УДК 616.284.4-092:616.286 doi: 10.18692/1810-4800-2016-4-47-54

ПАТОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ В ПОЛОСТЯХ СРЕДНЕГО УХА ВСЛЕДСТВИЕ ДИСФУНКЦИИ СЛУХОВОЙ ТРУБЫ

Михалевич А. Е.[1], Корвяков В. С.[1], Диаб Х. М.[1], Дайхес Н. А.[1], Пащинина О. А.[1], Кондратчиков Д. С.[1], Умаров П. У.[1], Сулейманов Ю. Б.[1], Медеулова А. Р.[2]

[1] ФГБУ «Научно-клинический центр оториноларингологии» ФМБА России, 123182, Москва, Россия (Директор – проф. Н. А. Дайхес)

[2] Казахский национальный медицинский университет им. С. Д. Асфендиярова, Университетская клиника «Аксай», 040918, Алматы, Республика Казахстан

PATHOPHYSIOLOGICAL MECHANISMS OF NEGATIVE PRESSURE IN THE MIDDLE EAR CAVITY INDUCED BY EUSTAHIAN TUBE DYSFUNCTION

Mikhalevich A. E.[1], Korviakov V. S.[1], Diab Kh. M.[1], Daikhes N. A.[1], Pashchinina O. A.[1], Kondratchikov D. S.[1], Umarov P. U.[1], Suleimanov Iu. B.[1], Medeulova A. R.[2]

[1] Federal State Budgetary Institution Clinical Research Centre for Otorhinolaryngology to the Federal Medico-Biological Agency of the Russian Federation, Moscow, Russia

[2] Kazakh National Medical University n.a. S.D. Asfendiyarov, Aksay University Hospital , Almaty, The Republic of Kazakhstan

В статье описаны патофизиологические механизмы отрицательного давления в полости среднего уха вследствие стойкой дисфункции слуховой трубы; также рассмотрены компенсаторные механизмы, противостоящие на начальных этапах нарастанию отрицательного давления в среднем ухе, где основная роль принадлежит слизистой оболочке ретротимпанальных отделов. Во всех случаях при отрицательном давлении в барабанной полости подножная пластинка всегда будет погружаться в сторону окна преддверия, а вторичная мембрана – выпячиваться в барабанную полость; дано теоретическое обоснование этих процессов.

Ключевые слова: отрицательное давление в среднем ухе, дисфункция слуховой трубы, слизистая оболочка барабанной полости.

Библиография: 21 источник.

The article describes the pathophysiological mechanisms of negative pressure in the middle ear cavity due to persistent auditory tube dysfunction; we also demonstrated the compensatory mechanisms opposing at initial stages to the increase of negative pressure in the middle ear, where the main role is played by the mucosa of the retro-tympanic parts. In all cases of negative tympanic cavity pressure the base of stapes gets pulled towards the vestibular window and the secondary round window membrane protrudes into the tympanic cavity; the article explains the theoretical basis of these processes.

Key words: negative pressure in the middle ear, Eustachian tube dysfunction, the mucous membrane of the tympanic cavity.

Bibliography: 21 sources.

Общеизвестно, что вследствие дисфункции слуховой трубы, в особенности при ее стойкой и выраженной патологии, в полостях среднего уха создается отрицательное давление, запускающее патофизиологические механизмы, которые на начальных этапах характеризуются процессами адаптации к изменившимся условиям вследствие подключения различных компенсаторных механизмов, а при затянувшемся процессе – к срыву адаптации и развитию стойких морфологических изменений.

Чтобы понять процессы, происходящие в среднем ухе при изменении давления газов в нем, важно представлять его анатомо-физиологические взаимоотношения. Тимпанальной диафрагмой барабанная полость делится на передненижний отдел (про-, мезо- и гипотимпанум), который играет важную роль в звукопроведении, и задне-верхний отдел (эпи- и ретротимпанум, вход в пещеру, антрум, клетки сосцевидного отростка), в котором происходит активный процесс газообмена.

Эти отделы среднего уха покрыты слизистой оболочкой, аналогичной дыхательным путям, а скорость газообмена непосредственно зависит от площади поверхности слизистой оболочки, выстилающей барабанную полость и ретротимпанальные отделы [1]. Основными физиологическими путями газообмена между средним ухом и внешней средой являются диффузия газа через слизистую оболочку и выравнивание давления через слуховую трубу. Кроме пассивного пути открытия слуховой трубы при глотании или зевании, имеет место активный, который подразумевает наличие рефлекторной дуги и рецепторов, улавливающих изменения парциального давления и концентрации газов [2–5]. Эти рецепторы представлены гломусными тельцами, которые принадлежат к ангиохеморецепторам и располагаются на внутренней поверхности ненатянутой части барабанной перепонки [6]. Натянутая часть барабанной перепонки более жесткая, служит в основном для передачи звуков, расслабленная часть более податливая, предназначена для определения перепадов давления. Ряд ученых подтвердили это предположение, обнаружив в расслабленной части специфические нервные окончания, названные модифицированными тельцами Пачини (Pacini) [7–9]. Тимпанальный гломус передает сенсорную информацию от хеморецепторов, реагирующих на изменение парциального давления CO_2 в солитарный тракт. Эта информация здесь перерабатывается и затем передается прямо или через добавочные нейроны на моторные ядра мышц слуховой трубы.

Объем барабанной полости в норме составляет около 1 $см^3$, объем ретротимпанальных отделов – примерно 2 $см^3$. Площадь поверхности барабанной полости составляет около 6 $см^2$, при этом площадь ретротимпанальных отделов – около 12 $см^2$, соответственно соотношение примерно 1:2 [10].

Через слуховую трубу в среднее ухо поступает минимальное количество газа: около 1 мл 500–1000 раз в день. Длительность открытия слуховой трубы около 0,02 с, т. е. в течение суток в среднее ухо поступает примерно 1 л газа. Причем, как показали эксперименты [11] на здоровых людях (проводилась динамическая тимпанометрия), давление в барабанной полости уменьшается, когда слуховая труба закрыта.

Роль слизистой оболочки барабанной полости при этом не ограничивается только мукоцилиарным клиренсом. Изучение механизмов выравнивания перепадов давления в среднем ухе при здоровой слизистой оболочке показало, что основную роль в этом процессе играет именно она, участвуя в газообмене и поддержании давления в барабанной полости и ретротимпанальных отделах. По гистофизиологическому строению слизистой оболочки среднее ухо можно разделить на два отдела:

– передненижний (про-, мезо- и гипотимпанум), в котором слизистая оболочка имеет схожее строение со слуховой трубой, как бы являясь ее продолжением; слизистая оболочка здесь представлена псевдомногослойным эпителием, имеет многочисленные реснички и слизистые (бокаловидные) клетки, участвующие в мукоциллиарном клиренсе, и толщину около 70 мк;

– задневерхний отдел, слизистая оболочка представлена однослойным кубическим эпителием без слизистых клеток и ресничек, с собственной пластинкой неплотной, тонкой соединительной ткани и имеет толщину 40 мк, она густо пронизана сосудистой сетью и служит для газообмена O_2, CO_2 и N_2 [12–14].

Объем тимпанального отдела барабанной полости в 2 раза меньше, чем объем ретротипанальных отделов, соответственно и газообмен в ретротимпанальных отделах должен составлять не менее 2 л в сутки для поддержания давления в среднем ухе адекватным атмосферному. Если исключить из газообмена тимпанальный отдел, объем которого равен 1 $см^3$, к примеру при дисфункции слуховой трубы и блоке тимпанального перешейка, то газообмен в ретротимпанальных отделах (объем равен 2 $см^3$) должен усилиться как минимум в 1,5 раза, чтобы возместить объем барабанной полости. Но это может произойти только за счет усиления поступления газов из расширенных сосудов слизистой оболочки ретротимпанального отдела, что неизбежно приводит к ее отеку и пропотеванию жидкости. Объем ретротимпанального отдела уменьшается за счет накопления жидкости, это приводит к дальнейшему усилению газообмена, что требует дальнейшего расширения сосудов, и, как следствие, еще большему пропотеванию жидкости. Запускается порочный патологический круг (срыв адаптации), который приводит к повреждению слизистой оболочки, склерозу подслизистого слоя, запустеванию сосудов или к явлениям мукозита, что в конечном итоге нарушает газообмен. Это неизбежно приведет к отрицательному давлению в ретротимпанальных отделах и ретракции ненатянутой части барабанной перепонки, а при наличии стойкой дисфункции слуховой трубы к ателектазу барабанной полости. Вначале втягивание барабанной перепонки как бы противодействует негативному давлению в барабанной полости, являясь временным буфером выравнивания давления [15], но, как показали исследования N. Fink, J. Sade, A. Ars, период необходимый для развития ателектаза среднего уха при полном закрытии слуховой трубы у разных пациентов составлял от 18 до 125 мин (в среднем 43 мин) [16].

Рассмотрим компенсаторные механизмы среднего уха, противостоящие созданному отрицательному давлению.

Незначительные колебания давления в барабанной полости может компенсировать *барабанная перепонка* своей подвижностью, однако эта подвижность ограничена, поэтому возможна компенсация изменения объема воздуха только до 0,2–0,3 мл [17].

Втяжение барабанной перепонки является компенсаторным механизмом, который стремится сохранить постоянное давление в барабанной полости [18]. Этот баланс основывается на законе Бойля–Мариотта[1], постулатом которого является, что PV = const, где P – давление; V – объем, т. е. при уменьшении давления, чтобы сохранить эту константу, необходимо уменьшить объем.

Если по какой-то причине произошло уменьшение давления в определенном объеме газа, то это вело к изменению const. Для того чтобы сохранить значение const, есть два пути:

– повысить давление газа до первоначального значения, не изменяя объем;

– уменьшить объем, что приведет к повышению давления газа на его стенки и сохранению const.

Касательно патофизиологии среднего уха первый путь может быть реализован только устранением дисфункции слуховой трубы, что, к сожалению, не всегда выполнимо, второй путь реализуется через адаптационно-компенсаторные механизмы, о которых будет сказано ниже. Таким образом, для того чтобы сохранить const, (т. е. давление газа на стенки сосуда должно остаться неизменным), при уменьшении давления необходимо уменьшить объем сосуда на некоторое значение, как бы сжав сосуд, тем самым повысив давление.

В случае отрицательного давления в барабанной полости за счет втяжения барабанной перепонки достигается уменьшение объема тимпанальной полости, что на некоторое время способно выровнять давление с атмосферным. Сначала втягивается pars flaccida, по известным причинам (отсутствие среднего слоя), если это не дает необходимого выравнивания давления, то следом начинает втягиваться pars tensa до определенного значения, насколько позволит ее средний коллагеновый слой, который придает перепонке природу гибкой мембраны. После истончения и разрушения коллагенового слоя, что требует определенного времени, наступают атрофия барабанной перепонки и ателектаз. Буферные свойства натянутой части барабанной перепонки практически в 50 раз превышают таковые у ненатянутой ее части. Если ретракция барабанной перепонки сохраняется в течение длительного времени, то это приводит к необратимым декомпенсированным состояниям, при которых имеют место образование спаек и отшнуровка эпидермиса от дна ретракционного кармана (один из вариантов образования холестеатомы) [19, 20].

Немаловажное значение в распределении и выравнивании давления имеет интераттикотимпанальная диафрагма, разделяющая барабанную полость на два отдела, она имеет два постоянных отверстия (или соустья). Переднее, ведущее в передний аттик, и заднее – в область внутреннего аттика и далее в адитус и антрум. На начальных этапах воспаления тимпанальная диафрагма выполняет положительную роль. Она разделяет передненижний отдел от задневерхнего за счет воспалительного отека слизистой оболочки в области ее соустьев, что приводит к образованию их функционального блока и локализации воспалительного процесса в барабанной полости. Негативная роль тимпанальной диафрагмы при длительном блоке ее соустьев (механическом) заключается в нарушении синхронизации между прохождением воздуха из передненижних отделов барабанной полости в ретротимпанальные, где происходит обмен газов вследствие их разобщения. Даже при наличии нормально функционирующей слуховой трубы, при условии полной блокады соустий интераттикотимпанальной диафрагмы газообмен в полостях среднего уха будет нарушен, так как воздух прерывисто будет проходить только в передне-нижний отдел барабанной полости, а в клетках сосцевидного отростка будет сохраняться вакуум. При блоке переднего соустья нарушается газообмен и создается отрицательное давление, ведущее к ретракции ненатянутой части барабанной перепонки в области переднего аттика. При блоке заднего соустья создается отрицательное давление в ретротимпанальных отделах и аттике, что приводит к ретракции задневерхнего квадранта перепонки либо ненатянутой ее части.

Образование выпота – если отрицательное давление сохраняется и другие механизмы буферизации не выравнивают его, то уменьшение объема барабанной полости достигается за счет заполнения ее транссудатом.

Вентиляционная функция слуховой трубы (помимо защитной и дренажной) выполняет роль клапана, который открывается и пропускает газ в одном направлении – из носоглотки в барабанную полость. Слуховая труба в нормальном состоянии закрыта и открывается под действием m. tensor veli palatyni, m. Ievator veli palatyni и

[1] Закон Бойля–Мариотта: при постоянной температуре произведение давления газа, находящегося в замкнутом сосуде, на его объем есть постоянная величина или при постоянной температуре объем находящегося в замкнутом сосуде газа обратно пропорционален давлению.

m. salpingopharyngeus. За счет изменения парциального давления газов, как описано ранее, происходит усиление вентиляционной функции слуховой трубы.

Клеточная система сосцевидного отростка – воздушная система его представляет собой основную часть объема среднего уха за счет площади слизистой оболочки и особенностей ее строения и тем самым играет важную роль в газообмене. Помимо этого, многие авторы приписывают ему роль газового резервуара, что компенсирует перепады давления в барабанной полости.

Основной функцией среднего уха является передача звуковых колебаний из внешней среды во внутреннее ухо, что осуществляется барабанной перепонкой и цепью слуховых косточек. На сегодняшний день механизм звукопроведения подробно описан, за исключением некоторых деталей, касающихся тонких движений в сочленениях слуховых косточек и барабанной перепонки, окна преддверия и вторичной мембраны окна улитки, а также процессов, происходящих в барабанной полости при создавшемся отрицательном давлении в нем.

Нормальная физиология передачи звуковой энергии (колебательных движений звуковой волны) по структурам среднего и внутреннего уха. Звуковая волна воздействует на барабанную перепонку, в средний фиброзный слой которой вставлена рукоятка молоточка, что приводит к возникновению колебательных движений. Барабанная перепонка колеблется неодинаково в разных участках; наибольшая амплитуда колебаний отмечается в области нижних ее квадрантов, наименьшая – в области шрапнелевой мембраны. Одновременно с колебаниями барабанной перепонки происходит движение цепи слуховых косточек и столба воздуха в барабанной полости. По рукоятке молоточка колебания поднимаются вверх к головке молоточка, между последней и телом наковальни имеется седловидный сустав, однако они функционируют как единое целое (как одна косточка). Далее колебательные движения переходят на длинную ножку наковальни, сесамовидную косточку (лентикулярный отросток) и стремя. Подножная пластинка стремени не производит поршнеобразных движений в овальном окне, а совершает движение, которое сравнивается с движениями стопы, при котором двигается носок, без отрыва пятки от пола, по крайней мере при низких частотах и небольших амплитудах колебаний. При средних и высоких частотах стремечко совершает вращательные движения вокруг своей оси [21] (рис. 1).

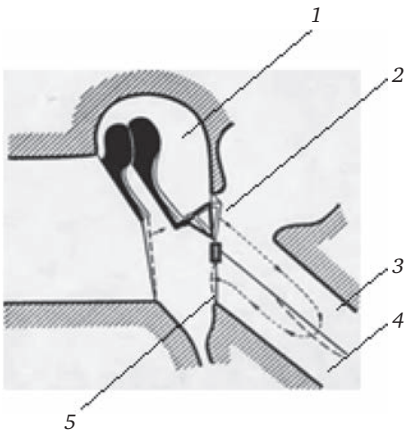


Рис. 1. Схематическое изображение движения цепи слуховых косточек. Пунктиром указано положение слуховых косточек при смещениях барабанной перепонки в сторону барабанной полости:

1 – барабанная полость; *2* – подножная пластинка; *3* – лестница преддверия; *4* – тимпанальная лестница; *5* – вторичная мембрана окна улитки

С подножной пластинки звуковая волна передается на перилимфу преддверия, которая может двигаться только благодаря податливости вторичной мембраны, далее по вестибулярной (преддверной) лестнице распространяется на улитковый канал, орган Корти и соответственно волосковые клетки.

Патологическая физиология колебательных движений по структурам среднего и внутреннего уха при отрицательном давлении в барабанной полости вследствие выраженной стойкой дисфункции слуховой трубы. В результате создавшегося отрицательного давления в среднем ухе при нормальных анатомических взаимоотношениях его структур происходят следующие процессы: барабанная перепонка совместно с рукояткой молоточка вдавливается в барабанную полость к мысу вследствие главной оси ротации слуховых косточек, которая проходит от передней молоточковой связки к задней наковальневой, головка молоточка вместе с телом наковальни идет в обратном направлении, т. е. к латеральной стенке аттика. Так как движение длинной ножки наковальни идет параллельно рукоятке молоточка и расположена она ниже оси ротации, то она соответственно будет двигаться в сторону преддверия. Следовательно, стремечко вместе с подножной пластинкой будет вдавливаться в преддверие. Однако при этом патологическом процессе следует учитывать силу, создаваемую отрицательным давлением, которая в одинаковой степени будет действовать на вторичную мембрану окна улитки и подножную пластинку, стремясь их выпятить (сместить) в барабанную полость. Все же следует понимать, что при прочих равных условиях податливость вторичной мембраны выше, чем аннулярной связки подножной пластинки, а градиент давления перилимфы в тимпанальной лестнице значительно выше, чем в преддверии. Поэтому равнодействующая всех сил, воздействующих на вторичную

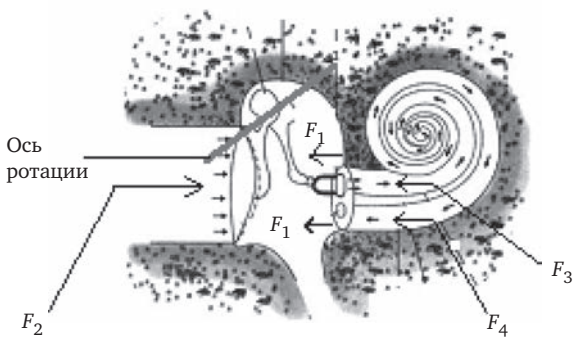


Рис. 2. Схематическое изображение направлений сил, воздействующих на структуры среднего и внутреннего уха:

F_1 – сила за счет отрицательного давления в среднем ухе; F_2 – сила за счет оси ротации слуховых косточек; F_3 – сила за счет градиента давления в преддверии; F_4 – сила за счет градиента давления в тимпанальной лестнице

мембрану и подножную пластинку, рассчитывается следующим образом. На вторичную мембрану действуют две силы (отрицательное давление и градиент давления перилимфы в тимпанальной лестнице), которые, складываясь, будут приводить к ее выпячиванию в барабанную полость. На подножную пластинку и аннулярную связку также действуют эти две силы (сила отрицательного давления в барабанной полости и сила за счет градиента давления в преддверии), которые также будут направлены в сторону барабанной полости. Однако даже без учета силы давления на аннулярную связку за счет втяжения барабанной перепонки, которая направлена в противоположную сторону (в сторону преддверия), градиент давления перилимфы со стороны преддверия на внутреннюю поверхность подножной пластинки меньше такового со стороны тимпанальной лестницы на внутреннюю поверхность вторичной мембраны. Поэтому равнодействующая этих сил будет приводить к выпячиванию вторичной мембраны, а так как жидкость, заполняющая внутреннее ухо, несжимаема и объем ее постоянен, то соответственно это приведет к погружению подножной пластинки.

Все вышесказанное может быть представлено схематично (рис. 2).

На подножную пластинку действуют силы $F_1 + F_3$, стремящиеся выпятить подножную пластинку в барабанную полость, и сила F_2, стремящаяся ее погрузить в преддверие; на вторичную мембрану $F_1 + F_4$ – силы, которые стремятся выпятить вторичную мембрану в барабанную полость.

Сравнивая силы $F_1 + F_3 - F_2$ и $F_1 + F_4$, после сокращения F_1 с обеих сторон неравенства, получаем $F_3 - F_2$ и F_4.

Даже если пренебречь силой F_2 (сила за счет оси ротации слуховых косточек) сила $F_4 > F_3$, то очевидно, что во всех случаях отрицательного давления неравенство решается в пользу выпячивания вторичной мембраны и погружения подножной пластинки в преддверие.

Проиллюстрируем это положение некоторыми часто встречающимися в отохирургии ситуациями.

Ситуация, при которой отсутствует молоточек. Исключается сила F_2, будет происходить вдавление подножной пластинки во внутреннее ухо за счет того, что $F_4 > F_3$ (градиент давления в тимпанальной лестнице больше, чем в преддверии), и большей податливости вторичной мембраны.

Ситуация, при которой молоточек неподвижен, наковальня и стремя сохранены и подвижны (оссификация его связок). В этой ситуации наковальня должна быть также неподвижна за счет того, что молоточек и наковальня работают как одна косточка, но, по существу наковальня сохраняет свою подвижность (что наблюдается при операциях), иногда движения ее ограничены, т. е. молоточек и наковальня как одна косточка при проведении звуковой энергии (малых смещениях). При отрицательном давлении в барабанной полости возможность смещения наковальни не исключается и теоретически вновь подножная пластинка будет смещаться во внутреннее ухо, хотя в меньшей степени: $F_4 > F_3$.

Нет наковальни (молоточек и стремя сохранены и подвижны). Стремя будет смещаться в преддверие, так как в отсутствии силы F_2 получаем неравенство $F_1 + F_4 > F_1 + F_3$, то есть получаем $F_4 > F_3$.

Неподвижна (тугоподвижна) неомембрана, нет связи с молоточком. Смещением рукоятки молоточка в сторону umbo барабанной перепонки можно пренебречь, так как площадь его поверхности мала по сравнению с площадью барабанной перепонки. Следовательно имеем отсутствие силы F_2. Вновь получаем $F_1 + F_4 > F_1 + F_3$, т. е. $F_4 > F_3$, а значит, подножная пластинка смещается в сторону преддверия.

Таким образом, во всех случаях создания отрицательного давления в среднем ухе вторичная мембрана выпячивается в сторону барабанной полости, а подножная пластинка – в преддверие.

Под понятием *податливости* вторичной мембраны и подножной пластинки мы разумеем возможность их движения в ту или иную сторону, т. е. сопротивление, оказываемое на силу отрицательного давления в барабанной полости и градиент давления перилимфы. Податливость зависит от массы, жесткости и силы трения, причем чем больше масса и жесткость, тем меньше податливость. Так как масса значительно больше в области подножной пластинки (тем более что подножную пластинку нельзя рассматривать отдельно от супраструктуры стремени), а также жесткость и трение несомненно выше в области аннулярной

связки (которая крепится к гиалиновому хрящу, покрывающему по периметру раму окна преддверия и подножную пластинку), чем в месте крепления вторичной мембраны, то соответственно при прочих равных условиях податливость вторичной мембраны значительно превосходит таковую подножной пластинки. Следовательно, в ответ на воздействие отрицательного давления в барабанной полости вторичная мембрана будет выпячиваться в барабанную полость, а это приведет к изменению градиента давления с преддверной стороны подножной пластинки, а так как объем жидкости постоянен и она не сжимаема, то обеспечивается ее втяжение в преддверие.

Выводы

Ключевую роль в нарастании отрицательного давления в барабанной полости играет дисфункция слуховой трубы, в особенности стойкое и длительное нарушение ее функции.

На начальных этапах отрицательному давлению в тимпанальной полости противостоят буферные компенсаторные механизмы выравнивания давления, где основную роль выполняет слизистая оболочка ретротимпанальных отделов.

При срыве механизмов адаптации и компенсации наступают патологические изменения в структурах среднего уха.

Во всех случаях при отрицательном давлении в барабанной полости подножная пластинка всегда будет погружаться в сторону окна преддверия, а вторичная мембрана выпячиваться в барабанную полость.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ars B., Dirckx J., Ars-Piret N., Buytaert J. Insights in the physiology of the human mastoid: message to the surgeon // International Archives of Otorhinolaryngology. 2012. Vol. 8, is. 2. P. 296–310.
2. Алагирова З. З. Хирургическое лечение пациентов с хроническим средним отитом с ретракционными карманами барабанной перепонки: дис. … канд. мед. наук. М., 2012. 146 с.
3. Eden A. R. Neural connections between the middle ear, eustachian tube and brain. Implications for the reflex control of middle ear aeration. // Annals of Otology, Rhinology & Laryngology. 1981. Vol. 90, is. 6. P. 566–569.
4. Eden A. R., Gannon P. J. Neural control of middle ear aeration // Archives of Otolaryngology – Head and Neck Surgery. 1987. Vol. 113, is. 2. P. 133–137.
5. Eden A. R., Laitman J. T., Gannon P. J. Mechanisms of middle ear aeration: anatomic and physiologic evidence in primates // Laryngoscope. 1990. Vol. 100, is. 1. P. 67–75.
6. Rockey T. The middle ear as a baroreceptor // Acta otolaryngologica. (Stockholm). 1992. Vol. 112. P. 816–823.
7. Dirckx J. J., Sadé J. Middle ear pressure regulation: basic research and clinical observation // Otology and Neurotology. 2005. Vol. 26, is. 2. P. 300–309.
8. William J. Doyle, Ph.D. The mastoid as functional rate-limiter of middle ear pressure change // International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology. 2007. Vol. 71, is. 3. P. 393–402.
9. Nagai T. Encapsulated nerve corpuscles in the human tympanic membrane // Archives of Otorhinolaryngology. 1989. Vol. 246. P. 169–172.
10. Avraham S., Luntz M., Sade J. The effect of mastoid surgery on atelectatic ears and retraction pockets. // European Archives of Oto-Rhino-Laryngology. 1991. Vol. 6, is. 248. P. 335–336.
11. Pau H., Sievert U., Just T., Sadé J. Pressure changes in the human middle ear without opening the eustachian tube // Acta otolaryngologica. 2009. Vol. 129, is. 11. P. 1182–1186.
12. Ars B., Ars-Piret N. Morpho-functional partition of the middle ear cleft // Acta Otorhinolaryngologica Belgica. 1997. Vol. 51, is. 3. P. 181–184.
13. Ars B., Manrique M. [Pockets of tympanic membrane retraction] // Acta Otorrinolaringologica Espanola. 1996. Vol. 47, is. 6. P. 417–424.
14. Ars B., Ars-Piret N. Middle ear pressure balance under normal conditions // Acta Otorhinolaryngologica Belgica. 1994. Vol. 48, is. 4. P. 339–342.
15. Sadé J. The buffering effect of middle ear negative pressure by retraction of the pars tensa // American Journal of Otolaryngology. 2000. Vol. 21, is. 1. P. 20–23.
16. Fink N., Ars A., Sadé J., Barnea O. Mathematical analysis of atelectasis formation in middle ears with sealed ventilation tubes // Acta Physiologica Scandinavica (Acta Physiol Scand). 2003. Vol. 177, is. 4. P. 493–505.
17. Neuman T., Thoom S. Physiology and Medicine of Hyperbaric Oxygen Therapy. Philadelphia, PA: Elsevier, 2008. 768 p.
18. Sadé J. On the function of the pars flaccida: retraction of the pars flaccida and buffering of negative middle ear pressure // Acta Otolaryngologica. 1997. Vol. 117, is. 2. P. 289–292.
19. Sadé J. The buffering effect of middle ear negative pressure by retraction of the pars tensa // American Journal of Otolaryngology. 2000. Vol. 21, is. 1. P. 20–23.
20. Rios Lima M., Farage L., Cury M., Bahamad F. Update on Middle Ear Barotrauma after Hyperbaric Oxygen Therapy—Insights on Pathophysiology // International Archives of Otorhinolaryngology. 2014. Vol. 18, is. 2. P. 204–209.
21. Альтман Я. А. Слуховая система. Л.: Наука, 1990. 620 с.

Михалевич Антон Евгеньевич – аспирант II научно-клинического отдела заболеваний уха НКЦ оториноларингологии ФМБА России. Россия, 123182, Москва, Волоколамское шоссе, д. 30, стр. 2; тел. 8-926-104-90-45, e-mail: MikhalevichAE@mail.ru

Корвяков Василий Сергеевич – докт. мед. наук, главный научный сотрудник II научно-клинического отдела заболеваний уха НКЦ оториноларингологии ФМБА России. Россия, 123182, Москва, Волоколамское шоссе, д. 30, стр. 2; тел. 8-910-443-69-40, e-mail: Korvyakov56@mail.ru

Диаб Хасан – докт. мед. наук, главный научный сотрудник II научно-клинического отдела заболеваний уха НКЦ оториноларингологии ФМБА России. Россия, 123182, Москва, Волоколамское шоссе, д. 30, стр. 2; тел. 8-919-101-33-00, e-mail: Hasandiab@mail.ru

Дайхес Николай Аркадьевич – докт. мед. наук, профессор, директор НКЦ оториноларингологии ФМБА России. Россия, 123182, Москва, Волоколамское шоссе, д. 30, стр. 2; тел. +7(499)-968-69-25 e-mail: admin@otolar.ru

Пащинина Ольга Александровна – канд. мед. наук, зав. отделением II научно-клинического отдела заболеваний уха НКЦ оториноларингологии ФМБА России. Россия, 123182, Москва, Волоколамское шоссе, д. 30, стр. 2; тел. 8-916-024-83-83, e-mail: Olga83@mail.ru

Кондратчиков Дмитрий Сергеевич – младший научный сотрудник НКЦ оториноларингологии ФМБА России. Россия, 123182, Москва, Волоколамское шоссе, д. 30, стр. 2; тел. 8-916-544-91-05, e-mail: Kondratchikov@gmail.com

Умаров Парвиз Уктамович – канд. мед. наук, старший научный сотрудник НКЦ оториноларингологии ФМБА России. Россия, 123182, Москва, Волоколамское шоссе, д. 30, стр. 2; тел.: 8-916-598-15-55, e-mail: upu-lor@yandex.ru

Сулейманов Юсуп Баширович – канд. мед. наук, старший научный сотрудник НКЦ оториноларингологии ФМБА России. Россия, 123182, Москва, Волоколамское шоссе, д. 30, стр. 2; тел. 8-909-155-87-86, e-mail: yusuplor@gmail.com

Медеулова Айгуль Р. – магистр ОЗ, руководитель центра ЛОР и сурдологии университетской клиники «Аксай». Казахский национальный медицинский университет им. С. Д. Асфендиярова. Республика Казахстан, 040918, Алматы; тел. +7701-421-77-65, +7727-372-10-27, e-mail: medeulova@bk.ru

REFERENCES

1. Ars B., Dirckx J., Ars-Piret N., Buytaert J. Insights in the physiology of the human mastoid: message to the surgeon. *International Archives of Otorhinolaryngology*; 2012; 8(2); 296–310.
2. Alagirova Z. Z. Khirurgicheskoe lechenie patsientov s khronicheskim srednim otitom s retraktsionnymi karmanami barabannoi pereponki [Surgical treatment of patients with chronic otitis media with retraction pockets of the eardrum] diss. Moscow; 2012. (in Russian)
3. Eden A. R. Neural connections between the middle ear, eustachian tube and brain. Implications for the reflex control of middle ear aeration. *Annals of Otology, Rhinology & Laryngology*; 1981; 90(6); 566–569.
4. Eden A. R., Gannon P. J. Neural control of middle ear aeration. *Archives of Otolaryngology – Head and Neck Surgery*; 1987; 113(2); 133–137.
5. Eden A. R., Laitman J. T., Gannon P. J. Mechanisms of middle ear aeration: anatomic and physiologic evidence in primates. *Laryngoscope*; 1990; 100(1); 67–75.
6. Rockey T. The middle ear as a baroreceptor. *Acta otolaryngologica*. (Stockholm); 1992; 112: 816–823.
7. Dirckx J. J., Sadé J. Middle ear pressure regulation: basic research and clinical observation. *Otology and Neurotology*; 2005; 26(2); 300–309.
8. William J. Doyle, Ph.D. The mastoid as functional rate-limiter of middle ear pressure change. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*; 2007; 71(3); 393–402.
9. Nagai T. Encapsulated nerve corpuscles in the human tympanic membrane. *Archives of Otorhinolaryngology*; 1989; 246; 169–172.
10. Avraham S., Luntz M., Sade J. The effect of mastoid surgery on atelectatic ears and retraction pockets. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*; 1991; 6(248); 335–336.
11. Pau H., Sievert U., Just T., Sadé J. Pressure changes in the human middle ear without opening the eustachian tube. *Acta otolaryngologica*; 2009; 129(11); 1182–1186.
12. Ars B., Ars-Piret N. Morpho-functional partition of the middle ear cleft. *Acta Otorhinolaryngologica Belgica*; 1997; 51(3); 181–184.
13. Ars B., Manrique M. [Pockets of tympanic membrane retraction]. *Acta Otorrinolaringologica Espanola*; 1996; 47(6); 417–424.
14. Ars B., Ars-Piret N. Middle ear pressure balance under normal conditions. *Acta Otorhinolaryngologica Belgica*; 1994; 48(4); 339–342.
15. Sadé J. The buffering effect of middle ear negative pressure by retraction of the pars tensa. *American Journal of Otolaryngology*. 2000; 21(1); 20–23.
16. Fink N., Ars A., Sadé J., Barnea O. Mathematical analysis of atelectasis formation in middle ears with sealed ventilation tubes. *Acta Physiologica Scandinavica (Acta Physiol Scand)*; 2003; 177(4); 493–505.
17. Neuman T., Thoom S. Physiology and Medicine of Hyperbaric Oxygen Therapy. Philadelphia, PA: Elsevier; 2008: 768.
18. Sadé J. On the function of the pars flaccida: retraction of the pars flaccida and buffering of negative middle ear pressure. *Acta Otolaryngologica*. 1997; 117(2): 289–292.
19. Sadé J. The buffering effect of middle ear negative pressure by retraction of the pars tensa. *American Journal of Otolaryngology*; 2000; 21(1): 20–23.
20. Rios Lima M., Farage L., Cury M., Bahamad F. Update on Middle Ear Barotrauma after Hyperbaric Oxygen Therapy–Insights on Pathophysiology. *International Archives of Otorhinolaryngology*; 2014; 18(2): 204–209.
21. Al'tman Ja. A. Slukhovaya sistema [Auditory system]. L.: Nauka; 1990: 620 (in Russian)

Anton Evgen'evich **Mihalevich** – post-graduate student of the II Scientific and Clinical Department of Ear Disease of Clinical Research Centre for Otorhinolaryngology. Moscow, Russia. 123182, 30/2, Volokolamsk Shosse, tel. 8-926-104-90-45, e-mail: MikhalevichAE@mail.ru

Vasilii Sergeevich **Korvyakov** – MD, Chief research associate of the II Scientific and Clinical Department of Ear Disease of Clinical Research Centre for Otorhinolaryngology. Moscow, Russia. 123182, 30/2, Volokolamsk Shosse, tel. 8-910-443-69-40, e-mail: Korvyakov56@mail.ru

Hassan **Diab** – MD, Chief research associate of the II Scientific and Clinical Department of Ear Disease of Clinical Research Centre for Otorhinolaryngology. Moscow, Russia. 123182, 30/2, Volokolamsk Shosse, tel. 8-968-757-74-79, e-mail: Hasandiab@mail.ru

Nikolay Arkad'evich **Daikhes** – MD, Professor, Director of Clinical Research Centre for Otorhinolaryngology, Moscow, Russia. 123182, 30/2, Volokolamsk Shosse, tel. 7(499)-968-69-25, e-mail: admin@otolar.ru

Ol'ga Aleksandrovna **Pashhinina** – MD Candidate, Head of the II Scientific and Clinical Department of Ear Disease of Clinical Research Centre for Otorhinolaryngology. Moscow, Russia. 123182, 30/2, Volokolamsk Shosse, tel. 8-916-024-83-83, e-mail: Olga83@mail.ru

Dmitrij Sergeevich **Kondratchikov** – junior research associate of the II Scientific and Clinical Department of Ear Disease of Clinical Research Centre for Otorhinolaryngology. Moscow, Russia. 123182, 30/2, Volokolamsk Shosse, tel. 8-916-5449105, e-mail: Kondratchikov@gmail.com.

Parviz Uktamovich **Umarov** – MD Candidate, senior research associate of Clinical Research Centre for Otorhinolaryngology of MBA of Russia, Moscow, Russia. 123182, 30/2, Volokolamsk Shosse, tel. 8-916-598-15-55, e-mail: upu-lor@yandex.ru.

Jusup Bashirovich **Suleimanov** – MD Candidate., Senior research associate of the II Scientific and Clinical Department of Ear Disease of Clinical Research Centre for Otorhinolaryngology. Moscow, Russia. 123182, 30/2, Volokolamsk Shosse, tel. 8-909-155-87-86, e-mail: yusuplor@gmail.com

Ajgul' R **Medeulova** – Master of Healthcare, Head of ENT and Surdology Center of the Aksay University Hospital, Kazakh National Medical University n.a. S.D. Asfendiyarov. The Republic of Kazakhstan, 040918, Almaty, tel. +77014217765; +77273721027, e-mail: medeulova@bk.ru

