

УДК 611.851-853

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ МОРФОМЕТРИИ ВНУТРЕННЕГО УХА ЧЕЛОВЕКА

© Леонид Кириллович Кац, Татьяна Васильевна Митрофанова

Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И.П. Павлова.
197022, Санкт-Петербург, ул. Льва Толстого, д. 6–8

Контактная информация: Леонид Кириллович Кац — студент 2 курса лечебного факультета.
E-mail: leonidkats2003@mail.ru

Поступила: 24.06.2022

Одобрена: 21.07.2022

Принята к печати: 05.09.2022

РЕЗЮМЕ. Морфологическая изменчивость — естественное явление, затрагивающее все анатомические системы. Морфологическая изменчивость внутреннего уха связана с вариабельностью размеров и форм улитки и полукружных каналов. В настоящем обзоре представлены результаты научных исследований в области кохлеарно-вестибулярной морфометрии для определения наиболее подходящих параметров, характеризующих анатомические вариации внутреннего уха человека. Оценка морфологии улитки является жизненно важной процедурой перед выполнением любого хирургического вмешательства для установки кохлеарного имплантата подходящему кандидату. Клиническая трехмерная визуализация является неотъемлемым элементом анатомической оценки морфометрии улитки. Как правило, в число параметров улитки, отличающихся вариабельностью, входят длина улиткового протока, длина наружной стенки улитки, диаметр базального, среднего и апикального витков улитки, ширина барабанной лестницы. Точное знание размера и пространственного соотношения полукружных каналов жизненно важно и может представлять необходимые справочные данные для хирургов-оториноларингологов и отоневрологов. Пространственная ориентация полукружных каналов (ПКК) отличается от ортогональности. Синергически действующие функциональные пары каналов обеих ушей не лежат в одной плоскости. Форма ПКК является примерно круглой, поэтому простых измерений радиуса кривизны должно быть достаточно, чтобы охарактеризовать размер канала. Площадь кругов ПКК также может быть подходящим параметром для количественной оценки размера канала. Рассмотрены основные переменные, характеризующие вариабельность размеров улитки и полукружных каналов. Приведены основные методики по количественной оценке морфометрических параметров внутреннего уха. Многим клиницистам трудно совместить серию 2D-изображений в точную 3D-модель. Четкое понимание 3D-анатомии внутреннего уха будет преимуществом для любого хирурга, выполняющего сложную операцию.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: внутреннее ухо; морфометрия; трехмерная визуализация; улитка; полукружные каналы; кохлеарная имплантация; кохлеарно-вестибулярные мальформации.

SOME ASPECTS OF MORPHOMETRY OF THE HUMAN INNER EAR

© Leonid K. Kats, Tat'yana V. Mitrofanova

Pavlov First Saint-Petersburg State Medical University. 197022, Saint-Petersburg, L'va Tolstogo st., 6–8

Contact information: Leonid K. Kats — 2nd year student of the Faculty of Medicine. E-mail: leonidkats2003@mail.ru

Received: 24.06.2022

Revised: 21.07.2022

Accepted: 05.09.2022

ABSTRACT. Morphological variability is a natural phenomenon affecting all anatomical systems. Morphological variability of the inner ear is associated with variability in the size and shape of the cochlea and semicircular canals. This review presents the results of scientific research in the field

of cochlear-vestibular morphometry to determine the most appropriate parameters characterizing the anatomical variations of the human inner ear. Evaluation of cochlear morphology is a vital procedure before performing any surgical intervention to place a cochlear implant in a suitable candidate. Clinical 3D-imaging is an essential element in the anatomical assessment of cochlear morphometry. As a rule, among the parameters of the cochlea, which are characterized variability, include the length of the cochlear duct, the length of the outer wall of the cochlea, the diameter of the basal, middle and apical turns of the cochlea, the width of the scala tympani. Accurate knowledge of the size and spatial relationship of the semicircular canals (SCCs) is vital and can provide essential reference data for otorhinolaryngologist surgeons and otoneurologists. The spatial orientation of the semicircular canals differs from orthogonality. Synergistically acting functional canal pairs of both ears do not lie in exactly the same plane. The shape of the SCCs is approximately circular, so simple measurements of the radius of curvature should be sufficient to characterize the size of the channel. The area of the SCCs circles may also be a suitable parameter to quantify the channel size. The main variables that characterize the variability in the size of the cochlea and semicircular canals are considered. The main methods for quantitative assessment of the morphometric parameters of the inner ear are given. It is a challenging task for many clinicians to combine a series of 2D-images slices into an accurate 3D-model. A clear understanding of the 3D-anatomy of the inner ear will be an advantage to any surgeon performing complex procedure.

KEY WORDS: inner ear; morphometry; three-dimensional visualization; cochlea; semicircular canals; cochlear implantation; cochlear-vestibular malformations.

ВВЕДЕНИЕ

В костном лабиринте височной кости человека находятся органы чувств, отвечающие за слух и равновесие. Преобразование звука в нервный импульс происходит в улитке внутреннего уха. Улитка человека представляет собой структуру спиралевидной формы, которая глубоко залегает в височной кости и содержит слуховой чувствительный эпителий — кортиева орган [26]. Орган равновесия состоит из отолитового аппарата и системы полукружных каналов, ряда перепончатых протоков, заключенных в костные полукружные каналы (ПКК). Три таких канала (передний — ППКК, задний — ЗПКК и латеральный — ЛПКК) ориентированы примерно ортогонально друг к другу. В то время как система отолитов имеет дело с линейным ускорением и гравитацией, система ПКК обнаруживает угловые изменения положения головы [27].

Морфологическая изменчивость — естественное явление, затрагивающее все анатомические системы. Морфологическая изменчивость внутреннего уха чаще всего связана с вариабельностью размеров и форм улитки и полукружных каналов.

Для количественной оценки форм и размеров лабиринта внутреннего уха используются методы геометрической морфометрии. Последняя включает в себя набор методов, позволяющих количественно определить форму

и размеры анатомических структур на основе 3D координатных данных [12].

Несмотря на данные, полученные в результате недавних технических достижений в области магнитно-резонансной томографии (МРТ) и компьютерной томографии (КТ), трехмерная нейроанатомия височной кости и связанных с ней структур остается недостаточно изученной из-за сложного строения каменистой части височной кости [20].

В отечественной литературе морфометрические и статистические исследования анатомических вариаций внутреннего уха практически отсутствуют. Сведения о количественной оценке структур внутреннего уха крайне скудны и в некоторых работах рассматриваются фрагментарно. Вместе с тем в последние десятилетия в связи с появлением компьютерных технологий 3D-визуализации анатомических структур тема вариантной анатомии и морфометрии внутреннего уха стала активно обсуждаться в передовых зарубежных научных исследованиях.

Стоит отметить, что морфометрические исследования слуховой системы не ограничиваются измерением структур внутреннего уха. С использованием трехмерной реконструкции можно изучать параметры проводникового и центрального отдела слухового анализатора. В частности, визуализация VIII пары черепных нервов (ЧН) позволяет оценить морфологию и морфометрию нервного волокна: диаметр аксона, толщину миелина и другие

параметры [17]. Кроме того, реконструкция коры, объемная сегментация и трактография слухового пути позволяет измерить такие параметры, как объем серого вещества, площадь поверхности извилины и толщину коры [19]. Исходя из вышесказанного, можно констатировать, что комплексное исследование слуховой системы с применением трехмерной компьютерной реконструкции позволяет в совокупности оценить работу слухового анализатора и выявить соответствующие нарушения при различных заболеваниях, в том числе при сенсоневральной тугоухости.

В этой связи особую актуальность приобретает изучение морфометрических параметров лабиринта внутреннего уха человека. Цель данной статьи — обзор научных исследований в области кохлеарно-вестибулярной морфометрии для определения наиболее подходящих параметров, характеризующих анатомические вариации внутреннего уха человека.

КОХЛЕАРНАЯ МОРФОМЕТРИЯ

Оценка морфологии улитки является жизненно важной процедурой перед выполнением любого хирургического вмешательства для установки кохлеарного имплантата подходящему кандидату. Большинство таких кандидатов — дети с врожденной сенсоневральной тугоухостью. Визуализация улитки не только помогает определить потенциальных кандидатов на имплантацию, но и дает визуальную оценку вероятных трудностей, с которыми хирург может столкнуться на операционном столе [16].

КТ высокого разрешения дает лучшее представление о костном каркасе внутреннего уха. Однако КТ не подходит для оценки перепончатой улитки, улиткового нерва и возможных препятствий для имплантации. Эти структуры лучше оцениваются на снимках МРТ. Вместе с тем изображения улитки, полученные с помощью МРТ высокого разрешения, тяжело обрабатываются ввиду сложной спиралевидной формы лабиринта. Чтобы преодолеть это, предлагается использовать алгоритм криволинейной реконструкции — метод, применяемый для получения виртуально выпрямленных изображений криволинейных структур из данных, полученных с помощью КТ или МРТ. J.U. Kumar и соавт. использовали данную методику для виртуального разматывания перепончатой улитки из объемных данных, полученных с помощью МРТ высо-

кого разрешения. После выполнения данной процедуры измерения длины улитки возможны с большей точностью [17].

Как правило, в число параметров улитки, отличающихся вариабельностью, входят длина улиткового протока (перепончатой улитки), длина наружной стенки улитки, диаметр базального, среднего и апикального витков улитки, ширина барабанной лестницы [28].

Длина перепончатой улитки — очень важная мера, необходимая для точного определения длины и положения электрода, используемого при кохлеарной имплантации. Так, слишком короткие имплантированные электроды приведут к потере высоко- или низкочастотного спектра. Использование слишком длинных электродов может привести к травме улитки. Длина улитки по методу Вюрфеля определяется как спиральный путь от центральной дистальной точки костного круглого окна вдоль латеральной стенки до геликотермы, которая является конечной точкой измерения. Кроме того, данный параметр можно рассчитать по уравнению Алексиадеса, которое имеет следующий вид: $4,16 \cdot (\text{расстояние } A) - 4$ [13]. V.A. Seibel и соавт. рассчитывали длину улиткового канала по конической спиральной мере с учетом длины модиолуса и внутреннего диаметра базального витка улитки.

Клиническая трехмерная визуализация является неотъемлемым элементом анатомической оценки морфометрии улитки (рис. 1). Для лучшего понимания анатомии улитки 3D-изображения можно разрезать в любой плоскости и вращать в пространстве [20]. Аксиальная плоскость лучше подходит для сегментации и последующего моделирования структур [9]. Так, с помощью трехмерной компьютерной визуализации H.G. Guzman и соавт. измерили длину и высоту улитки, расстояние A (диаметр базального витка), расстояние B (ширина базального витка) и улитковый объем. По результатам исследования общее среднее значение длины улитки у взрослых пациентов составило $34,02 \pm 2,15$ мм. По данным J.U. Kumar и соавт., средняя длина улитки у детей в возрасте от 3 до 9 лет составляет 27,52 мм. Все переменные кохлеарной морфометрии достоверно выше у мужчин. Достоверные различия были обнаружены в зависимости от стороны уха [13]. Значения параметров кохлеарной морфометрии, наиболее часто встречающиеся в научных публикациях, приведены в таблице 1.

Многоплоскостная реконструкция облегчает идентификацию анатомических точек,

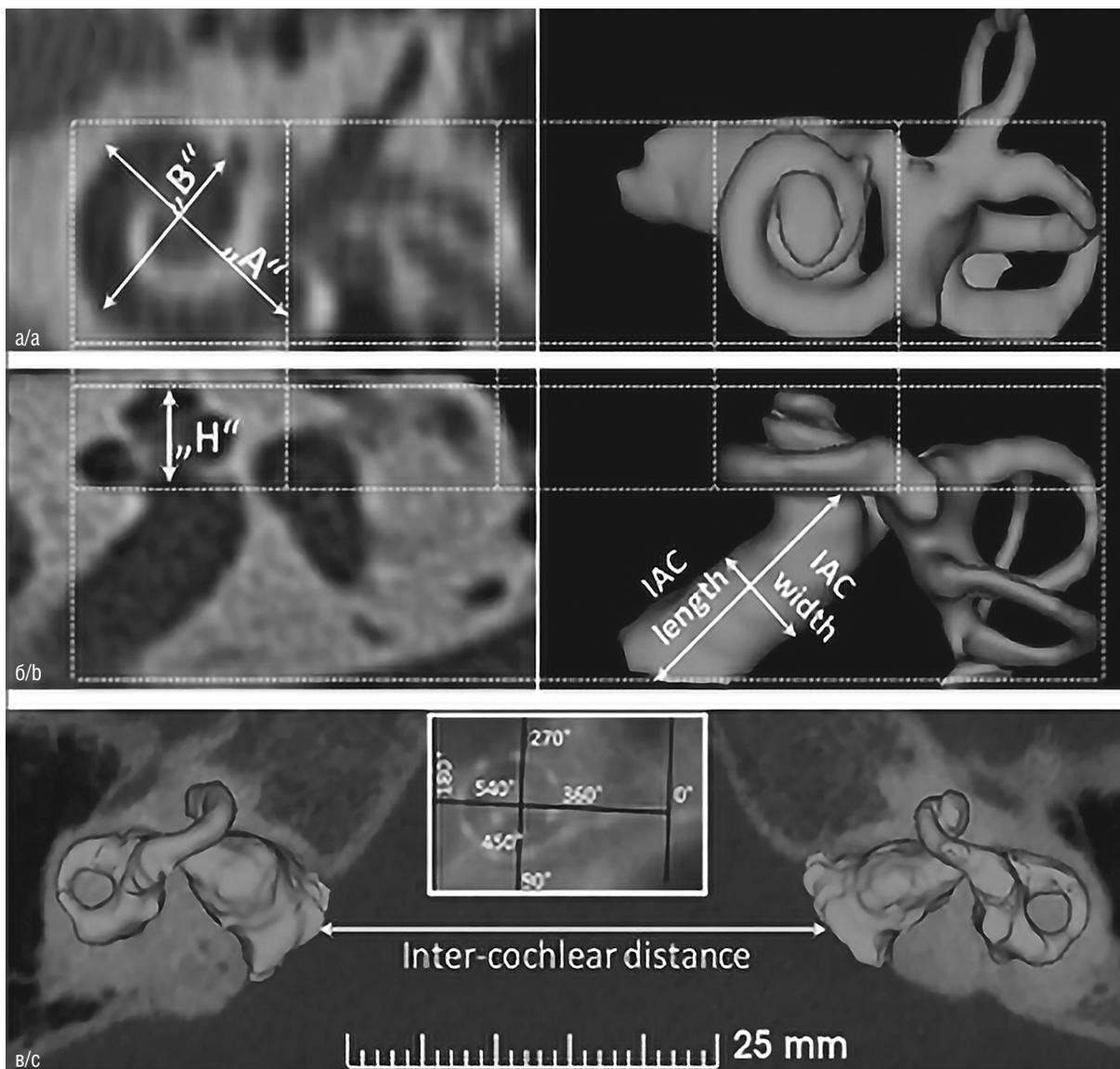


Рис. 1. Параметры кохлеарной морфометрии. На основе микроКТ-изображений построена 3D-модель внутреннего уха. Показаны вычисляемые параметры: А — расстояния А и В (диаметр и ширина базального витка улитки соответственно); В — высота улитки, длина и ширина внутреннего слухового прохода; С — межулитковое расстояние, глубина введения электрода [2]

Fig. 1. Parameters of cochlear morphometry. A 3D-model of the inner ear was built based on microCT-images. The calculated parameters are shown: A — distances A and B (diameter and width of the basal cochlea, respectively); B — height of the cochlea, length and width of the internal auditory canal; C — inter-cochlear distance, depth of insertion of the electrode [2]

которые используются в качестве точек отсчета для каждой из измеряемых переменных: ширина, длина и высота преддверия, длина модиолуса, диаметры витков улитки, диаметр и длина внутреннего слухового прохода. Каждый из этих параметров рассчитывается с использованием евклидова расстояния между точками отсчета по их 3D-координатам [21].

Кохлеарные параметры, а именно диаметр и ширина базального витка, показывают поло-

жительную линейную корреляцию независимо от типов анатомических вариаций с очень хорошим значением регрессии более 0,5 для правого уха и 0,45 для левого уха. Однако высота улитки не имеет какой-либо математической связи с диаметром первого витка [2].

Е. Erickson и соавт. провели исследование, результаты которого показали, что улитка человека имеет индивидуальную форму и сильно различается по размерам. Так, длина

Таблица 1

Параметры кохлеарной морфометрии в различных научных публикациях

Table 1

Parameters of cochlear morphometry in various scientific publications

Автор, страна, год	Способ визуализации	Длина улитки, мм	Высота улитки, мм	Диаметр базального витка, мм	Диаметр среднего витка, мм	Диаметр апикального витка, мм
Alenzi S. et al., Саудовская Аравия, 2021 [2]	КТ	–	3,71	8,8	–	–
Erickson E. et al., Швеция, 2009 [11]	Слепки внутреннего уха	42,0±1,96	3,90±0,37	9,3±0,4	–	–
Guzman H.G. et al., Мексика, 2021 [13]	КТ	34,0±2,15	3,46±0,26	9,04±0,45	–	–
Kumar J.U. et al., Индия, 2017 [16]	МРТ	27,52	–	–	–	–
Seibel V.A. et al., Бразилия, 2006 [21]	КТ	26,8±2,8	5,9±0,6	9,1±0,7	6,9±0,6	6,2±0,5
Попов П.А. и др., Россия, 2011 [1]	КТ	–	–	9,27±0,04	–	–

наружной стенки улитки колебалась от 38,6 до 45,6 мм при средней длине 42,0 мм. Первый виток составлял 53% от общей длины и колебался от 20,3 до 24,3 мм [11]. Было установлено, что диаметр первого витка не имеет математической связи с возрастом пациента и может варьировать от 6 до 9,6 мм с учетом анатомического строения улитки [2]. Внутренний диаметр улитковой трубки варьировал в широких пределах (1,6–2,6 мм), иногда с ограниченным пространством для обычных имплантатов. Интересно заметить, что в ряде случаев канал лицевого нерва проходил в непосредственной близости от первого витка улитки. Это объясняет возбуждение VII пары ЧН при стимуляции электродами этой области [11].

Итак, улитка человека имеет обширные анатомические вариации. Эти вариации могут иметь широкое влияние на результаты хирургического вмешательства. Однако неясно, как эти морфологические вариации связаны с вариациями физиологии. Например, длина улиткового канала положительно коррелирует с массой тела, хотя неясно, чувствительны ли люди с высоким индексом массы тела к более широкой или узкой полосе частот [10]. Это никогда раньше не изучалось, и любое исследование в этом направлении могло бы пролить свет на важность размера улиткового канала в прогнозировании слуха в соответствии с индексом массы тела.

При нарушении естественной кинетики развития внутреннего уха ввиду неравномер-

ного процесса окостенения (минерализации) костного лабиринта могут быть сформированы различные кохлеарно-вестибулярные аномалии (мальформации) [20]. С помощью трехмерного моделирования внутреннего уха могут быть обнаружены различные типы кохлеарных мальформаций, а также вариации их размеров и форм [9]. В частности, морфометрия внутреннего уха пациентов с кохлеарной гипоплазией показывает большие различия в общем размере и форме внутреннего уха, а также в количестве ПКК в вестибулярной системе. Нередко разные типы мальформаций могут быть обнаружены на обоих ушах [9].

Знание размеров улитки человека и того, как они варьируют в зависимости от различных типов пороков развития, может быть ценной информацией для предоперационного анализа при проведении кохлеарной имплантации.

Индивидуальные вариации микроморфологии улитки могут вносить дополнительный вклад в отказ предварительно сформированных электродных решеток, но направление электродной решетки вокруг первого изгиба улиткового поворота, очевидно, затруднено из-за постоянного сужения в каждой отдельной области улитки [4]. Исследование вариационной микроморфологии улитки в отношении частых травм от введения кохлеарного электрода провели ученые Рейнско-Вестфальского технического университета Ахена (Германия). Ими было установлено, что диаметр

барабанной лестницы уменьшается примерно на 300 мкм в восходящей части базального оборота улитки. Регресс поперечного диаметра сопровождается смещением спиральной костной пластинки в сторону барабанной лестницы и сужением костной капсулы улитки [4]. Именно поэтому лица с узкой барабанной лестницей или малым размером улитки подвержены потенциальному риску травм во время имплантации электродов. Кроме того, изменение диаметра улиткового протока может привести к ограничениям при использовании обычных кохлеарных имплантатов [28].

В процессе изучения морфометрии внутреннего уха особое место занимает исследование вариаций внутреннего слухового прохода (ВСП), который показывает большие различия в своих размерах. Длина и ширина ВСП в аксиальной плоскости не имеют между собой значимой математической корреляции. Напротив, длина ВСП ($R^2=0,28$) и межлитковое расстояние ($R^2=0,23$), измеренное одного конца ВСП до другого в аксиальной

плоскости, показывает положительный логарифмический рост с возрастом пациента. В будущем можно было бы изучить влияние объема ВСП на слуховые характеристики пациентов, в том числе с кохлеарной имплантацией [2].

МОРФОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУКРУЖНЫХ КАНАЛОВ

В последнее время большое внимание уделяется вариационным изменениям в вестибулярной системе. Связь между полукружными каналами и вращательными ощущениями известна уже почти полтора столетия, а связь между анатомией каналов, ориентацией и чувствительностью, поведением и филогенезом является активной областью исследований вариантной анатомии внутреннего уха [10].

Полукружные каналы — одни из самых трудоемких анатомических структур для исследования из-за их сложной трехмерной формы, встроенной в плотную слуховую капсулу каменистой части височной кости.

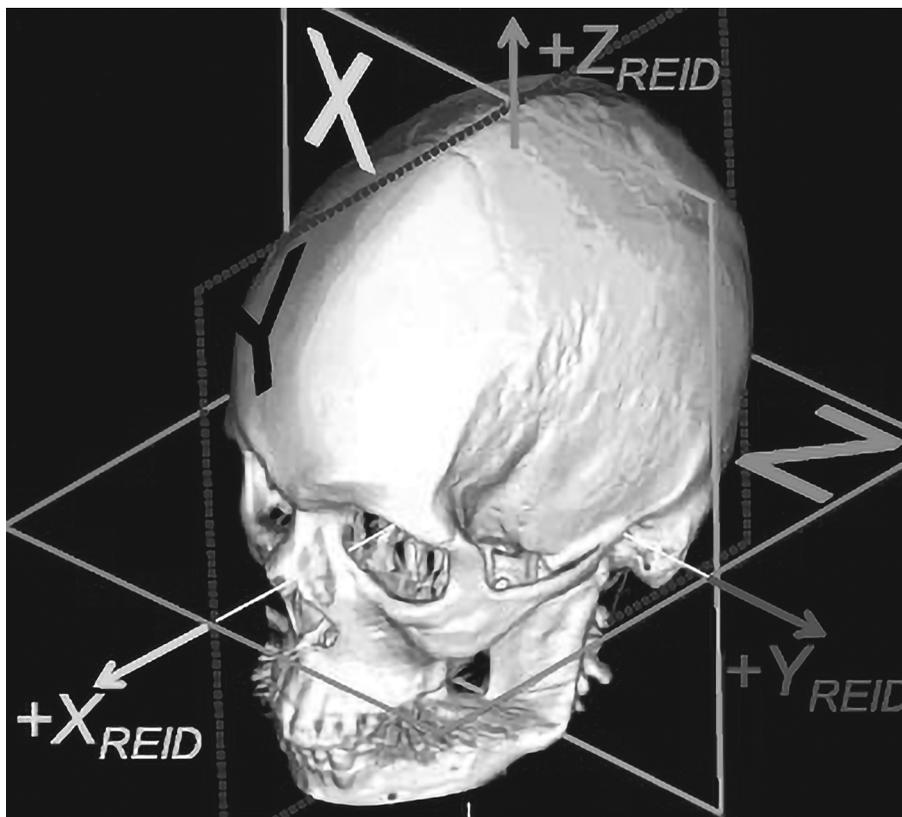


Рис. 2. Система координат и плоскостей Рейда (горизонтальная — Z, сагиттальная — Y, коронарная — X). В качестве осей отложены единичные векторы нормалей к плоскостям (Z_{REID} , Y_{REID} , X_{REID}) [8]

Fig. 2. The system of coordinates and planes of the Raid (horizontal — Z, sagittal — Y, coronary — X). Unit vectors of normals to the planes (Z_{REID} , Y_{REID} , X_{REID}) are deposited as axes [8]

Чтобы понять работу ПКК, необходимо знать их ориентацию в лабиринте, а затем — расположение лабиринта в координатах головы [9]. Уравнения для оценки плоскостных взаимоотношений ПКК человека были разработаны R.H. Blanks и соавт. на основе рассеченного костного лабиринта в человеческом черепе [5].

C.C. Della Santina и соавт. объединили данные об ориентации ПКК, переведя их в общую систему координат, определяемую плоскостями Рейда (рис. 2). Горизонтальная плоскость Рейда (Z_{REID}) определялась как плоскость, проходящая через центр каждого костного наружного слухового прохода и нижний край двух глазниц [6, 14]. Сагитальная плоскость Рейда (Y_{REID}) была определена как плоскость, которая делится пополам и перпендикулярна интерауральной оси — линии, проходящей через костные центры наружных слуховых проходов, т.е. в плоскости Z_{REID} . Коронарная плоскость Рейда (X_{REID}) определялась как плоскость, содержащая интерауральную ось и перпендикулярная Z_{REID} [8].

В настоящее время с помощью компьютерного трехмерного анализа проводятся различные исследования морфометрии реконструированных 3D-моделей ПКК на основе микроКТ- и КТ-изображений, МРТ-сканов или гистологических срезов височных костей [14]. Геометрию перепончатых ПКК можно вывести из реконструированных костных ПКК, учитывая, что в поперечном сечении проток занимает около 5% площади поперечного сечения костного канала. Поскольку прямого доступа к площади поперечного сечения перепончатого ПКК нет, используется приблизительная величина [9]. Точные морфометрические измерения перепончатых ПКК были проведены лишь на эмбрионах человека до начала окостенения лабиринта [24, 25].

В Университете Конкук (Южная Корея) было проведено исследование по изучению варибельности размеров ПКК и углов между ними. В данном исследовании были измерены следующие морфометрические параметры: ширина, высота, внутренняя ширина и внутренняя высота для каждого ПКК, площади и периметры искаженных кругов ПКК, углы между ППКК, ЗПКК и ЛПКК, а также длина и ширина общей ножки [18].

Форма ПКК является примерно круглой, поэтому простых измерений радиуса кривизны должно быть достаточно, чтобы охарактеризовать размер канала. Используя значения высоты (H) и ширины (W) ПКК, можно

рассчитать радиус кривизны (R) по формуле: $0,5 \cdot (H + W) / 2$. Многочисленными исследованиями подтверждается, что ЛПКК обычно короче других каналов. В частности, В. Cheung и соавт. показали, что радиус кривизны ЛПКК был на 20% меньше, чем у ППКК и ЗПКК. Для оценки варибельности форм ПКК F. Spoor и соавт. предложили использовать индекс пропорциональности высоты к ширине костного ПКК ($H/W \cdot 100$), который был равен $87 \pm 4,6$, $107 \pm 7,6$, $89 \pm 7,0$ для ППКК, ЗПКК и ЛПКК соответственно [22].

Нейрофизиологические данные подтверждают связь между размером контура ПКК, который обычно выражается как радиус кривизны, и чувствительностью канала. Общая закономерность заключается в том, что большие ПКК более чувствительны к вращению в пространстве, чем каналы с меньшим радиусом кривизны [10]. Сравнительная степень анализа размеров ПКК у приматов и других млекопитающих также установила взаимосвязь между локомоторной ловкостью и размером канала [27]. Животные с большими ПКК характеризуются высокой локомоторной ловкостью и быстрыми движениями. Поскольку размер каждого ПКК различается у людей, то можно предположить, что время отклика и чувствительность различаются и между ПКК.

Вращательные движения в пространстве вокруг трех осей (X, Y и Z) именуется как крен, рысканье и тангаж соответственно. При вращении головы и стимуляции волосковых клеток ПКК информация о воспринимаемом вращении передается в мозг через преддверно-улитковый нерв [3]. Принято считать, что ППКК, как правило, имеет наибольший радиус кривизны, что свидетельствует о том, что люди, как и большинство млекопитающих, наиболее чувствительны к тангажу головы [10]. Наибольший радиус кривизны ППКК связан с более выраженным линейным увеличением размера канала в процессе эмбрионального развития по сравнению с другими ПКК [25]. Кроме того, ППКК обладает наибольшей степенью неплоскостности, т.е. визуально проявляется в виде скручиваний и изгибов в зависимости от направления взгляда [6].

Площадь кругов ПКК также может быть подходящим параметром для количественной оценки размера канала. По данным J.Y. Lee и соавт., этот размер у ППКК был примерно в 1,2 и 3,2 раза больше, чем у ЗПКК и ЛПКК соответственно. Площадь ЗПКК

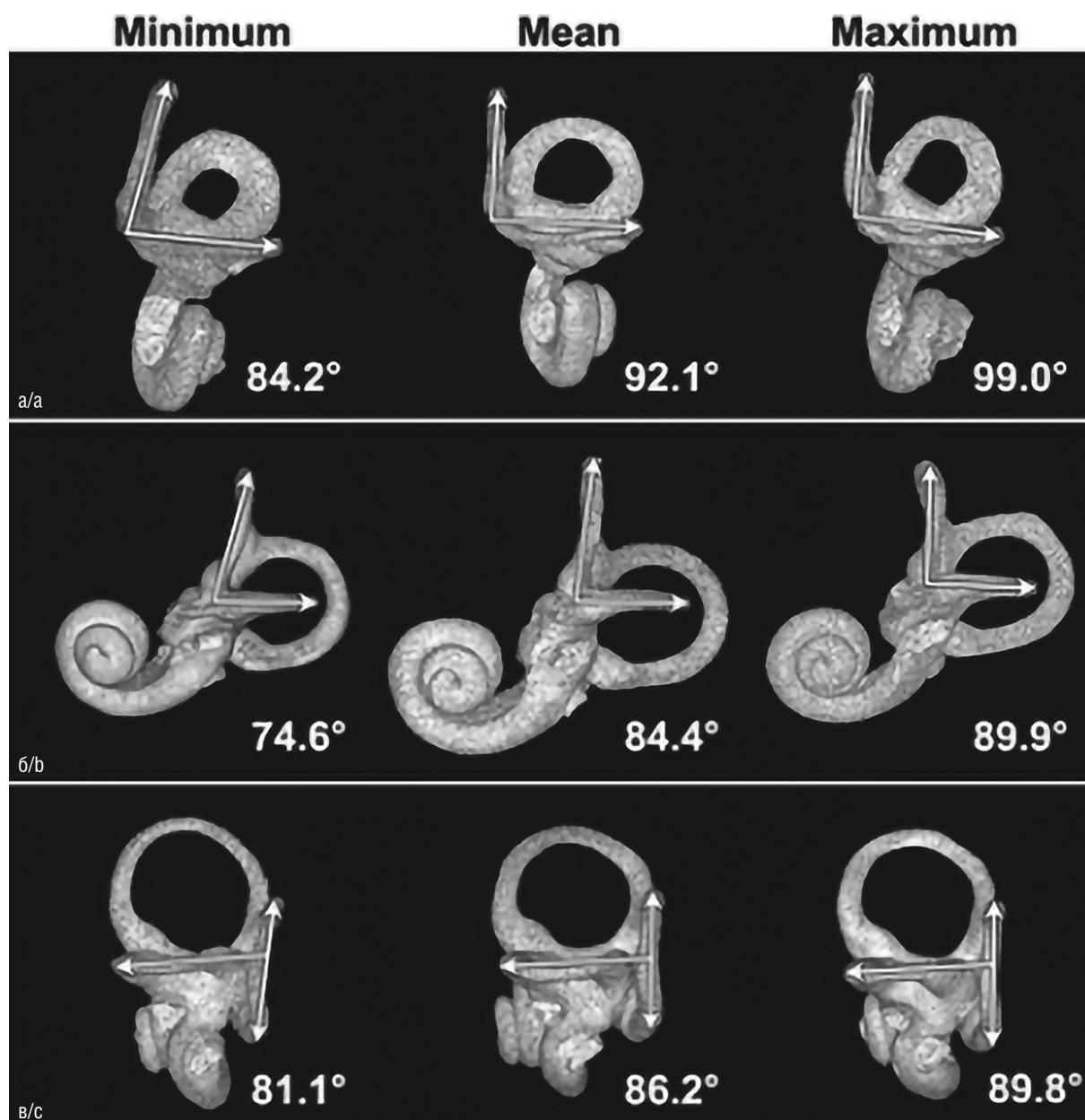


Рис. 3. Варианты угловых соотношений между полукружными каналами: А — углы между ППК и ЗПКК; В — углы между ППК и ЛПКК; С — углы между ЗПКК и ЛПКК [18]

Fig. 3. Variants of angular ratios between semicircular channels: A — the angles between PC and PCC; B — Angles between PPK and LPC; C — Angles between PC and PDA [18]

была примерно в 2,6 раза больше площади ЛПКК [18].

В простейшей модели вестибулярной системы плоскости ПКК параллельны трем ортогональным плоскостям головы. Однако этого почти никогда не происходит, и каждый ПКК вместе с другими каналами может участвовать в образовании как острых, так и тупых углов (рис. 3) [14, 15]. Угол между плоскостями любых двух ПКК (угол между двумя ПКК) равен углу направления между

векторами нормалей, перпендикулярных двум плоскостям, и вычисляется как арккосинус скалярного произведения этих векторов [8]. Размеры костного лабиринта человека показывают, что углы между плоскостями ПКК могут изменяться в пределах $\sim 30^\circ$ [23]. Вариативность углов между ПКК, показанная в различных научных публикациях, приведена в таблице 2.

Стоит отметить, что пространственные отношения ампул ПКК также отличаются от

Таблица 2

Данные об угловой ориентации полукружных каналов человека в различных научных публикациях

Table 2

Data on the angular orientation of human semicircular canals in various scientific publications

Автор, страна, год	Способ визуализации	Количество образцов	Углы между ПКК, °		
			Л–П	П–З	Л–З
Bradshaw A.P. et al., Австралия, 2010 [6]	МикроКТ и КТ высокого разрешения	34	85,6±4,4	91,6±3,4	89,6±5,2
Cheung B. et al., США, 2018 [7]	МикроКТ	40	84,4	92,1	86,2
Della Santina C.C. et al., США, 2005 [8]	КТ	22	90,6±6,2	94,0±4,0	90,4±4,9
Hashimoto S. et al., Япония, 2005 [14]	Гистологический срез	7	90,51±2,98	91,70±1,85	94,52±3,32
Kim D.K. et al., КНДР, 2015 [15]	МРТ	20	83,7	88,4	82,5
Lee J.Y. et al., КНДР, 2013 [18]	МикроКТ	23	84,4±4,2	92,1±3,5	86,2±2,4

ортогональности. По данным А. Takagi и соавт., углы между парами ампул ПКК отклоняются от прямых углов на 4,8–18,0°, а длинная ось каждой ампулы отклоняется от линии, перпендикулярной плоскости соответствующему ПКК, на 25,0–30,4°. Поскольку большинство пар односторонних ПКК не образуют прямых углов, то более чем один ПКК будет вызывать реакцию во время вращения головы. Различное двигательное поведение заставит голову вращаться по-разному, поэтому форма и ориентация каналов должны коррелировать с поведением [10].

Для более полного понимания ориентации ПКК проводят исследования по изучению компланарности, т.е. оценку расположения в одной плоскости функциональных пар каналов. Для концептуальной и вычислительной простоты шесть ПКК обычно группируются в три приблизительно компланарные пары: левый и правый ЛПКК; правый ППКК и левый ЗПКК; левый ППКК и правый ЗПКК [8]. D.K. Kim и соавт. обнаружили, что пары контралатеральных плоскостей синергических каналов образовывались на расстоянии 15,1° между правой и левой горизонтальными плоскостями ПКК, 21,2° между правым передним и левым задним ПКК и 21,7° между левым передним и правым задним ПКК. Таким образом, синергически действующие функциональные пары каналов обеих ушей не лежат в одной плоскости. Несмотря на то что два ПКК каждой пары не совсем компланарны, разница в ориентации незначительна, потому что вращение головы стимулирует

каналы в степени, определяемой косинусом угла между осью вращения головы и осью ПКК [8].

При использовании морфометрических данных для разработки и анализа вращательных тестов функционирования ПКК следует отметить, что анатомические плоскости ПКК приближенно равны, но не полностью соответствуют плоскости максимальной и минимальной направленной чувствительности для каждого ПКК [8]. Это связано с двумя положениями. Во-первых, сила трения, оказываемая на эндолимфу со стенок перепончатого протока, меняется вдоль костного канала в зависимости от поперечного сечения протока. Во-вторых, ПКК связаны между собой и обладают общими полостями, такими как общая ножка и преддверие. В такой системе градиент давления в одном канале будет влиять на движение жидкости в соседних каналах, поэтому любое вращение вызовет изменение гидродинамических характеристик эндолимфы сразу в трех каналах [6].

Точное знание размера и пространственного соотношения ПКК жизненно важно и может представлять необходимые справочные данные для хирургов-оториноларингологов и отоневрологов. Например, репозиционное лечение доброкачественного пароксизмального позиционного головокружения (ДППГ) включает вращение в плоскости пораженного канала, чтобы воздействовать инерционными силами на кристаллы отолита в ПКК для возвращения их из полости ПКК в преддверие [6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Процесс исследования анатомии внутреннего уха является одной из важнейших областей изучения слухового анализатора. Этот процесс далек от завершения. Современные исследования раскрывают новые перспективы и ставят перед учеными все новые и часто весьма трудные задачи. Решение этих задач поможет продвижению вперед в области оториноларингологии, сурдологии и клинической анатомии.

Многим клиницистам трудно совместить серию 2D-изображений в точную 3D-модель, поэтому четкое понимание 3D-анатомии внутреннего уха будет преимуществом для любого хирурга, выполняющего сложную операцию.

Авторы статьи надеются, что данный материал заинтересует как начинающих, так и опытных специалистов, работающих в сфере кохлеарной хирургии, и будет полезен в качестве фундаментальных основ для проведения морфометрических и статистических исследований по изучению вариантной анатомии внутреннего уха у представителей российской популяции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов П.А., Стратиева О.В., Королюк И.П., Козупица Г.С. Диагностика болезни Меньера с помощью компьютерной томографии: количественная оценка изменений внутреннего уха. *Российская оториноларингология*. 2011; 5: 117–25.
2. Alenzi S., Dhanasingh A., Alanazi H. Diagnostic Value of 3D Segmentation in Understanding the Anatomy of Human Inner Ear Including Malformation Types. *Ear, Nose & Throat Journal*. 2021; 100(5): 675–83. DOI: 10.1177/0145561320906621.
3. Asadi H., Mohamed S., Lim C.P. et al. Semicircular canal modeling in human perception. *Rev Neurosci*. 2017; 28(5): 537–49. DOI: 10.1515/revneuro-2016-0058.
4. Bedron S., Prescher A., Ilgner J., Westhofen M. Internal dimensions of the cochlear scalae with special reference to cochlear electrode insertion trauma. *Otology and Neurotology*. 2010; 31(5): 731–7. DOI: 10.1097/MAO.0b013e3181d27b5e.
5. Blanks R.H., Curthoys I.S., Markham C.H. Planar relationships of the semicircular canals in man. *Acta Otolaryngol*. 1975; 80: 185–96. DOI: 10.3109/00016487509121318.
6. Bradshaw A.P., Curthoys I.S., Todd M.J. et al. A mathematical model of human semicircular canal geometry: a new basis for interpreting vestibular physiology. *J Assoc Res Otolaryngol*. 2010; 11(2): 145–59. DOI: 10.1007/s10162-009-0195-6.
7. Cheung B., Ercoline W. Semicircular Canal Size and Shape Influence on Disorientation. *Aerosp Med Hum Perform*. 2018; 89(8): 744–8. DOI: 10.3357/AMHP.5104.2018.
8. Della Santina C.C., Potyagaylo V., Migliaccio A.A. et al. Orientation of human semicircular canals measured by three-dimensional multiplanar CT reconstruction. *J Assoc Res Otolaryngol*. 2005; 6(3): 191–206. DOI: 10.1007/s10162-005-0003-x.
9. Dhanasingh A. Variations in the Size and Shape of Human Cochlear Malformation Types. *Anat Rec (Hoboken)*. 2019; 302(10): 1792–9. DOI: 10.1002/ar.24136.
10. Ekdale E.G. Form and function of the mammalian inner ear. *J Anat*. 2016; 228(2): 324–37. DOI: 10.1111/joa.12308.
11. Erickson E., Hoegstorp H., Vadin K., Rask-Andersen H. Variational Anatomy of the Human Cochlea. *Otology and Neurotology*. 2009; 30(1): 14–22. DOI: 10.1097/MAO.0b013e31818a08e8.
12. Gunz P., Ramsier M., Kuhrig M. et al. The mammalian bony labyrinth reconsidered, introducing a comprehensive geometric morphometric approach. *J Anat*. 2012; 220(6): 529–43. DOI: 10.1111/j.1469-7580.2012.01493.x.
13. Guzman-Perez H.G., Guzman-Lopez S., Villarreal-Del Bosque I.S. et al. Cochlear morphometry in healthy ears of a mexican population: A comparison of measurement techniques. *Morphologie*. 2021. DOI: 10.1016/j.morpho.2021.07.001.
14. Hashimoto S., Naganuma H., Tokumasu K. et al. Three-dimensional reconstruction of the human semicircular canals and measurement of each membranous canal plane defined by Reid's stereotactic coordinates. *Ann Otol Rhinol Laryngol*. 2005; 114(12): 934–8. DOI: 10.1177/000348940511401207.
15. Kim D.K., Kim D.R., Jeong S.H. et al. Analysis of the coplanarity of functional pairs of semicircular canals using three-dimensional images reconstructed from temporal bone magnetic resonance imaging. *J Laryngol Otol*. 2015; 129(5): 430–4. DOI: 10.1017/S0022215115000201.
16. Kumar J.U., Kavitha Y. Application of Curved MPR Algorithm to High Resolution 3 Dimensional T2 Weighted CISS Images for Virtual Uncoiling of Membranous Cochlea as an Aid for Cochlear Morphometry. *J Clin Diagn Res*. 2017; 11(2): TC12–TC14. DOI: 10.7860/JCDR/2017/23206.9456.
17. Kumar P., Sharma S., Kaur C. et al. The ultrastructural study of human cochlear nerve at different ages. *Hearing Research*. 2022; 416. DOI: 10.1016/j.heares.2022.108443.
18. Lee J.Y., Shin K.J., Kim J.N. et al. A Morphometric Study of the Semicircular Canals Using Micro-CT Images in Three-Dimensional Reconstruction. *The*

- Anatomical Record. 2013; 296(8): 834–9. DOI: 10.1002/ar.22664.
19. Profant O., Škoch A., Balogová Z. et al. Diffusion tensor imaging and MR morphometry of the central auditory pathway and auditory cortex in aging. *Neuroscience*. 2014; 260: 87–97. DOI: 10.1016/j.neuroscience.2013.12.010.
 20. Richard C., Laroche N., Malaval L. et al. New insight into the bony labyrinth: A microcomputed tomography study. *Auris Nasus Larynx*. 2010; 37(2): 155–61. DOI: 10.1016/j.anl.2009.04.014.
 21. Seibel V.A., Lavinsky L., Irion K. CT-Scan sheep and human inner ear morphometric comparison. *Brazilian Journal of Otorhinolaryngology*. 2006; 72(3): 370–6. DOI: 10.1016/S1808-8694(15)30971-X.
 22. Spoor F., Zonneveld F. Comparative review of the human bony labyrinth. *Am J Phys Anthropol*. 1998; 27: 211–51. DOI: 10.1002/(sici)1096-8644(1998)107:27+<211::aid-ajpa8>3.3.co;2-m.
 23. Spoor F., Zonneveld F. Morphometry of the primate bony labyrinth: a new method based on high-resolution computed tomography. *J Anat*. 1995; 186(Pt 2): 271–86.
 24. Takagi A., Sando I., Takahashi H. Computer-aided three-dimensional reconstruction and measurement of semicircular canals and their cristae in man. *Acta Otolaryngol*. 1989; 107(5–6): 362–5. DOI: 10.3109/00016488909127522.
 25. Toyoda S., Shiraki N., Yamada S. et al. Morphogenesis of the inner ear at different stages of normal human development. *Anat Rec (Hoboken)*. 2015; 298(12): 2081–90. DOI: 10.1002/ar.23268.
 26. Vogl C., Neef J., Wichmann C. Methods for multiscale structural and functional analysis of the mammalian cochlea. *Molecular and Cellular Neuroscience*. 2022; 120. DOI: 10.1016/j.mcn.2022.103720.
 27. Welker K.L., Orkin J.D., Ryan T.M. Analysis of individual and intraspecific variation in semicircular canal dimensions using high-resolution x-ray computed tomography. *J Anat*. 2009; 215(4): 444–51. DOI: 10.1111/j.1469-7580.2009.01124.x.
 28. White H.J., Helwany M., Peterson D.C. *Anatomy, Head and Neck, Ear Organ of Corti*. FL: StatPearls Publishing; Treasure Island; 2022.
-
- REFERENCES**
-
1. Popov P.A., Stratiyeva O.V., Korolyuk I.P., Kozupit-sa G.S. Diagnostika bolezni Men'yera s pomoshch'yu komp'yuternoy tomografii: kolichestvennaya otsenka izmeneniy vnutrennego ukha [Diagnosis of Ménière's disease using computed tomography: quantitative assessment of changes in the inner ear]. *Rossiyskaya otorinolaringologiya*. 2011; 5: 117–25. (in Russian).
 2. Alenzi S., Dhanasingh A., Alanazi H. Diagnostic Value of 3D Segmentation in Understanding the Anatomy of Human Inner Ear Including Malformation Types. *Ear, Nose & Throat Journal*. 2021; 100(5): 675–83. DOI: 10.1177/0145561320906621.
 3. Asadi H., Mohamed S., Lim C.P. et al. Semicircular canal modeling in human perception. *Rev Neurosci*. 2017; 28(5): 537–49. DOI: 10.1515/revneuro-2016-0058.
 4. Bedron S., Prescher A., Ilgner J., Westhofen M. Internal dimensions of the cochlear scalae with special reference to cochlear electrode insertion trauma. *Otology and Neurotology*. 2010; 31(5): 731–7. DOI: 10.1097/MAO.0b013e3181d27b5e.
 5. Blanks R.H., Curthoys I.S., Markham C.H. Planar relationships of the semicircular canals in man. *Acta Otolaryngol*. 1975; 80: 185–96. DOI: 10.3109/00016487509121318.
 6. Bradshaw A.P., Curthoys I.S., Todd M.J. et al. A mathematical model of human semicircular canal geometry: a new basis for interpreting vestibular physiology. *J Assoc Res Otolaryngol*. 2010; 11(2): 145–59. DOI: 10.1007/s10162-009-0195-6.
 7. Cheung B., Ercoline W. Semicircular Canal Size and Shape Influence on Disorientation. *Aerosp Med Hum Perform*. 2018; 89(8): 744–8. DOI: 10.3357/AMHP.5104.2018.
 8. Della Santina C.C., Potyagaylo V., Migliaccio A.A. et al. Orientation of human semicircular canals measured by three-dimensional multiplanar CT reconstruction. *J Assoc Res Otolaryngol*. 2005; 6(3): 191–206. DOI: 10.1007/s10162-005-0003-x.
 9. Dhanasingh A. Variations in the Size and Shape of Human Cochlear Malformation Types. *Anat Rec (Hoboken)*. 2019; 302(10): 1792–9. DOI: 10.1002/ar.24136.
 10. Ekdale E.G. Form and function of the mammalian inner ear. *J Anat*. 2016; 228(2): 324–37. DOI: 10.1111/joa.12308.
 11. Erickson E., Hoegstorp H., Vadin K., Rask-Andersen H. Variational Anatomy of the Human Cochlea. *Otology and Neurotology*. 2009; 30(1): 14–22. DOI: 10.1097/MAO.0b013e3181818a08e8.
 12. Gunz P., Ramsier M., Kuhrig M. et al. The mammalian bony labyrinth reconsidered, introducing a comprehensive geometric morphometric approach. *J Anat*. 2012; 220(6): 529–43. DOI: 10.1111/j.1469-7580.2012.01493.x.
 13. Guzman-Perez H.G., Guzman-Lopez S., Villarreal-Del Bosque I.S. et al. Cochlear morphometry in healthy ears of a mexican population: A comparison of measurement techniques. *Morphologie*. 2021. DOI: 10.1016/j.morpho.2021.07.001.
 14. Hashimoto S., Naganuma H., Tokumasu K. et al. Three-dimensional reconstruction of the human semicircular canals and measurement of each membranous canal plane defined by Reid's stereotactic coordinates. *Ann Otol Rhinol Laryngol*. 2005; 114(12): 934–8. DOI: 10.1177/000348940511401207.

15. Kim D.K., Kim D.R., Jeong S.H. et al. Analysis of the coplanarity of functional pairs of semicircular canals using three-dimensional images reconstructed from temporal bone magnetic resonance imaging. *J Laryngol Otol.* 2015; 129(5): 430–4. DOI: 10.1017/S0022215115000201.
16. Kumar J.U., Kavitha Y. Application of Curved MPR Algorithm to High Resolution 3 Dimensional T2 Weighted CISS Images for Virtual Uncoiling of Membranous Cochlea as an Aid for Cochlear Morphometry. *J Clin Diagn Res.* 2017; 11(2): TC12–TC14. DOI: 10.7860/JCDR/2017/23206.9456.
17. Kumar P., Sharma S., Kaur C. et al. The ultrastructural study of human cochlear nerve at different ages. *Hearing Research.* 2022; 416. DOI: 10.1016/j.heares.2022.108443.
18. Lee J.Y., Shin K.J., Kim J.N. et al. A Morphometric Study of the Semicircular Canals Using Micro-CT Images in Three-Dimensional Reconstruction. *The Anatomical Record.* 2013; 296(8): 834–9. DOI: 10.1002/ar.22664.
19. Profant O., Škoch A., Balogová Z. et al. Diffusion tensor imaging and MR morphometry of the central auditory pathway and auditory cortex in aging. *Neuroscience.* 2014; 260: 87–97. DOI: 10.1016/j.neuroscience.2013.12.010.
20. Richard C., Laroche N., Malaval L. et al. New insight into the bony labyrinth: A microcomputed tomography study. *Auris Nasus Larynx.* 2010; 37(2): 155–61. DOI: 10.1016/j.anl.2009.04.014.
21. Seibel V.A., Lavinsky L., Irion K. CT-Scan sheep and human inner ear morphometric comparison. *Brazilian Journal of Otorhinolaryngology.* 2006; 72(3): 370–6. DOI: 10.1016/S1808-8694(15)30971-X.
22. Spoor F., Zonneveld F. Comparative review of the human bony labyrinth. *Am J Phys Anthropol.* 1998; 27: 211–51. DOI: 10.1002/(sici)1096-8644(1998)107:27+<211::aid-ajpa8>3.3.co;2-m.
23. Spoor F., Zonneveld F. Morphometry of the primate bony labyrinth: a new method based on high-resolution computed tomography. *J Anat.* 1995; 186(Pt 2): 271–86.
24. Takagi A., Sando I., Takahashi H. Computer-aided three-dimensional reconstruction and measurement of semicircular canals and their cristae in man. *Acta Otolaryngol.* 1989; 107(5–6): 362–5. DOI: 10.3109/00016488909127522.
25. Toyoda S., Shiraki N., Yamada S. et al. Morphogenesis of the inner ear at different stages of normal human development. *Anat Rec (Hoboken).* 2015; 298(12): 2081–90. DOI: 10.1002/ar.23268.
26. Vogl C., Neef J., Wichmann C. Methods for multiscale structural and functional analysis of the mammalian cochlea. *Molecular and Cellular Neuroscience.* 2022; 120. DOI: 10.1016/j.mcn.2022.103720.
27. Welker K.L., Orkin J.D., Ryan T.M. Analysis of individual and intraspecific variation in semicircular canal dimensions using high-resolution x-ray computed tomography. *J Anat.* 2009; 215(4): 444–51. DOI: 10.1111/j.1469-7580.2009.01124.x.
28. White H.J., Helwany M., Peterson D.C. *Anatomy, Head and Neck, Ear Organ of Corti.* FL: StatPearls Publishing; Treasure Island; 2022.