

Основы акустического анализа глаза и особенности формирования ультразвукового диагностического изображения

¹И.Ю.Насникова, ²С.И.Харлап, ²Д.В. Анджелова,
²К.С.Аветисов, ²Т.А.Щеголева, ²О.В.Эксаренко

¹ФГУ «Центральная клиническая больница с поликлиникой» УД Президента РФ,
²Учреждение РАМН «НИИ глазных болезней РАМН», Москва

В статье затронуты вопросы особенностей анатомического строения и биофизических свойств глаза в целом и его отдельных структурных элементов. Проанализированы отечественные и зарубежные источники, характеризующие широкий диапазон биологических, биохимических и физических свойств морфологических элементов, составляющих глазное яблоко. Оценено значение отдельных анализируемых характеристик для формирования ультразвукового пространственного изображения.

Ключевые слова: глаз, строение глазного яблока, акустические характеристики, ультразвуковое сканирование

The article discusses peculiarities of anatomical structure and biophysical prosperities of the eye in general and its structural elements in particular. Russian and foreign sources which characterize a wide range of biological, biochemical and physical properties of morphological elements composing the eyeball have been analyzed. A role of some analyzed characteristics in forming an ultrasound spatial image has been assessed.

Key words: eye, eyeball structure, acoustic characteristics, ultrasound scanning.

Современные цифровые технологии получения, анализа и хранения результатов ультразвукового анализа позволяют представить глазное яблоко в виде объемного изображения, в котором пространственно отображена его морфологическая структура. Это дает возможность изучить топографию и оценить взаимоотношение большинства структурных элементов глаза. Такой подход кажется наиболее доступным и естественным для понимания, информативным и легким для восприятия врачами и пациентами [1–3, 10, 18, 19].

В упрощенном виде, в основе способа получения современного сложного параметрического ультразвукового изображения лежат два основных технологических «эффекта»:

1) т.н. «первичный параметр» – результаты оценки амплитуды обратного рассеяния ультразвуковых волн (градации серой шкалы) от того или иного вида биологической ткани [4, 5, 7, 15, 16, 20–22].

2) и «вторичный параметр» – результаты определения значения величины скорости кровотока (регистрация потока крови и его цветовое кодирование при помощи эффекта Доплера) [9, 14, 22, 24–27].

Диагностическое изображение возникает в результате анализа зависимостей между акустическими параметрами и структурой отдельных элементов глазного яблока. Это позволяет во время УЗ исследования, дифференцировать между собой «нормальные» и патологически измененные ткани [9, 16, 24].

Биофизические основы строения биологических тканей. Ткани человеческого организма по своим биомеханическим свойствам можно условно разделить на твердые, мягкие и жидкие. К твердым тканям относятся кости и минеральные образования, возникающие в процессе жизнедеятельности организма. К жидким тканям – кровь, лимфа, околоплодная, внутримозговая, внутриглазная и другие биологические жидкости. К мягким тканям – все остальные. Группа биологических тканей, определяемых как «мягкие», находится в промежутке между «твердыми телами» и биологическими жидкостями-

ми. Если рассматривать свойства, указанных групп тканей, с позиции *поглощения* и *скорости распространения* в них ультразвука, то деление их на составляющие может быть несколько иным [20–24].

Исследования акустических свойств биологических структур, проведенные за последние три десятилетия позволили выделить три класса тканей:

1) ткани легкого, обладающие по сравнению с остальными низкой способностью пропускать ультразвуковые волны (малой скоростью прохождения звука) за счет высокого содержания газа;

2) костные ткани, близкие по своим свойствам к твердым телам;

3) все остальные ткани, включающие в себя жидкие среды организма и мягкие ткани [4, 20–24, 27].

Большинство мягких тканей содержат до 80% воды и определенная специфический «набор» молекулярных составляющих, включающий в себя белки и различные органические и неорганические компоненты низкой молекулярной массы. Значительная часть биологических жидкостей и мягких тканей обладает большим, по сравнению с водой, значением скорости распространения в них ультразвука. Результаты изучения характера распространения ультразвуковых волн в мягких тканях и других средах человеческого организма, показали, что высокое значение *скорости звука*, соотносится с высоким содержанием в них белков. Другой особенностью мягких тканей является значительное присутствие в них структурного коллагена и низкое – свободной воды. Наибольшая величина скорости звука, в этой группе тканей, отмечается в мышечных сухожилиях. Исключением является жировая ткань, которая характеризуется наименьшим значением *скорости звука* в этом классе тканей и отрицательным *температурным коэффициентом скорости*. Все мягкие ткани не жировой природы имеют положительное значение этого коэффициента [4–6, 8].

Мягкие ткани, также как и «твердые тела», обладают способностью сохранять свою форму. Эта биофизическая

двойственность, с учетом механических свойств мягких тканей, отражена в названиях ряда их крайних вариантов. Эти ткани часто называют «полутвердыми» или в другом варианте «водоподобными». Такая оценка характеризует их широкий диапазон биологических и физических свойств. К такого рода тканям относятся человеческие глаза и окружающие их анатомические структуры [11,13,16,26]. За последние три десятилетия определены параметры значений скорости звука в различных биологических жидкостях и мягких тканях. Исследования указывают на то, что согласно этому критерию значения стекловидного тела и внутриглазной жидкости находятся между значениями жировой ткани и значениями окологлобальной жидкости. Значения скорости звука в ткани хрусталика глаза располагаются между значениями показателей мышечной и хрящевой тканей [4–7, 20–24].

Глазное яблоко. Глаз является высокогидрофильным биологическим образованием и, по своему строению, существенно отличается от других анатомических элементов орбиты. Основная масса тканей его объема не имеет нервных волокон и сосудов [6,8,11,17].

Ультразвуковые срезы и воспроизводимые объемы структур глаза могут быть оценены при помощи т.н. режима серой шкалы с использованием их качественно и количественного анализа. Вместе с тем, некоторые из оболочек глаза состоят из мельчайших артериальных сплетений и тончайших венозных капилляров (радужная оболочка, цилиарное тело и собственно хориоидея), концевых веточек ветвей центральной артерии и вены сетчатки. Эти образования при комбинированном УЗ исследовании (в «В» и «З D» режимах серой шкалы в сочетании с режимами ЦДК или ЭК) воспроизводятся в виде сложного по структуре и цвету «рисунка» цветковых карт потоков крови. Оболочки глаза при проведении ультразвукового исследования в серой шкале, изображаются в виде тонкого, сферичного, чуть вытянутого в одну сторону, многослойного контура с различной интенсивностью воспроизведения рисунка каждого слоя. «Содержимое» глазного яблока на ультразвуковом срезе представляется в виде «темного», гомогенного, почти анэхогенного («эхо-негативного») округлого изображения. При кажущейся однородности воспроизводимой текстуры изображения срединных элементов (передней камеры, хрусталика и стекловидного тела), все они имеют хотя и внешне сходные, но все-таки отличные друг от друга акустические характеристики структуры [1–4, 11,15,19].

В настоящем сообщении нами не будут затронуты вопросы комбинированного использования серой шкалы и цветного изображения потоков крови для оценки состояния и визуализации изменений сетчатки, зрительного нерва и большей части сосудистой оболочки.

Основная масса объема глаза состоит из тканей, формирующих фиброзную капсулу: роговицы и склеры, а также содержимого, его определяющего: влаги передней и задней камер, сосудистой и сетчатой оболочек, хрусталика и стекловидного тела. Состояние двух последних элементов особенно важно для сохранения постоянной структуры и объема глаза. Некоторые ученые, например Е. Fuchs, даже объединяли хрусталик и стекловидное тело в т.н. «ядро» и, при описании того и иного вида локальной патологии, говорили о болезнях «глазного ядра» [11,17].

Принадлежность глазного яблока и некоторых анатомических образований, находящихся в орбите, к т.н.

«полутвердым», «водоподобным» мягким тканям, наглядно демонстрирует подавляющее содержание в их структуре т.н. коллагеновой «составляющей», а также преобладание в их объеме биологических жидкостей в связанном и не связанном состоянии. Это положение может быть подтверждено:

а) близким к жидкой структуре, составом передней камеры;

б) плотным, эластичным по консистенции, слоистым строением хрусталика;

в) гелеобразным, акустически полностью «прозрачным», но имеющим свою определенную структуру, строением стекловидного тела;

г) сферичной, тончайшей, эластичной коллагеновой «мембраной» слоя сосудистой оболочки;

д) строением плотной соединительнотканной капсулы глаза, имеющей, чуть вытянутую округлую форму.

Влага передней и задней камер. Влага представляет собой легко текучую водянистую жидкость, содержащую большую часть растворимых составляющих плазмы крови. Водянистая влага содержит также некоторое количество гиалуроновой кислоты. Считается, что по сравнению со стекловидным телом, она обладает более низкой вязкостью. Гиалуроновая кислота в ней приблизительно на 95% деполимеризована [6,11,23].

Оценивая строение глазного яблока с позиции биофизических свойств, при первом приближении, можно попытаться пренебречь вкладом его структурной компоненты в общий *объемный модуль упругости*. Учитывая такие объемные свойства глаза как *сжимаемость, плотность и скорость* распространения продольных ультразвуковых волн, его содержимое условно можно сравнить с бесструктурным водным белковым раствором. С другой стороны, только такая биологическая жидкость как камерная влага, по своим биохимическим характеристикам и биофизическим параметрам, схожая с ультрафильтратом плазмы крови, может приблизительно считаться таким составом. В камерной влаге, по сравнению с плазмой, более низкое содержание белка. Отношение альбуминов к глобулинам в ней такое же, как в сыворотке, но сыворотка крови содержит 7% белка, а водянистая влага всего 0,02%. Объем камерной влаги у человека равен 0,15 мл, концентрация белка не превышает 10–20 мг на 100 мл [6,11,23].

Экспериментально было показано, что при малых концентрациях белковых макромолекул в простом биологическом растворе, зависимость поглощения ультразвука от концентрации раствора оказывается линейной. При высоких концентрациях в растворе, удельное поглощение возрастает с ростом концентрации макромолекул. Усиление связей между белковыми молекулами, в процессе усложнения биологической структуры ткани и формирования гистологически фиксированного вещества посредством образования связей между соседними белковыми молекулами, приводит к увеличению *поглощения* и уменьшению *скорости звука*. Усложнение структуры и искажение соотношения между «свободной биологической водой» и белками, даже на таком относительно «простом» уровне, а также усложнение взаимоотношений между самими белковыми соединениями, ведет к изменению акустических характеристик этого класса тканей [4–7].

Значение биофизических свойств коллагена. Другим фактором, влияющим на специфическую акустическую

картину УЗ изображения глаза, является превалирующее содержание коллагена в составе отдельных его анатомических элементов. Это касается как строения роговицы, так и строения хрусталика и стекловидного. По мнению некоторых исследователей, коллаген, будучи важным «базовым» элементом, лежащим в основе структуры ряда биологических тканей, определяет их т.н. акустический профиль. В частности было установлено, что *удельное поглощение и скорость звука* в водном растворе коллагена почти в 4 и 2 раза соответственно превышают значения этих параметров в растворе глобулярных белков. В ткани стенок сосудов *скорость звука* повышается с ростом содержания в ней коллагена и уменьшается при увеличении содержания холестерина. Зависимость скорости звука от содержания в ткани коллагена, считается более существенной [4–7, 23].

Все прозрачные для световых волн аваскулярные ткани глаза (роговица, склера, хрусталик, стекловидное тело) сформированы из нежных коллагеновых волокон, ориентированных в пространстве строго определенным образом [6, 11, 13, 14, 23].

Роговица. Основная масса стромы роговицы составляет почти 90% всей ее толщины и образована несколькими слоями уплощенных фибробластов, заключенных между слоями соединительнотканых пластинок, состоящих из коллагеновых волокон. Физические свойства коллагена роговицы подобны коллагену связок и кожи. Коллагеновые волокна роговицы человека имеют мало различимую поперечную полосатость, волокна пластинок слоев идут параллельно поверхности. Волокна роговицы у взрослого человека и у зародыша имеют толщину 25–33 мкм. В каждой пластине волокна лежат под углом к направлению волокон соседней. В некоторых местах волокна одной пластины переходят в соседние и, таким образом, соединяют вместе слои собственного вещества. Правильное расположение коллагеновых волокон и их однородность, влияют на прозрачность роговицы [6, 11, 23].

В нормальном состоянии, ткань роговицы очень хорошо пропускает свет и ультразвуковые волны, т.е. является оптически и «эхографически» прозрачной. Роговица отличается от соседних областей и других оптических элементов глаза не только своей прозрачностью, но и большей кривизной поверхности и оптической силой преломления. Как при проведении световой биомикроскопии, так и при ультразвуковом исследовании, изображение среза роговицы воспроизводится в виде равномерной уплощенной полусферы. Правильной сферической кривизной обладает только средняя треть роговицы, по проекции соответствующая зрачку и носящая название «оптической» зоны. Периферические отделы роговицы более плоские, и это уплощение более выражено с носовой стороны. Место охвата роговицы склерой полупрозрачно и называется лимбом. Ультразвуковой срез роговицы воспроизводится в виде тонкого купола, имеющего хорошо различимые внешние (между наружной поверхностью роговицы и веком) и внутренние (между эндотелием роговицы и влагой передней камеры) тончайшие границы. Между этими границами воспроизводится тонкий, практически равномерный по ширине серповидный, эхографически прозрачный срез [6, 10, 11, 23].

Радужная оболочка. На срединном УЗ срезе глазного яблока видно, что поверхность радужной оболочки рас-

положена не в одной фронтальной плоскости. Хрусталик выдвигает центральную часть радужки, граничащую со зрачком, вперед. Это хорошо заметно на горизонтальном или вертикальном УЗ срезах. Место соединения радужки с цилиарным телом в проекции УЗ среза, является самым тонким. Оно называется корнем радужной оболочки. Радужная оболочка делит передний отдел глаза на две неравные части: переднюю и заднюю камеры, сообщающиеся между собой через зрачок. На плоскостном УЗ изображении они воспроизводятся в виде анэхогенных пространств разной формы. Передняя камера обозначена пространством, находящимся под «куполом» роговицы и ограниченного снизу срезом радужной оболочки и центральной части передней капсулы хрусталика. Проведение УЗ среза через центр роговицы и радужки, по ее диаметру, воспроизводит с двух противоположных сторон анатомическое образование, называемое углом передней камеры. Величина этого угла зависит от того, насколько радужная оболочка «прогнута» в сторону передней камеры. Задняя камера изображается в виде двух узких, зеркально расположенных друг к другу, треугольных пространств, обращенных длинным основанием к задней поверхности радужной оболочки, а острым углом к зрачку [6, 8, 16, 18].

В «биофизическом смысле» радужная оболочка фактически является сложной биологической мембраной находящейся на границе раздела акустических сред. Это и определяет особенности ее визуализации. Кроме того, изображение радужной оболочки в серой шкале зависит и от выраженности сосудистой и мышечной составляющих, а также структуры пигментного листка. Артерии радужки снабжены толстой, хорошо выраженной коллагеновой адвентицией, отчасти несущей «каркасную» функцию. Мышечные волокна радужки образуют две мышцы: мышцу, суживающую зрачок (сфинктер) и мышцу, расширяющую зрачок (дилататор). Эти мышцы состоят из нетипичных гладкомышечных волокон, их считают миоэпителиальными клетками [6, 11, 23, 26, 27].

Хрусталик. Специалисты, изучавшие строение хрусталика человеческого глаза считают, что его волокна сохраняются в течение всей жизни, также как и все эпителиальные клетки, принимающие участие в их образовании. Из всех клеточных органелл в волокне хрусталика, во взрослом состоянии остается только несколько продольно расположенных прозрачных микрокапилляров и скопление рибосом. Белки составляют свыше 30% от общей массы хрусталика, а вода около 65% его общего веса. Волокна хрусталика при электронной микроскопии выглядят гранулярными и содержат несколько водорастворимых белков: α -кристаллин и β -кристаллин. Кроме того имеется водонерастворимый белок – альбуминоид и водорастворимый альбумин γ -кристаллин. Считается, что в хрусталике и стекловидном теле, большинство белков близки по физическим, химическим и биологическим свойствам. Эта особенность отражает специфику диагностического ультразвукового изображения содержимого глазного яблока [8, 12, 17, 26].

С позиции коллоидной химии хрусталик представляет собой сложную автономную биологическую систему, состоящую из однородных по своим физико-химическим свойствам элементов. В течении жизни эта система находится в состоянии неустойчивого равновесия из-за влияния на нее ультрафиолета, входящего в со-

став спектра солнечного света, естественной радиации, различных веществ, находящихся в передней и задней камерах, а также поступающих из стекловидного тела. Можно предположить, что оптическая и акустическая «прозрачность» сохраняются в хрусталике при определенных условиях, которые оказывают влияние на эти свойства. Одним из этих условий, по всей видимости, является особое соотношение между водой и белковыми структурами волокон хрусталика [8, 12, 17, 26].

Находящийся за радужной оболочкой хрусталик, лежит внутри кольца, образованного цилиарными отростками, примерно на расстоянии 0,5 мм от их верхушек и делит глаз на два отдела: меньший передний — «пространство камер» и больший задний — «пространство стекловидного тела». Некоторые исследователи выделяют узкую кольцевидную щель между экватором хрусталика и цилиарными отростками, которую определяют, как «околохрусталиковое пространство» [8, 12, 17, 26].

Хрусталик имеет форму двояковыпуклой чечевицы с неодинаковыми поверхностями и закругленным краем, определяемым как «экватор». К нему прикрепляются волокна цинновой связки, образуя в проекции периферического отдела передней капсулы зонулярную пластинку. Край хрусталика, имеет волнистую поверхность, к которой в разных местах прикрепляются пучки цинновой связки. Центр передней поверхности обозначается как передний, а задней поверхности, как задний полюс хрусталика. Условная линия, их соединяющая, образует «ось» хрусталика. Поверхность хрусталика, обращенная к радужной оболочке, касается зрачкового края изнутри. Задняя поверхность хрусталика помещается в тарелкообразной впадине стекловидного тела и удерживается там при помощи «связки Вейгера» (Wieger). Эта связка присоединена к передней поверхности стекловидного тела и распространяется в виде кольца. Передний полюс хрусталика выстоит примерно на 0,5 мм кпереди от радужной оболочки [8, 13, 17, 27].

Таким образом, хрусталик состоит из: а) капсулы, б) эпителия хрусталика, в) волокон хрусталика. Сумка представляет собой тонкую гомогенную, чрезвычайно прочную прозрачную мембрану. Ее части из практических целей обозначаются как «передняя капсула» и «задняя капсула». В центре спереди и в местах близких к экватору спереди и сзади она толще (около 14–23 мкм). Сзади в центральной зоне она тоньше (около 2–4 мкм). Толщина хрусталика по офтальмометрическим данным равна 2,9–5,1 мм (в среднем 3,7 мм), у эмметропов в среднем 3,76 мм. При анатомическом исследовании толщина хрусталика оказывается большей от 4,7 до 4,9 мм [8, 17, 23].

По заключению M.Salzmann — а, форма задней поверхности хрусталика представляет собой параболоид с кривизной вершины равной 4,6–7,5 мм (в среднем 5,98 мм), а форма передней поверхности похожа на поверхность шара с радиусом кривизны 8,4–13,8 мм. В среднем — 10,64 мм. У эмметропов он в среднем равен 11,05 мм [8]. В толще прозрачного хрусталика при световой биомикроскопии выявляются слоистые зоны с разным коэффициентом преломления, которые условно можно обозначить, как «капсулу», «кору», «ядро». Эти области человеческого хрусталика в зависимости от возраста видоизменяются по структуре. Это хорошо демонстрируется при анализе следующих его характеристик: а) величины, б) формы, в) консистенции, г) окраски [8, 17].

Данные параметры могут быть полезны при оценке клинической картины во время проведения исследования в проходящем свете и изучении состояния хрусталика при помощи направленного потока световых волн разной яркости. При диагностическом использовании ультразвуковых волн для определения состояния хрусталика нельзя, по результатам исследования, определить цвет анализируемого объекта, изменение которого, безусловно, может влиять на зрительные функции. Величина, форма и консистенция (последнюю можно трактовать и как анализ плотности и структуры) — становятся основными характеристиками, позволяющими оценивать диагностическую картину при исследовании хрусталика при помощи ультразвука. Результаты по использованию режима «гистограмма» для анализа тканевых структур человеческого организма, позволяют надеяться на диагностическое значение прямого сопоставления результатов светового (при исследовании оптического среза и цвета хрусталика) и ультразвукового анализа (при исследовании параметров строения, объема и консистенции хрусталика) [1–3, 10, 16].

Человеческий хрусталик растет на протяжении всей жизни. В первые два десятилетия жизни, он увеличивается в переднезаднем направлении, затем происходит его увеличение в диаметре. Величина диаметра хрусталика взрослого человека по экватору равна 9–10 мм. В среднем возрасте человека наружные слои ткани хрусталика становятся более мягкими. Они сохраняют свою бесцветность и прозрачность. Глубокие слои хрусталика уплотняются и становятся твердыми. Эта зона клинически определяется как ядро хрусталика. Со временем окраска ядра меняется и его цвет приобретает желтый оттенок. Соответственно плотности и цвету изменяется и показатель оптического преломления, который усиливается в центральной части [6, 8, 17].

Таким же образом это сказывается и на акустических характеристиках хрусталика. Его структура теряет т.н. «акустическую гомогенность». На эхограмме возникают области и зоны акустического «разряжения» и «уплотнения», что может быть определено при помощи ультразвукового изображения.

Не все стадии оптически видимых изменений прозрачности могут быть зафиксированы при стандартном УЗ исследовании, т.е. не все они могут быть различимы человеческим глазом при оценке полученной эхограммы. Биохимический профиль исследуемых тканей хотя и близок по качественному составу, но они различаются между собой по структуре, физиологическим и количественным биофизическим показателям.

Хрусталик удерживается в одном положении ресничным пояском, состоящим из ресничных волокон. Эти волокна начинаются от основания отростков цилиарного тела. Они представляют собой гомогенные прямые нити, образующие структуру, подобную связке. На современной многофункциональной ультразвуковой диагностической системе в режиме серой шкалы, возможно получить изображение среза этого образования. Имеется еще одна структура, удерживающая хрусталик в естественном положении. Это связка, соединяющая заднюю поверхность хрусталика со стекловидным телом. При разрыве этих образований, хрусталик меняет свое положение. Его полное смещение («вывих») возникает при нарушении целостности уплотненной поверхности

стекловидного тела, которое стабилизирует положение хрусталика. В этой ситуации определить точно его локализацию внутри глаза и оценить топографические изменения, возникшие в результате дислокации, возможно только при ультразвуковом исследовании [1–3, 10].

В неизменном хрусталике удается частично визуализировать срез передней и задней капсул. Это происходит не по причине нарушения его прозрачности и структуры, а по тому, что при проведении исследования через веки, положение хрусталика по отношению к направленному ультразвуковому потоку, который также как и световой имеет волновую природу, меняется. При определенном угле падения направленного фронта ультразвукового потока, на границе раздела акустических сред, происходит его отражение. Этот участок УЗ среза фиксируется на эхограмме в виде частичного изображения «серповидного» контура задней капсулы [10].

Стекловидное тело. Анатомическая структура, заполняющая собой большую часть полости глазного яблока, называется стекловидным телом. Это образование является гидрофильной коллоидной системой и состоит на 99% из связанной воды. Клинически, стекловидное тело представлено в виде массы прозрачного, студнеобразного, аморфного межклеточного вещества, называемого иногда стекловидной влагой. Его дисперсная фаза состоит из сложного белка витреина, имеющего выраженные гигроскопические свойства, и из гиалуроновой кислоты. Комплекс взаимодействия различных типов коллагена в стекловидном теле, их особое пространственное сочетание между собой и гиалуроновой кислотой обеспечивает его прозрачность, уровень вязкости, светопреломление, формирует его строю и регулирует процесс проникновения через него различных веществ [6–8, 11, 13, 23].

Характеризуя биофизические и, в частности, механические свойства стекловидного тела, можно заключить, что оно относится к той части структурного диапазона мягких тканей, которые по своим «свойствам» ближе к жидкостям. Такого рода ткани, как и жидкости, считаются «несжимаемыми» средами. Это означает, что отношение в них сдвигового модуля к объемному модулю близко к нулю. Оценивая его пространственную структуру, необходимо отметить, что оно состоит из нежных пленчатых уплотнений, как бы концентрически наслаивающихся друг на друга, называемых трактами. Эти элементы начинаются от определенных зон, расположенных по окружности ресничного тела и передней области сетчатки и распространяются по направлению кзади. Именно в этом месте происходит плотное соединение стекловидного тела с цилиарным эпителием. Через середину стекловидного тела проходит гиалоидный канал, остаток гиалоидной артерии эмбрионального глаза. Канал идет от диска зрительного нерва по направлению к заднему полюсу хрусталика [6, 13].

В норме стекловидное тело плотно прилегает к внутренней пограничной мембране сетчатки по всей ее поверхности. Эта связь особенно сильна у диска зрительного нерва и у *ora serrata*, а также у цилиарного эпителия, близ задней поверхности хрусталика. Термином «кора» стекловидного тела, клиницисты обозначают уплотнение коллагеновых волокон по периферии объема стекловидного тела, которое непосредственно прилежит к поверхности сетчатки. Коллагеновые волокна «коры» стекловидного тела в задних отделах вплетаются во внутреннюю пограничную мембрану

сетчатки, а спереди в базальную мембрану клеток эпителия ресничного тела. Клиницисты и исследователи обозначают зону этого контакта в заднем полюсе глазного яблока, как заднюю стекловидную (гиалоидную) пластину (мембрану). Такое выделение, по их мнению, оправдано по причине того, что нестабильное положение или нарушение этого соединения приводит к развитию множества клинически важных осложнений [6, 13, 23].

Задняя гиалоидная мембрана отличается от других мест коры стекловидного тела специальными биохимическими реакциями при выявлении специфических белков, а так же толщиной и особым расположением пучков коллагеновых волокон. Передняя гиалоидная мембрана представляет собой часть поверхности стекловидного тела, простирающуюся от переднего края основания стекловидного тела до зубчатой линии. Стекловидное тело пропускает свет и необходимые для метаболизма сетчатки вещества, оно участвует в фиксации хрусталика и способствует прилеганию внутреннего слоя сетчатки к ее наружному пигментному слою [6, 13, 23].

Ряд прижизненных морфологических изменений, возникающих в стекловидном теле, в упрощенном виде могут быть охарактеризованы как:

- 1) нарушение пространственного взаимоотношения между гиалоидными трактами стекловидного тела в результате естественных или патологических причин;
- 2) отслойка гиалоидной мембраны стекловидного тела от внутренней поверхности сетчатки и/или нарушение ее целостности;
- 3) смещение всего объема стекловидного тела с образованием, периодически возникающей, при движении глазных яблок, «динамической» волны;
- 4) возникновение тракций (т.е. формированием зон механического напряжения) в местах оставшейся плотной фиксации отслоенного стекловидного тела и сетчатки;
- 5) коллапс или сморщивание — т.е. потерей стекловидным телом большей части его жидкой составляющей;
- 6) разжижение или дезорганизацию структуры базиса стекловидного тела;
- 7) развитие плотных тяжей — «шварт», с последующим формированием тракций сетчатки и др.

Вынужденное нарушение плотного соприкосновения поверхности стекловидного тела и внутренней пограничной мембраны сетчатки в области заднего полюса и на «периферии» глазного дна приводит к нарушению целостности последней. В последствии, это может послужить причиной формирования в сетчатке изменений, характеризующихся «цепочкой» следующих клинических проявлений в сетчатке: дистрофия — истончение — дефект — отрыв. В дальнейшем этот процесс приводит к отслойке сетчатой оболочки. В местах дистрофических изменений на периферии сетчатки, при соответствующих условиях, возможно развитие процессов рубцевания, неоваскуляризации и формирования пролиферативных изменений. Это происходит одновременно с изменениями нормального взаимоотношения внутренней пограничной мембраны сетчатки и гиалоидной мембраны стекловидного тела.

Развитие любой формы и вида дислокации внутриглазных оболочек приводит к изменениям состояния стекловидного тела. В этих случаях при ультразвуковом исследовании становятся видимыми отдельные группы его волокон, а также зоны его фиброзного изменения и

визуализируются потоки крови в местах прорастания новообразованных сосудов. Можно проследить отслойку гиалоидной мембраны в задних и передних отделах глазного яблока и выявить места сохранения его фиксации и возможных «тракций» в области переднего отрезка и на поверхности глазного дна.

Практически абсолютная акустическая «прозрачность» исходно неизменного стекловидного тела позволяет, при развитии того или иного вида патологического процесса, видеть изображение участков дезорганизации его волокон и изменения, возникающие во взаимоотношении гиалоидных трактов, в результате воспалительного выпота, оседания элементов крови или возникновения т.н. «обменных» отложений.

Склера. Склера построена из пучков коллагеновых волокон, между которыми находятся уплощенные фибробласты. Коллагеновые волокна склеры зародыша такие же, как в роговице. Волокна взрослого человека обладают толщиной варьирующей в пределах от 28 до 280 мкм и обладают выраженной поперечной полосатостью. Склера взрослого человека содержит коллаген подобный коллагену других тканей взрослого. У взрослых людей склера достаточно прочна и выдерживает повышение внутриглазного давления без признаков деформации. Относительная, по сравнению с роговицей, непрозрачность склеры обусловлена высоким содержанием в ней воды. Если обдуть поверхность склеры струей воздуха, тем самым подсушивая ее, то она становится прозрачной. Склера представляет собой плотный, белый слой соединительной ткани, который, вместе с роговицей, хорошо воспроизводится на эхограмме в виде сферичного, чуть вытянутого вперед контура. По форме этого контура, его толщине и характеру деформации, определяется ряд патологических состояний, по которым устанавливается клинический диагноз [6, 11, 12, 17, 23].

Заключение. Анализ результатов экспериментальных и клинических исследований, по изучению влияния биохимических и биофизических свойств тканей животных и человека, на скорость распространения и значения величин затухания, рассеяния и поглощения в них ультразвука, указывает на влияние «коллагеновой» составляющей биологических тканей на эти характеристики. Дезорганизация морфологической структуры тканей глаза, происходящая под воздействием различных патологических процессов, как правило, бывает вызвана изменениями их «коллагеновой» основы. Эти изменения сопровождаются:

а) нарушением волокон коллагена на макромолекулярном уровне;

б) изменением пространственного положения слоев коллагена в результате врожденного или приобретенного заболевания.

Изменение пространственного положения слоев коллагена в отдельных анатомических структурах глаза клинически проявляется:

1) в изменении прозрачности роговицы, возникающей в результате развития различных форм рубцевания тканей ее стромы;

2) появлению «оптических» уплотнений и изменение цвета в центральной области, а также зон разрежения в кортикальных слоях хрусталика;

3) развитие видимых явлений «набухания» волокон

хрусталика, изменении кривизны задней и передней поверхности и увеличению его объема;

4) возникновением отслойки, нарушением целостности гиалоидной мембраны и деструкцией «трактов» стекловидного тела, с последующим формированием «шварт», развитием тракций и формированием зон «механического напряжения» на поверхности сетчатки;

5) развитием эктазии, истончения и деформации склеральной оболочки.

Изменение морфологической структуры и анатомического соотношения, приводит к изменению акустических границ разделов сред оптических структур глаза. На границе раздела сред с различным акустическим импедансом (произведение акустической плотности среды и скорости звука) происходит отражение и преломление участков потока ультразвуковых волн по законам геометрической оптики подобно тому, как это происходит со светом на границе двух прозрачных сред с различным коэффициентом преломления [4–7, 20–23]. Эхографически «невидимые» области и структуры становятся «видимыми».

Возможно ли, по результатам цифрового сканирования в серой шкале, оценить т.н. «невидимые» изменения, т.е. те предполагаемые нарушения, которые возникают на макромолекулярном уровне и неразличимы человеческим глазом в обычных условиях?

Глаз человека по чувствительности и восприятию зрительных образов анизотропен. Он обладает максимальным различением мелких деталей по вертикальным краям изображения и минимальным по наклонным. На восприятие изображения и различение его деталей, влияет и контрастная чувствительность. Оценка структуры изображения сложный психофизиологический процесс. Качественные и количественные характеристики изображения того или иного биологического объекта, зависят от выбора «базового» метода оценки строения ткани. В зависимости от выбранного метода исследования, анализ производится посредством использования специальных терминов для оценки определенного набора признаков, различных уровней детализации отдельных структур [9, 14, 20–22, 24]. Для более высокого уровня различения отдельных элементов регистрируемого изображения используют два способа:

а) повышение структурной проработки ткани, улучшение формирования и воспроизведения изображения до уровня, позволяющего человеческому глазу различать необходимые детали;

б) создание программ количественного и графического анализа «полутоновой» текстуры поверхности, структуры и объема т.н. изображений высоких уровней сложности. Такой подход в специальной литературе называется «машинным видением» [14, 19–22, 24].

К этим способам оценки относятся: а) анализ структуры плоскостного и объемного изображения в серой шкале в режиме «гистограмма», б) автоматическое воспроизведение в различной графической текстуре изображения объемов отдельных, находящихся рядом структур, обладающих близкими акустическими профилями, в) другие способы программного пространственного параметрического ультразвукового цифрового анализа.

При кажущейся «простоте» строения глазного яблока, изменения, происходящие в его структуре, могут быть весьма сложными по своей природе, а также затруднительными для расшифровки результатов пространствен-

ного ультразвукового сканирования. Они могут выходить за «рамки» нарушения целостности отдельных анатомических элементов глаза или их смещения. Исследователь должен представлять, каким образом, и с помощью каких технологий, можно оценить предполагаемую патоморфологическую картину. Современные ультразвуковые диагностические системы позволяют детально проанализировать состояние глазных яблок, используя сравнительные качественные и количественные характеристики.

Литература

1. Аветисов С. Э., Харлап С.И., Насникова И.Ю. и др. Трехмерная компьютерная сонография в определении сосудистой системы глаза и орбиты // *Вестн. офтальмол.* – 2003. – Т.119, № 4. – С. 39 – 49.
2. Аветисов С.Э., Харлап С.И., Липатов Д.В., Насникова И.Ю. Возможности ультразвуковых методов диагностики при полной дислокации хрусталика в стекловидное тело // *Современные методы лучевой диагностики в офтальмологии: Сб. научн. тр.* – М.,: ГУ НИИ ГБ РАМН. – 2004. – С. 3–5.
3. Аветисов С. Э., Харлап С.И. Ультразвуковой пространственный анализ состояния глаза и орбиты // *Российский офтальмол. журн.* – 2008. – Т.1, № 1. – С. 10 – 16.
4. Бэмбер Дж.С. Затухание и поглощение / В кн.: *Ультразвук в медицине. Физические основы применения* / Под ред. К.Хилла, Дж.С. Бэмбера, Г. тер Хаар. Пер. с англ. – М.: Физматлит., 2008. – гл. 4.– С. 100–182.
5. Бэмбер Дж.С. Скорость звука / В кн.: *Ультразвук в медицине. Физические основы применения* / под ред. К.Хилла, Дж.С. Бэмбера, Г. тер Хаар. Пер. с англ. – М.: Физматлит., 2008. – гл. 5. – С. 183–210.
6. Вит В.В. Строение зрительной системы человека: Уч. пос. – Одесса: Астропринт, 2003. – С. 3 – 593.
7. Дикинсоны Р.Дж., Насири Д.К. Отражение и рассеяние / В кн.: *Ультразвук в медицине. Физические основы применения* / Под ред. К.Хилла, Дж.С. Бэмбера, Г. тер Хаар. Пер. с англ. – М.: Физматлит., 2008. – гл. 6.– С. 211–244.
8. Зальцман М. *Анатомія и гистологія человеческого глаза. В нормальному состоянню его развитіе и увяданіе.* Пер. с нем. – М.: Я.Данкинъ и Я.Хомутовъ – 1913. – С. 1 – 204.
9. Лиман С.Дж. Теоретические основы акустики / В кн.: *Ультразвук в медицине. Физические основы применения* / Под ред. К.Хилла, Дж.С. Бэмбера, Г. тер Хаар. Пер. с англ. – М.: Физматлит., 2008. – гл.1.– С. 15–51.
10. Насникова И.Ю., Харлап С.И., Круглова Е.В. *Пространственная ультразвуковая диагностика заболеваний глаза и орбиты: Клиническое руководство.* – М.: РАМН, 2004. – С. 17– 56.
11. Пири А. и Гейнинген Р. *Биохимия глаза.* Пер. с англ. – М.: Медицина, 1968. – С. 7– 301.
12. Роммер П. *Руководство по глазнымъ болезнямъ въ форме клинических лекцій.* Пер. с нем. – СПб.: *Практ. медицина*, 1913. – Т. 1–2, С. 1 – 646.
13. Селиванова И.Н. *Современные представления о функциональной структуре стекловидного тела.* / В. кн.: *Стекловидное тело в клинической офтальмологии: Сборник научн. труд.* / Под ред. А.И. Горбаня – Л.: ЛПМИ, 1979. – С. 5 – 12.
14. Тер Хаар Г.Р. *Биофизика ультразвука* / В кн.: *Ультразвук в медицине. Физические основы применения* / Под ред. К.Хилла, Дж.С. Бэмбера, Г. тер Хаар. Пер. с англ. – М.: Физматлит., 2008. – гл.12. – С. 364–417.
15. Фридман Ф.Е., Гундорова Р.А., Кодзов М.Б. *Ультразвук в офтальмологии.* – М.: Медицина, 1989. – С.254.
16. Фридман Ф.Е. *Ультразвуковая диагностика в офтальмологии* / В кн.: *Клиническая ультразвуковая диагностика.* / Под ред. Ю.М. Никитина – М.: Медицина, 1987. – Т. 2. – С. 217 – 284.
17. Фукс Э. *Учебник глазных болезней.* Пер. с нем. – М.: Гос. мед. изд., 1932. – Т. 1 – 2, С. 1 – 639.
18. Харлап С.И. *Биометрические соотношения и гемодинамические характеристики сосудистой системы глаза и орбиты в норме и при патологии по результатам современных методов ультразвукового клинического пространственного анализа: Дис. ... д-ра мед. наук.* – М., 2003.
19. Харлап С.И., Насникова И.Ю. и др. *Пространственная ультразвуковая визуализация глаза и орбиты* // *Вестн. офтальмол.* – 2005. – Т.121, № 4. – С. 5– 10.
20. Хилл К.Р., *Ультразвуковые изображения и восприятие наблюдателя* / В кн.: *Ультразвук в медицине. Физические основы применения* / Под ред. К.Хилла, Дж.С. Бэмбера, Г. тер Хаар. Пер. с англ. – М.: Физматлит., 2008. – гл. 8.– С. 257–272.
21. Хилл К.Р./ *Методология клинических исследований* / В кн.: *Ультразвук в медицине. Физические основы применения* / Под ред. К.Хилла, Дж.С. Бэмбера, Г. тер Хаар. Пер. с англ. – М.: Физматлит., 2008. – гл. 9.– С. 273–321.
22. Хилл К.Р., *Эхография в широком смысле* / В кн.: *Ультразвук в медицине. Физические основы применения* / Под ред. К.Хилла, Дж.С. Бэмбера, Г. тер Хаар. Пер. с англ. – М.: Физматлит., 2008. – гл. 11. – С. 355–363.
23. Хэм А., Кормак Д. *Гистология.* Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – Т.5 – С. 223 – 256.
24. Эккерсли Дж. *Методы визуализации движущихся структур* / В кн.: *Ультразвук в медицине. Физические основы применения* / Под ред. К.Хилла, Дж.С. Бэмбера, Г. тер Хаар. Пер. с англ. – М.: Физматлит., 2008 г. – гл. 10. – С. 322–356.
25. Atta H.R. *New Applications in Ultrasound Technology* // *Br. J. Ophthalmol.* – 1999. – Vol. 83. – P. 1246–1249.
26. Coleman D.J., Silverman R.H, Lizzi F.L. et al. *Ultrasonography of the Eye and Orbit.* – Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2006. – С. 124.
27. DiBernardo C.W., Greenberg E.F. // *Ophthalmic Ultrasound. A Diagnostic Atlas.* – NY. Stuttgart: Thime, 2007. – С. 176.