

АНАЛИТИЧЕСКОЕ СРАВНЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ ВОСПРИЯТИЯ УЛЬТРАЗВУКА УХОМ ЧЕЛОВЕКА И ЖИВОТНЫХ

Малакаева И.А., Спицын К.Д., Бурлакова А.В.

Волгоградский государственный медицинский университет, Волгоград, e-mail: imalakaeva@mail.ru

В данной научной работе представлены результаты аналитического исследования проблемы потенциальной возможности восприятия ультразвука слуховым аппаратом человека. Сравнение велось с животными, использующими ультразвуковые волны в своей жизни (собака, птица, дельфин, летучая мышь). Подробно изучено анатомическое строение их слухового аппарата. По имеющимся анатомическим данным впервые представлен наглядный рисунок строения уха летучей мыши (все рисунки выполнены одним из авторов – Бурлаковой А.В.). В результате рассмотрения строения уха и органа слуха различных видов животных и птиц составлен словарь терминов на латинском языке. Выявлены анатомические причины отсутствия возможности слышать ультразвук ухом человека. Изучены случаи патологических отклонений от нормы, которые сдвигают границу диапазон частот. Данный феномен получил название «люди хаммеры». Проанализирована возможность создания и применения устройств для восприятия человеком ультразвука, с целью оказания помощи больным с нарушениями звукопроводящего аппарата среднего уха или же рецепторного аппарата внутреннего уха, при условии, что в нем еще сохранились чувствительные клетки, на которые мог бы оказать стимулирующее действие ультразвук. Оценены преимущества и недостатки действия ультразвука в исследуемом приборе. Определены области дальнейших научных исследований для получения более эффективных результатов решения данной проблемы.

Ключевые слова: ультразвук, слуховой аппарат, система эхолокации, люди-хаммеры, слуховой аппарат летучей мыши

AN ANALYTICAL COMPARISON OF THE MECHANISMS OF ULTRASOUND PERCEPTION BY HUMANS AND ANIMALS

Malakaeva I.A., Spitsyn K.D., Burlakova A.V.

Volgograd State Medical University, Volgograd, e-mail: imalakaeva@mail.ru

The scientific work presents the results of an analytical study of the potential ability of the ultrasound perception by a human auditory apparatus. The comparison has been carried out with animals using ultrasound in their lives (dogs, birds, dolphins, bats). The anatomical structure of their auditory apparatus has been studied in detail. Due to the obtained anatomical data, the authors present drawings (performed by Burlakova A.V.) of the bat ear organization. A vocabulary of Latin terms was compiled based on the study of the sound perception organs of different animal and bird species. Anatomical peculiarities of a human ear preventing from ultrasound perception are revealed. Pathological conditions extending the values to the range are studied. This phenomenon is known as hum-hearing. The authors analyze the perspectives of the development and implementation of ultrasound perception devices. The devices can be helpful in providing aid for the patients suffering the disorders of the sound conducting apparatus in the middle ear and the receptor apparatus in the internal ear in case of the retained ability of the sensory cells to perceive stimulation by ultrasound. The advantages and disadvantages of the ultrasound produced by the device are evaluated. The perspectives of the further research aimed at searching an effective solution to the problem are assessed.

Keywords: ultrasound, hearing aid, echolocation system, hum-hearers, acoustic apparatus of a bat

Не все люди одинаково реагируют на различные звуковые частоты. Это зависит от индивидуальных факторов: возраста, пола, наследственности, наличия слуховой патологии и проч. Процент людей, у которых верхняя граница частотного диапазона слуха лежит выше 20 кГц, довольно велик. Значения диапазона слышимости человека лежат в пределах 16 Гц – 20 кГц. [1] В исследованиях верхняя частотная граница слуха может составлять 23 кГц, что превышает норму на 3 кГц и попадает в диапазон ультразвуковых частот. А может ли человек слышать ультразвук, и будет ли ему полезна такая способность? Для решения данного вопроса будет проведено сравнение слуховых аппаратов человека и животных, которые могут слышать ультразвук (собака); слышать и издавать ультразвук (птицы);

животные (наземные), использующие систему эхолокации (летучие мыши); животные (подводные) использующие систему гидролокации (китообразные). Так же будет рассмотрена возможность создания, использования и полезности приборов для восприятия ультразвука человеком.

Цель исследования: изучение потенциальной возможности восприятия ультразвука слуховым аппаратом человека и анализ полученных результатов.

Материалы и методы исследования

Рис. 1 Аналитическое сравнение анатомического строения слухового аппарата человека и собаки; Рис. 2. Среднее и внутреннее ухо птицы; Рис. 3. Орган слуха китообразных. Изучение и теоретический анализ научной литературы, метод аналитического сравнения.

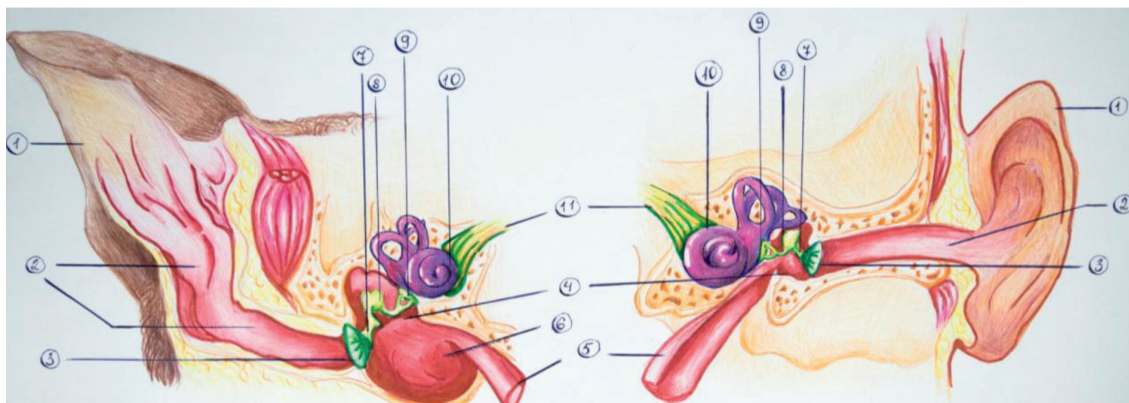


Рис. 1. Аналитическое сравнение анатомического строения слухового аппарата человека (справа) и собаки (слева): 1 – ушная раковина (*auricula*); 2 – наружный слуховой проход (*meatusacusticusexternus*); 3 – барабанная перепонка (*membranatumrani*); 4 – барабанная полость (*cavitas tympanica*); 5 – евстахиева труба (*tuba auditiva (Eustachii)*); 6 – барабанный пузырек (*bullatumpanica*); 7 – молоточек (*malleus*); 8 – наковальня (*incus*); 9 – стремя (*stapes*); 10 – улитка (*cochlea*); 11 – слуховой нерв (*nervusacusticus*)

Вначале необходимо разобрать анатомию слухового аппарата человека, который состоит из наружной, средней, внутренней частей Рис. 1 (справа) (термины на всех рисунках переведены на латинский язык).

Наружная часть уха: состоит из *ушной раковины* и *наружного слухового прохода*. Ушная раковина представлена хрящом, покрытый кожей. Основные элементы ушной раковины – *козелок* и *противокозелок*, *завиток*, его *ножка* и *противозавиток*. Ее функция – прием звуковых колебаний и их передача в среднее, внутреннее ухо, затем в мозг. Звук воспринимается другими отделами уха в неизменном виде, чему способствуют особые завитки ушной раковины. Далее волны попадают в наружный слуховой проход. Его выстилает кожа, имеющая много сальных и серных желез, которые помогают защищать человеческое ухо от повреждений. Слуховой проход оканчивается образованием под названием барабанная перепонка, которая, при ударе о нее звуковых волн, совершает колебания. Так сигнал поступает в среднее ухо [2].

Среднее ухо: состоит из крохотной *барабанной полости*. Внутри располагаются три косточки: *молоточек*, *стремечко* и *наковальня*. Рукоятка молоточка сообщается с барабанной перепонкой, его головка соединяется с наковальней, а та связана со стремечком. Стремечко закрывает овальное окно во внутреннее ухо. С помощью этих трех косточек передаются звуковые сигналы к улитке во внутреннем ухе нем, при этом усиливая звук, чтобы он звучал четче и насыщенней. С помощью евстахиевой трубы

среднее ухо соединяется с носоглоткой. Главной функцией данной трубы является поддержание баланса между атмосферным давлением и тем, которое возникает в барабанной полости. Это позволяет точнее передавать звуки [2].

Внутренняя часть уха: Строение внутреннего уха человека самое сложное во всем слуховом аппарате. Находится он в каменистой части височной кости. Костный лабиринт состоит из *преддверия*, *улитки* и *полукружных каналов*. Маленькая полость неправильной формы является преддверием. Его латеральная стенка имеет два окна. Одно – овальной формы, открывается в преддверие, а второе, круглой формы, в спиральный канал улитки. Внутренняя часть улитки заполнена жидкостью. На стенках улитки находятся волосковые клетки, имеющие вид цилиндров или колбочек. Внутреннее ухо включает в себя полукружные каналы. Они представляют собой три трубки, изогнутые в форме дуги, и начинаются и заканчиваются в маточке. Находятся они в трех плоскостях, их ширина – 2 мм. Каналы имеют названия: *сагиттальный*; *фронтальный*; *горизонтальный*. Преддверие и каналы являются частью вестибулярного аппарата. В жидкость, находящуюся в полукружных каналах, погружены волосковые клетки. При перемещении головы или тела жидкость движется, надавливая на волоски, благодаря чему в окончаниях вестибулярного нерва образуются импульсы, идущие в мозг. Энергия звука начинает преобразовываться в импульсы. Для волокон характерны резонансные частота

и длина. Короткие волны имеют 20000 Гц, а самые длинные – 16 Гц. Поэтому каждая волосковая клетка настроена на определенную частоту. Есть особенность в том, что на низкие частоты настроены клетки верхней части улитки, а на высокие – клетки нижней части улитки. Звуковые колебания распространяются мгновенно. Этому способствуют особенности строения человеческого уха. В результате возникает гидростатическое давление, способствующее сдвигению покровной пластинки кортиева органа, из-за чего нити стереоцилии начинают деформироваться. Они возбуждаются и передают информацию, с помощью первичных сенсорных нейронов. Ионный состав эндолимфы и перилимфы (особых жидкостей кортиева органа) образует разницу потенциалов в 0,15 В. Благодаря этому люди могут слышать даже небольшие звуковые колебания [2].

Слуховой анализатор в ходе эволюции приобрел массу как вариаций внешнего, так и внутреннего строения, в зависимости от степени потребности в восприятии ультразвука. Поэтому важно рассмотреть несколько живых организмов с различной организацией органа слуха и выделить их отличительные особенности.

Основные характеристики слуховой способности у собак

В сравнении с человеком, звуковосприятие уха собаки быстрее в четыре раза, а чувствительность к ультразвуку достигает отметки 80 000 Гц. Причина всему – структура уха животного. При этом от размера и морфологии ушного хряща, будет зависеть острота слуха животного. У собак различают наружное, среднее и внутреннее ухо Рис. 1(слева).

Внутреннее ухо: включает *костный и перепончатые лабиринты*. Костный лабиринт находится в области висков и по строению является совокупностью полостей. Перепончатый лабиринт состоит из мембран и находится внутри костного лабиринта [3].

Среднее ухо: состоит из *барабанной полости*, прикрытой *барабанной перепонкой*, где расположены молоточек, наковальня, стремечко. Как и у человека, они функционируют в слуховом аппарате как рычаги, для передачи звуков от барабанной перепонки.

Наружное ухо: *ушная раковина*. Она так же состоит из покрытого кожей хряща. В отличие от человека, у собак хорошо развиты мышцы ушей. Температура и влажность внутри наружного слухового прохода постоянны. Собаки способны различать 9 000 звуков, разных по высоте, и ощущать

силу звука от 0,1 до 120 децибел и слышать средней силы звуки на расстоянии до 40 – 50 м (человек же на расстоянии 6 – 10 м) [3].

По сути собачий слуховой аппарат похож по своему строению на человеческий, но имеет важные отличия, позволяющие воспринимать ультразвук: длина слухового канала больше, чем у человека; большая (чем у человека) барабанная полость, для максимальной защиты барабанной перепонки и обеспечения особенной остроты слуха у собак; на качество восприятия звуков влияет форма и размер ушей конкретной породы; для людей ушные мышцы – это рудимент, тогда как собаки активно их используют.

Слух птиц

В отличие от млекопитающих, у птиц не имеют наружных ушных раковин. Правда, у луней и сов существуют особые покрытые уникальной структуры перьями складки кожи, заменяющие им наружную ушную раковину – лицевой диск, при этом все перья диска обладают подвижностью, для регулирования режима приема звуковых сигналов. Ушные отверстия птиц расположены по бокам головы. У некоторых видов сов имеется ассиметричное расположение слуховых проходов, что улучшает лоцирование высокочастотных звуков. В среднем ухе птиц, есть одна слуховая косточка. От барабанной перепонки она передает колебания звука так же через овальное окно, в жидкость, что заполняет улитку. По сравнению с человеческими слуховыми косточками-рычагами, такая «поршневая» передача колебаний у птиц кажется не столь эффективной, но это не правда. Их слух достаточно высок, благодаря мелким преобразованиям: иное отношение площадей основания стремечка и барабанной перепонки (у птиц 30 – 40, у человека 14 – 18), что позволяет различать звуки по высоте; более широкий слуховой проход, который имеет сложный рельеф (Рис. 2). Далее колебание жидкости внутреннего уха воспринимаются и преобразуются в электрические сигналы чувствительными волосковыми клетками. Затем эти сигналы направляются в мозг по слуховому нерву. Как и у пресмыкающихся, улитка птиц, является короткой не закрученной трубкой. Но улитка птиц устроена сложнее, чем у рептилий. Клетки-рецепторы имеют различное строение, что обеспечивает настройку на определенный диапазон частот, а у конца улитки располагается образование, которого нет у млекопитающих – лагена (может воспринимать магнитное поле) [3].

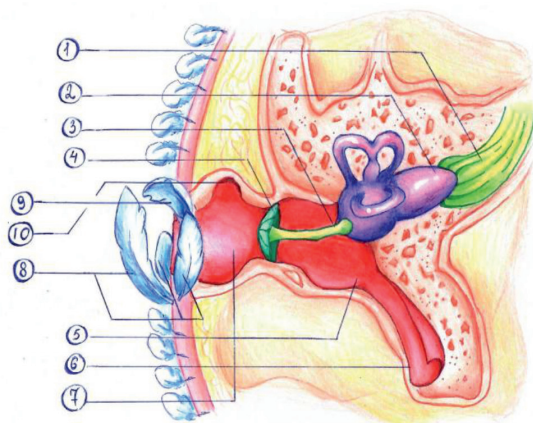


Рис. 2. Среднее и внутреннее ухо птицы:
 1 – слуховой нерв (*nervus acusticus*); 2 – улитка (*cochlea*); 3 – стремя (*stapes*); 4 – барабанная перепонка (*membrana tympani*); 5 – барабанная полость (*cavitas tympanica*); 6 – евстахиева труба (*tuba auditiva (Eustachii)*); 7 – наружный слуховой проход (*meatus acusticus externus*); 8 – переднеушная птерилия (*pteryla auricularis anterior*); 9 – заднеушная птерилия (*pteryla auricularis posterior*); 10 – кожная складка оперкулум (*plica cutanea operculorum*)

В Ольденбургском университете выяснили, что с возрастом некоторые птицы (сипухи, скворцы) не теряют способность успешно распознавать звуки диапазона 0,5–12 кГц, так как их волосковые клетки способны восстанавливаться. У людей же в старости волосковые клетки не обладают этой способностью и отмирают, из-за чего у пожилых людей наблюдается снижение слуха [4].

Животные, использующие ультразвук, как систему гидролокации. Морские млекопитающие (дельфины, касатки, киты) способны не только воспринимать, но и издавать высокочастотные звуки. В основном это короткие свисты, длящиеся по полсекунды с частотой 7–15 кГц, которые и составляют основу их языка. Остальную его часть составляют щелчки, которые не слышимы для человеческого уха, частотой от 20 до 250 кГц. Они необходимы для координации действий группы, обнаружения препятствий с помощью эхолокации, поиска пищи, а иногда с целью оглушения (убийства) своих жертв. У дельфинов с созданием ультразвуков участвует жировой лобный бугор – он служит для фокусирования пучка издаваемых животным ультразвуковых волн (Рис. 3). Направленный вперед ультразвук отражается от находящихся на его пути препятствий и возвращается к органу слуха дельфина, помогая обнаружить препятствия или добычу. Восприятие этих звуков происходит за счет

нижней челюсти, задняя часть которой связана с внутренним ухом, после чего полученная информация об отраженном ультразвуке передается в мозг, для дальнейшего анализа [5].

Летучие мыши, как и морские млекопитающие, могут издавать ультразвуки, но по другому принципу. Частота этих звуков 50 000–60 000 Гц. Они возникают за счет прохождения воздуха из легких через гортань, напоминающую строением свисток, и через нос. Итоговые звуки имеют значительную громкость: если бы человек мог их уловить, то вероятно бы, услышал звук, сравнимый с ревом двигателя самолета. Не глохнут летучие мыши при испускании ультразвука потому, что имеют мышцы, в этот момент прикрывающие их уши: при максимальной частоте следования зондирующих импульсов – 250 в секунду, заслонка в ухе летучей мыши открывается и закрывается 500 раз в секунду. По данным исследования инженерного отдела Политехнического университета Виргинии (Virginia Tech) за одну десятую секунды летучая мышь способна «значительно изменить свою форму уха так, чтобы оно воспринимало различные звуковые частоты». Так же было установлено, что, чтобы изменить форму своего уха и настроиться на восприятие эха, у подкожнослетучей мыши уходит в три раза меньше времени, чем человеку тратит на одно моргание. Летучие мыши могут не только невероятно быстро двигать ушами, но также и «обрабатывать перекрывающие друг друга эхо, поступающие с разницей всего лишь в 2 миллионных секунды. Они также могут различать предметы, находящиеся всего в 0,3 миллиметра друг от друга» (0,3 миллиметра – ширина человеческого волоса) [6]. В результате изучения и обобщения данных анатомического строения ушей и носоглотки летучих мышей в работе предложен наглядный рисунок внутреннего строения уха летучей мыши (рис. 4).

Доказано, что при непрерывном и длительном раздражении органа слуха неизменными во времени звуковыми колебаниями, человек ощущает дискомфорт и имеет риск развития психических заболеваний. Данный факт подтверждают так называемые люди-хаммеры, которые из-за развившихся патологий, приобретают способность воспринимать колебания низкой частоты, выходящие за рамки диапазона слышимости. Такие люди постоянно слышат пульсирующий шум, что, по их словам, часто похоже на пытку. Исходя из этого, можно предположить аналогичные эффекты в случае, если человек будет постоянно воспринимать высокочастотные звуки в их первоизданном виде.

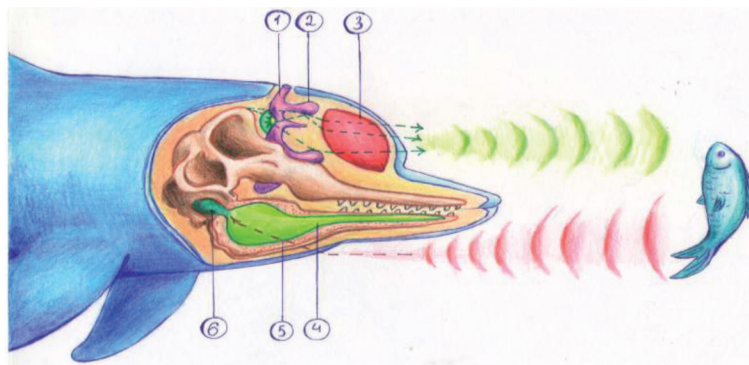


Рис. 3. Орган слуха китообразных: 1 – жировой канал и нижняя челюсть – (*canalis adiposus et mandibula*); 2 – акустическое окно (*fenestra acustica*); 3 – дыхало (*spina mentum*); 4 – эхо (*echo*); 5 – издаваемые звуки (*soni*); 6 – мелон (*pulvinar frontalis adiposum*)

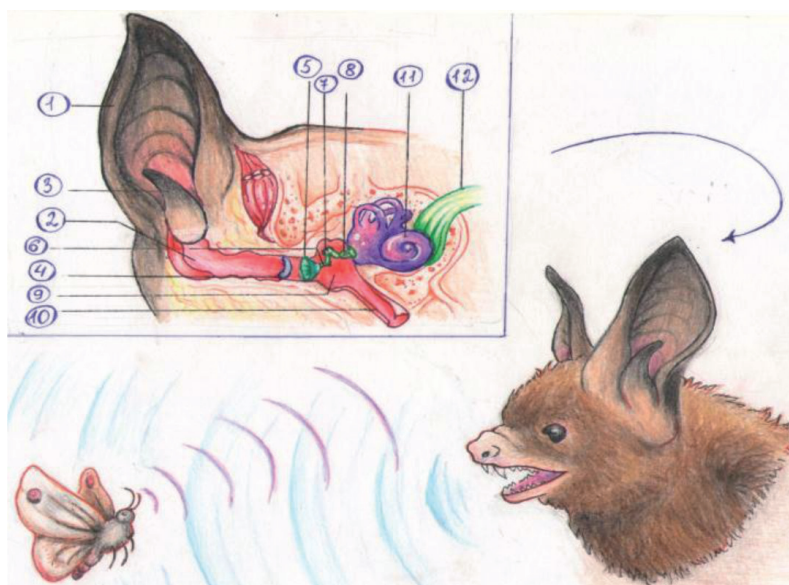


Рис. 4. Строение уха летучей мыши: 1 – ушная раковина (*auricula*); 2 – наружный слуховой проход (*meatus acusticus externus*); 3 – козелок (*tragus*); 4 – полулунный бугорок (*tuberculum lunatum*); 5 – барабанная перепонка (*membrana tympani*); 6 – молоточек (*malleus*); 7 – наковальня (*incus*); 8 – стремечко (*stapes*); 9 – барабанная полость (*cavitas tympanica*); 10 – евстахиева труба (*tuba auditiva (Eustachii)*); 11 – улитка (*cochlea*); 12 – слуховой нерв (*Nervus acusticus*)

Но возможно ли создать устройство, которое, основываясь на принципах действия анатомических структур в ушах животных, могло бы усовершенствовать способности слухового анализатора человека, при этом обойдя описанную выше проблему восприятия ультразвука? Ученые активно ведут исследования о воздействии ультразвуковых колебаний на конкретные участки слухового аппарата. Специалисты в области физики в своих исследованиях на лягушках, кошках использовали фокусированный ультразвук, по типу, который способны издавать дельфины и летучие мыши, на все структуры

уха. Наиболее интересный результат показал ушной лабиринт. Для безопасности исследований применялся фокусированный ультразвук, т.к. он имеет малый радиус действия звукового пучка, что позволяет уменьшить нежелательное действие на зоны вблизи [7]. Изучив результаты предварительных экспериментов с животными, и убедившись в безопасности всех процедур, была одобрена возможность проведения подобных исследований на человеке. Была собрана установка, включающая в себя генератор, связанный с ним фокусированный излучатель, помещенный в звукопрозрачный ме-

шок, заполненный дистиллированной водой. Испытуемый во время опытов располагался в горизонтальном положении, а сверху на его ухо устанавливался данный мешочек с излучателем. Ультразвук фокусировали на место проецирования ушного лабиринта, включали установку. Генератор работал в трех режимах: амплитудно-импульсной модуляции, импульсном, амплитудно-модулированных колебаний. Возникновение слуховых ощущений не наблюдалось при воздействии на лабиринт непрерывным фокусированным ультразвуком. Однако при моделировании ультразвука по амплитуде колебаниями сложной формы (сигнал с микрофона), обследуемые точно определяли передаваемую слуховую информацию (речь, музыку) и могли оценить акустическое качество как весьма высокое. Так по окончании эксперимента, в итоге был предложен ультразвуковой способ введения слуховой информации, позволивший бы доставлять ее в обход привычному слуховому ходу [8].

Оценивая итог эксперимента, можно сказать, что в предложенном методе остается множество нерешенных вопросов: громоздкость установки, не до конца изученные побочные эффекты длительного воздействия на орган слуха, основным из которых является нагревание близлежащих тканей, находящаяся в непосредственной близости от головного мозга. Физические процессы, обусловленные воздействием ультразвука на биологические объекты, вызывают эффекты: микровибраций на клеточном и субклеточном уровне; разрушение биомолекул, клеток и микроорганизмов; перестройку и повреждение биологических мембран, изменение проницаемости мембран; тепловое действие. Преимуществом устройства является возможность передавать информацию о звуке напрямую рецепторам слуха, минуя наружное ухо. Однако сама возможность решения проблем утраты слуха, несомненно, делает перспективными дальнейшие исследования в данной области.

Результаты исследования и их обсуждение

Проведенный анализ анатомического строения уха человека и животного (собаки) выявил схожесть, но ультразвук животные слышат из-за различий: кармашек над внешним слуховым проходом, размер и расположение наружного слухового прохода, размер барабанной перепонки, наличие барабанного пузыря, рудиментарность височно-теменной мышцы, большой размер улитки. У птиц, из-за отсутствия наружной ушной раковины, слуховой проход шире, имеет большой объем и сложный

рельеф, барабанная перепонка обширнее, наличие лагены. Отношение площадей барабанной перепонки и основания стремечка позволяет усиливать звуковое давление, способствует различению звуков по высоте, присутствует асимметрия расположения слуховых проходов для улучшения лоцирования высокочастотных звуков. У птиц при старении стереоцилии внутреннего уха могут восстанавливаться, в отличие от людей.

Рассмотрено общее сходство у животных использующих ультразвук в системе и гидроэхолокации в отличие от человека и птиц. Орган слуха имеет более сложное строение. Состоит из: источника – жировой лобный бугор (китообразные) или гортань – нос (летучие мыши), приемника ультразвука – нижняя челюсть, задняя часть которой связана с внутренним ухом. Результаты эксперимента по стимуляции органа слуха с помощью фокусированного ультразвука доказали возможность создания прибора, позволяющего передавать данным способом слуховую информацию. Однако метод имеет множество недостатков и нуждается в доработке.

Выводы

Слуховой аппарат человека, в отличие от многих животных, не способен воспринимать звуковые колебания высокой частоты, и его совершенствование возможно искусственным способом. Учитывая все преимущества и недостатки приобретения человеком способности слышать ультразвук, преобладают больше недостатки. Проблема изучения возможности создания и применения устройств, позволяющих человеку слышать в ультразвуковом диапазоне частот, связана исключительно с необходимостью искусственного совершенствования слуха.

Список литературы

1. Рогов И.Е., Аржановский А.Ю., Варсан Е.В., Зубова Т.А., Ткаченко А.С. Исследование биофизических характеристик слуха студентов ДГТУ // Молодой исследователь Дона. – 2018. – № 2(11). – С. 69–76.
2. Анатомия человека. Учебник в 3-х томах. Том 3. Нервная система. Органы чувств / И.В. Гайворонский // ГЭОТАР-Медиа. – 2015. – С. 216.
3. Анатомия животных: учебное пособие. В 2-х т. Т2 / Ю.Ф. Юдичев, В. В. Дегтярев, А. Г. Гончаров; под редакцией проф. В.В. Дегтярева // Оренбург: Издательский центр ОГАУ. – 2013. – С. 406.
4. Нестеренко О. Что слышат птицы // Химия и жизнь. – 2019. – № 5. – С. 69–76.
5. Валов Г.Г. О новом подходе к изучению крика дельфина // Молодой учёный. – 2017. – №9. – С. 138–142.
6. Danilo Russo, Leonardo Ancillotto, Luca Cistrone, Carmi Korine. The Buzz of Drinking on the Wing in Echolocating Bats // Ethology. 2016. V. 122. P. 226–235.
7. Гаврилов Л.Р., Цирульников Е.М. Фокусированный ультразвук как средство введения человеку сенсорной информации // Акустический журнал. – 2012. – том 58 – № 1. – С. 3–27.
8. Шевченко Е.В., Хлопенко Н.А. Действие ультразвука на организм // Сибирский медицинский журнал. – 2006. – № 2. – С. 96–99.