководство для врачей*. Медицинское информационное агентство.
9. Альтов, В.В. (2016). *Физиология сенсорных систем*. Издательство "Лань".