

Дискуссионные вопросы механизма хрусталиковой аккомодации и обоснование гидравлического компонента в его реализации

И.М. Корниловский

ФГБУ “Национальный медико-хирургический Центр им. Н.И.Пирогова”, Москва, Россия

РЕФЕРАТ

Цель: Рассмотреть дискуссионные вопросы механизма хрусталиковой аккомодации и обосновать гидравлический компонент в его реализации.

Материалы и методы:

Были проанализированы теории механизма аккомодации, и её оценка по данным ультразвуковой биомикроскопии, магнитно-резонансной томографии и оптической когерентной томографии. Впервые были рассмотрены особенности аккомодационной активации обмена внутриглазной жидкости в закрытой гидростатической системе хрусталика с участием механочувствительных аквапоринов. При обосновании гидравлического компонента в механизме аккомодации хрусталика особый акцент был сделан на быстрое снижение давления в передней и задней камерах глаза при сокращении меридиональной порции цилиарной мышцы.

Результаты:

Анализ различных теорий аккомодации показал, что хрусталиковый механизм её реализации до настоящего времени продолжает обсуждаться. Впервые хрусталик был рассмотрен, как уникальная закрытая гидростатическая система, в которой уровень давления устанавливается посредством ультрафильтрации и диффузии ВГЖ с участием аквапоринов.

Аквапорины формируют ионные каналы в капсуле, клетках кубического эпителия, волокнах хрусталика и являются механочувствительными белками-рецепторами. Открытие и закрытие ионных каналов регулирует работу калий-натриевой помпы, направленный транспорт и обмен внутриглазной жидкости в хрусталике. Гидростатическое равновесие между давлением в хрусталике, передней и задней камерах глаза обеспечивает капсула хрусталика.

Капсулярную сумку хрусталика можно рассматривать, как изогнутой формы диафрагму, которая разделяет две гидростатических системы с различным уровнем давления. Благодаря гидростатическому буферному эффекту уровень ВГД не оказывает влияния на хрусталик, но он реагирует на быстрое его понижение.

Такое понижение давления в передней и задней камерах реализуется посредством натяжения склеральной шпоры меридиональной порцией цилиарной мышцы и срабатывания клапанного механизма склеральный синуса. Чем больше снижение давления, тем более выпуклую форму приобретает хрусталик и усиливает свою рефракцию.

Заключение:

Наличие гидравлического компонента в механизме хрусталиковой аккомодации позволяет понять, как сокращения маленькой цилиарной мышцы может изменить форму и преломляющую силу большого хрусталика.

Ключевые слова: гидравлический компонент хрусталиковой аккомодации, склеральный синус, аквапорины. (crystalline lens, vision, eyeball, ciliary muscle, hydraulic component, lens accommodation, aquaporins, scleral sinus).

Controversial Issues of the Lens Accommodation Mechanism and Substantiation of the Hydraulic Component in Its Implementation

Igor. Kornilovskiy

National Medical and Surgical Center named after N.I. Pirogova, Moscow, Russia

ABSTRACT

ABSTRACT

Purpose: To consider controversial issues of the mechanism of lens accommodation and to justify the hydraulic component in its implementation.

Materials and Methods: Theories of the mechanism of accommodation and its assessment according to ultrasound biomicroscopy, magnetic resonance imaging and optical coherence tomography were analyzed. For the first time, the features of accommodative activation of intraocular fluid exchange in the closed hydrostatic system of the lens with the participation of mechanosensitive aquaporins were considered. When substantiating the hydraulic component in the lens accommodation mechanism, special emphasis was placed on the rapid decrease in pressure in the anterior and posterior chambers of the eye during contraction of the meridional portion of the ciliary muscle.

Results: Analysis of various theories of accommodation has shown that the lens mechanism of its implementation continues to be discussed to this day. For the first time, the lens was considered as a unique closed hydrostatic system in which the pressure level is established through ultrafiltration and diffusion of intraocular fluid with the participation of aquaporins. Aquaporins form ion channels in the capsule, cuboidal epithelial cells, lens fibers and are mechanosensitive receptor proteins. The opening and closing of ion channels regulates the potassium-sodium pump, directed transport and exchange of intraocular fluid in the lens. The hydrostatic balance between the pressure in the lens and the anterior and posterior chambers of the eye is ensured by the lens capsule. The capsular bag of the lens can be considered as a curved diaphragm that separates two hydrostatic systems with different levels of pressure. Due to the hydrostatic buffering effect, the IOP level does not affect the lens, but it responds to a rapid decrease. This decrease in pressure in the anterior and posterior chambers is realized through the tension of the scleral spur by the meridional portion of the ciliary muscle and the activation of the valve mechanism of the scleral sinus. The greater the decrease in pressure, the more convex the lens takes on and increases its refraction.

Conclusion: The presence of a hydraulic component in the mechanism of lens accommodation allows us to understand how the contraction of the small ciliary muscle can change the shape and refractive power of the large lens.

Key words: hydraulic component of lens accommodation, iridocyclolenticular complex, scleral sinus, aquaporins.

Накопленные новые данные об аккомодации глаза человека указывают на участие в её реализации всего иридоциклохрусталикового комплекса, стекловидного тела, экстраокулярных мышц и гидродинамических колебаний в глазу [1-6]. При этом ведущая роль отводится хрусталиковой аккомодации, механизм которой до настоящего времени продолжают дискутироваться среди офтальмологов. Прежде всего, это касается вопроса о том, какой сильной должна быть маленькая цилиарная мышца, чтобы через

натяжение и расслабление Цинновых связок вызывать изменения формы и преломляющей силы столь объёмного хрусталика. Не менее спорным является вопрос, почему в покое аккомодации цилиарная мышца расслаблена, а Цинновые связки натянуты. Противоречивым является положение, согласно которому Цинновые связки при сокращении цилиарной мышцы расслабляются, не смотря на то, что уменьшается диаметр хрусталика. Наконец, требует объяснения преимущественное изменение кривизны передней поверхности хрусталика и достаточность эластичных свойств его капсулы для изменения формы хрусталика при аккомодации.

Все вышеперечисленные вопросы нуждаются в обсуждении, а сам механизм хрусталиковой аккомодации в уточнении.

Цель: Рассмотреть дискуссионные вопросы механизма хрусталиковой аккомодации и обосновать гидравлический компонент в его реализации.

Материалы и методы. Были проанализированы теории аккомодации и современные данные её оценки по данным ультразвуковой биомикроскопии, магнитно-резонансной томографии и оптической когерентной томографии. При обосновании гидравлического компонента в механизме хрусталиковой аккомодации особый акцент был сделан на особенности закрытой гидростатической системы хрусталика, склеральный синус, обмен и направленный транспорт ВГЖ в хрусталике с участием механочувствительных аквапоринов. Кроме того, была рассмотрена новая концепция энергосберегающей работы аккомодации с учётом современных представлений о роли иридоциклохрусталикового комплекса, склерального синуса, экстраокулярных мышц и стекловидного тела в гидро- и гемодинамических сдвигах при ответе на аккомодационный стимул.

Результаты и обсуждение. Исследования различных авторов по оценке изменений формы хрусталика при аккомодации выявили увеличение его толщины и уменьшение экваториального диаметра. Такие изменения были подтверждены данными ультразвуковой биомикроскопии, магнитно-резонансной томографии (Рис.1) и оптической когерентной томографии. При напряжении аккомодации профиль передней поверхности хрусталика становился более крутым и уменьшалась глубина передней камеры. При этом отмечались лишь незначительные изменения профиля задней поверхности хрусталика, глубины стекловидной камеры и осевой длины глаза [7-12].

Анализ различных теорий аккомодации показал, что хрусталиковый механизм её реализации до настоящего времени продолжает обсуждаться офтальмологами во всём мире [2-6]. Основное положение теории Гельмгольца о том, что в покое аккомодации цилиарная мышца расслаблена, а Цинновые связки натянуты, входит в противоречие с физиологией, когда при сокращении мышцы происходит натяжение связки [2]. Согласно современным

данным хрусталиковые связки не имеет непосредственного прикрепления ни к одной из порций цилиарной мышцы, а конечной точкой их фиксации являются передние кортикальные слои стекловидного тела. Достаточно отметить, что самая мощная и длинная меридиональная порция цилиарной мышцы одним концом прикрепление в области склеральной шпоры и корнеосклеральной трабекулы, а второй её конец вплетается в хориоидею [1-3]. Вот почему остаётся дискуссионным вопрос, как маленькая цилиарная мышца, изменяет форму и преломляющую силу большого хрусталика. Трудно согласиться с изменением формы хрусталика вследствие расслабления Цинновых связок, поскольку при аккомодации уменьшается экваториальный диаметр хрусталика [2]. С учётом изложенного правомерно говорить о том, что Цинновые связки выполняют роль поддерживающего аппарата. Это обеспечивает стабильное положение хрусталика при аккомодации и позволяет избежать факодонеза.

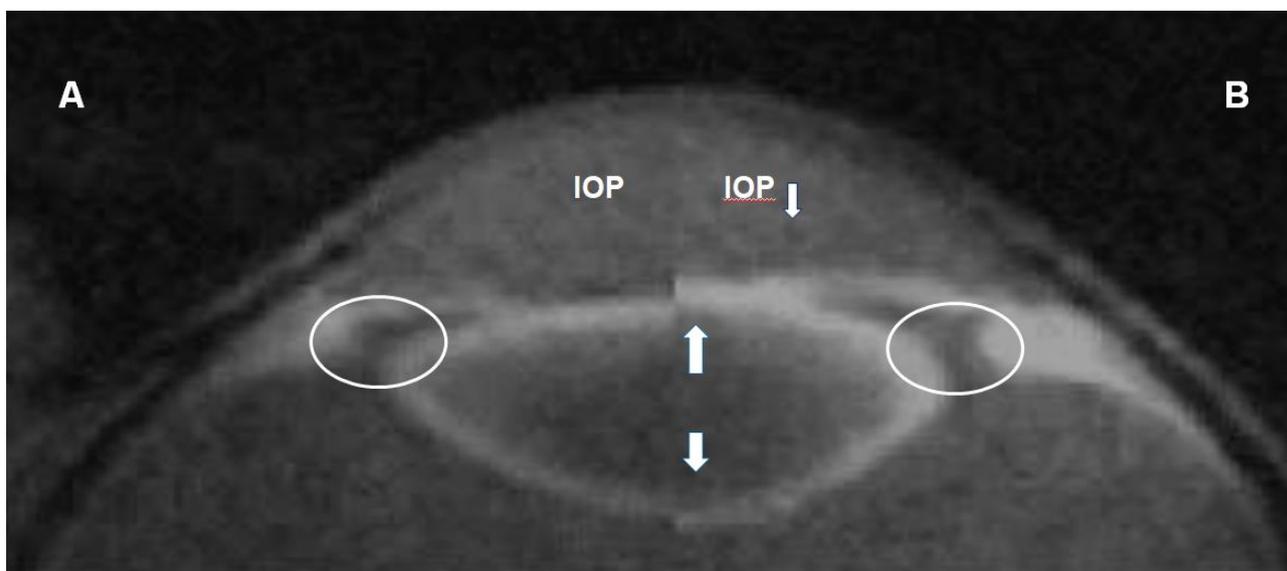


Рис.1. Объёмные соотношения между глубиной передней камеры, величиной цилиарной мышцы и хрусталиком в покое (А), при напряжении аккомодации и быстром снижении ВГД (В) в переднем отделе глаза (по данным магнитно-резонансной томографии).

Не представляется возможным объяснить изменение формы хрусталика при аккомодации только эластическими свойствами капсулы и различной степенью её натяжения Цинновыми связками.. На переоценку значимости капсулярной сумки в изменении формы хрусталика указывает тот факт, что по завершению рефрактогенеза эластичность капсулы снижается. На это указывает отсутствие расширения кругового капсулорексиса при удалении прозрачного хрусталика с рефракционной целью у молодых пациентов. Кроме того, при напряжении аккомодации, из-за уменьшения диаметра хрусталика не наблюдается

уменьшения расстояния между экваториальным профилем хрусталика и профилем края цилиарного тела (Рис.1). Это было подтверждено данными магнитно-резонансной томографии, ультразвукового сканирования и оптической когерентной топографии [7-12].

Все вышеперечисленные дискуссионные вопросы хрусталиковой аккомодации указывают на необходимость исследования других механизмов в её реализации.

Новая концепция наличия гидравлического компонента в реализации механизма хрусталиковой аккомодации базируется на особенностях закрытой гидростатической системы хрусталика, транспорте ВГЖ в хрусталике с участием механочувствительных аквапоринов, наличии гидростатического буферного эффекта, срабатывании клапанного механизма работы склерального синуса при сокращениях цилиарной мышцы и быстром снижении давления в передней и задней камерах глаза,

Нами предлагается рассматривать хрусталик, как уникальную закрытую гидростатическую систему в глазу, ограниченную эластичной капсулой. В данной системе необходимый уровень давления обеспечивается активным направленным транспортом ВГЖ. Такой направленный транспорт ВГЖ от передних к задним кортикальным слоям хрусталика и далее в стекловидное тело был доказан экспериментальными исследованиями [13-16]. Особую значимость в транспорте и обмене ВГЖ в глазу занимают механочувствительные аквапорины [17-22] [17-24]. Аквапорины (AQPs) представляют собой класс трансмембранных белков, которые функционируют как водные каналы. Эти водные каналы существуют в 13 известных изоформах (AQP0-AQP12) и действуют для перемещения воды через биологические мембраны посредством осмотически управляемой пассивной диффузии [21]. Аквапорины формируют ионные каналы в капсуле хрусталика, субкапсулярном кубическом эпителии и волокнах хрусталика и избирательно пропускают молекулы воды. (Рис.2). Они очень чувствительны к колебаниям внутриглазного давления, регулирует перенос внутриглазной жидкости и работу калий-натриевой помпы. Особая роль в этом отводится кубическому эпителию в центральной и периферической зонах передней капсулы хрусталика. Данные клетки не обладают митотической активностью и выполняют функцию активного направленного транспорта ВГЖ от передних к задним кортикальным слоям хрусталика. В норме содержание воды в хрусталике колеблется от 60 до 65% и его можно рассматривать, как сложную гидроколлоидную структуру, содержащую водорастворимые белки, представленные α -, β - и γ -кристаллинами. Необходимо отметить, что растворимые цитоплазматические белки кристаллины образуют упорядоченный гель, в котором от уровня гидростатического давления зависит величина рефракционного индекса [23] [25]. Кроме того, в волокнах кортикальных слоёв хрусталика также имеются ионные каналы механочувствительных аквапоринов, которые участвуют в транспорте ВГЖ. Мы

полагаем, что механочувствительные аквапорины срабатывают, как микроклапаны, открывающие, суживающие или закрывающие ионные каналы в хрусталике при определенных величинах колебаний ВГД. В зависимости от характера аккомодационной нагрузки это может поддерживать необходимый уровень внутрихрусталикового давления, влиять на гидроколлоидную структуру, степень уплотнения хрусталиковых волокон, рефракционный индекс и преломляющую силу хрусталика. Такими изменениями в хрусталике может быть объяснено развитие различных аккомодационных расстройств. Согласно данным литературы, представленные аквапоринами ионные каналы способны реагировать на механические напряжения в широком диапазоне внешних механических раздражителей. Ионные каналы имеют форму узкой щели в центре и расширения на противоположных концах. При такой форме ионного канала вода может проникать только в виде тонкой цепочки молекул, соединенных водородными связями. Необходимо отметить, что аквапорины являются разновидностью механочувствительных белков-рецепторов, присутствующих в мембранных структурах и оболочках клеток во всех органах и тканях человека. Впервые они были идентифицированы в 2010 году группой ученых под руководством Ардема Патапутяна, и за их открытие в 2021 году он был удостоен Нобелевской премии по физиологии и медицине.

На наш взгляд, в ионных каналах капсулы, кубического эпителия и волокнах хрусталика механозависимые аквапорины обеспечивают активацию внутрихрусталикового транспорта жидкости, необходимый уровень внутрихрусталикового давления и аккомодационной способности хрусталика. Аквапорины осуществляют быстрый перенос большого количества жидкости и способны проводить 3×10^9 молекул воды в секунду в расчете на каждый мономер [23] [25]. Не исключено, что внутрихрусталиковое давление может даже несколько превышает уровень ВГД, благодаря активной функции транспорта ВГЖ аквапоринами кубического эпителия и пассивной её диффузии через заднюю капсулу, где кубический эпителий отсутствует. В закрытой гидростатической системе хрусталика имеет место направленный ток жидкости от передних к задним кортикальным слоям с последующей её диффузией в ретролентальное пространство через наиболее тонкую в центральной оптической зоне заднюю капсулу хрусталика (Рис.2). Дискуссионным является вопрос относительно участия аквапоринов в направленном транспорте ВГЖ через заднюю капсулу и кортикальные слои хрусталика в центральную ядерную зону (Рис.2), и её отток через экваториальную часть капсулы хрусталика [21]. С таким путём оттока ВГЖ трудно согласиться. Достаточно отметить, что толщина капсулы в экваториальной части в 4-5 раз превышает толщину в центральной зоне задней капсулы. Более того, в экваториальной части имеются более крупные клетки кубического эпителия обладающие митотической

активностью (Рис.2). Как уже отмечалось, направленный поток ВГЖ от передних к задним кортикальным слоям, далее в ретролентальное пространство и стекловидное тело был доказан экспериментальными исследованиями ряда авторов [12-16]. Необходимо отметить, что от ретролентального пространства, ограниченного капсульно-витреальной связкой Вигера, начинается лентико-макулярный канал. В данном канале имеет место направленный

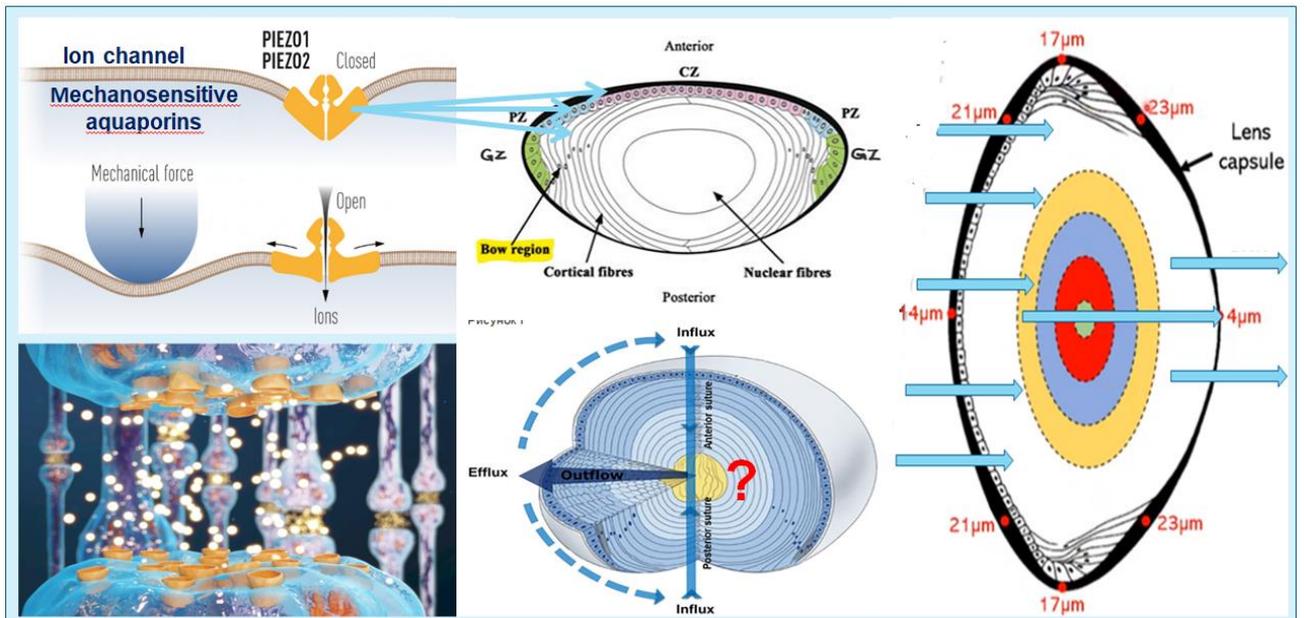


Рис.2. Направленный транспорт внутриглазной жидкости в закрытой гидростатической системе хрусталика с участием механочувствительных аквапоринов.

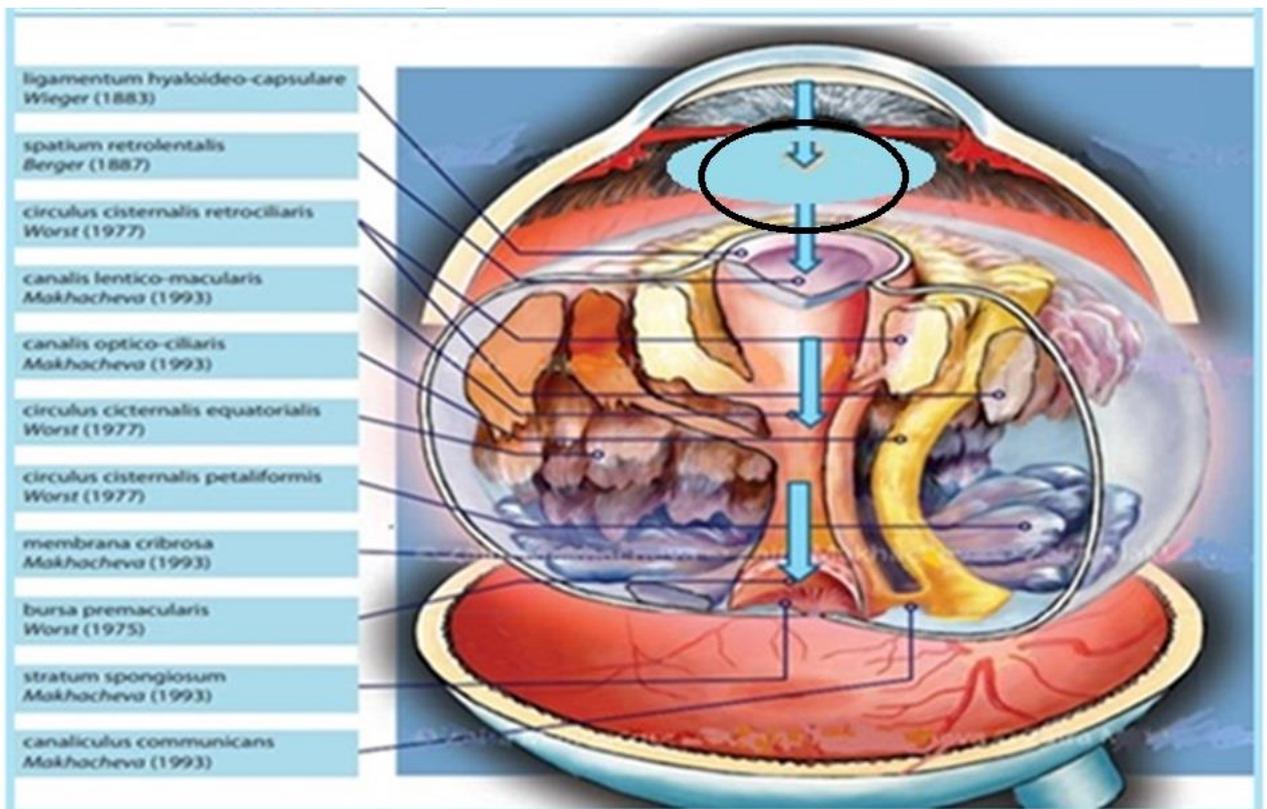


Рис.3 Аккомодационная активация циркуляции внутриглазной жидкости в лентико-макулярном канале стекловидного тела.

поток ВГЖ и её трансретинальный диализ в макуле. Аккомодационная активация циркуляции ВГЖ в лентико-макулярном канале (Рис.3) играет важную роль в функциональной сохранности макулярной области сетчатки. Благодаря высокой концентрации аскорбиновой кислоты во ВГЖ, превышающей таковую в плазме крови в 25-50 раз, обеспечивается инактивация перекисных радикалов, образующихся в ходе фотохимической реакции. При этом направленный трансретинальный диализ ВГЖ в макулярной области сетчатки также осуществляется с участием ретинального аквапорина-4 [24] [26] и по градиенту онкотического давления белков крови в хориоидеи. Не случайно толщина хориоидеи в макулярной области больше, чем в других её отделах.

Давление в закрытой гидростатической системе хрусталика играет чрезвычайно важную роль в реализации гидравлического компонента механизма хрусталиковой аккомодации. Достаточно лишь быстрого снижения давления в передней и задней камерах глаза, чтобы хрусталик приобрёл форму “выпуклого” эллипсоида и увеличил свою преломляющую способность. При этом, основным регулятором быстрых колебаний ВГД выступает склеральный синус (Шлеммов канал). Взаимосвязь цилиарной мышцы с трабекулярным аппаратом и склеральным синусом является не случайной. Имеются данные, согласно которым трабекулы представляют собой соединительнотканые волокна цилиарной

мышцы, роговицы и склеры, растянуты в ходе гониогенеза, а внутренняя стенка склерального синуса (Шлеммова канала) содержит в себе сухожилия цилиарной мышцы [25] [27]. Различная степень открытия и функциональной обратимой блокады склерального синуса при сокращениях и расслаблениях цилиарной мышцы позволяет рассматривать его как уникальный клапанный механизм, обеспечивающий быстрые колебания давления в переднем отделе глаза при аккомодации. При этом снижение давления в передней и задней камерах опережает его повышение в заднем отделе глаза при аккомодации и конвергенции. Именно такие гидродинамические сдвиги в переднем отделе глаза меняют форму хрусталика. Причём более крутым становится профиль передней поверхности хрусталика. Такие изменения можно объяснить гидравлическим законом Лапласа, согласно которому большее внутривнутрихрусталиковое давление испытывает передняя капсула, имеющая больший радиус кривизны. Кроме того, необходимо принять во внимание тот факт, что толщина передней капсулы в центре хрусталика в 3,5 раза больше, чем в центре задней капсулы и их средние значения составляют 14 мкм и 4 мкм соответственно (Рис.2). В связи с этим в передней капсуле исходно отмечается меньшее внутреннее напряжение и большая её растяжимость при быстром снижении давления в передней камере. Кроме того, при аккомодации и конвергенции растяжению задней капсулы противодействует повышение давления в ретролентальном пространстве.

В реализации механизма хрусталиковой аккомодации принимает участие весь иридоциклохрусталиковый комплекс (ИЦХК). В данном комплексе хрусталик можно рассматривать, как своеобразный насос, перекачивающий ВГЖ из переднего отдела глаза в стекловидное тело. Другими словами имеет место аккомодационная активация циркуляции ВГЖ в гидростатической системе стекловидного тела. Всё вышеизложенное позволяет рассматривать ИЦХК, как активатор гидродинамики и гемодинамики в глазу. При сокращениях и расслаблениях цилиарной мышцы усиливается отток ВГЖ из склерального синуса в коллекторные каналы и далее во взаимосвязанных между собой интрасклеральное и эписклеральное венозные сплетения). Кроме того, при сокращениях и расслаблениях цилиарной мышцы активизируется кровоток и секреция ВГЖ в цилиарных отростках (Рис.4). С этих позиций ИЦХК можно назвать сердцем глаза, которое бьётся в определенном ритме при зрительном восприятии окружающего нас мира и предопределяет сохранность всех внутриглазных структур [2]. Нарушение работы ИЦХК при пресбиопии можно рассматривать, как важное патогенетическое звено в развитии такой возрастной патологии, как катаракта, глаукома и макулярная дегенерация сетчатки.

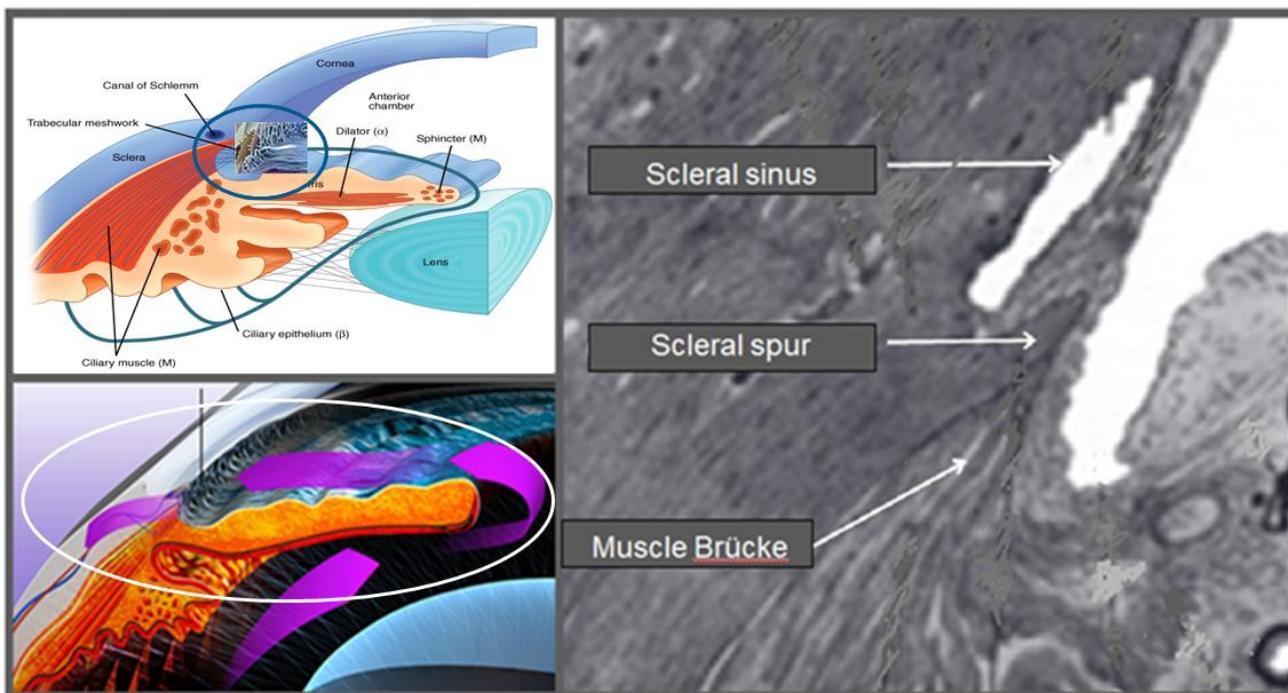


Рис.4. Активация циркуляции ВГЖ в углу передней камеры при аккомодационном сокращении мышцы Брюке, натяжении склеральной шпоры, корнеосклеральной трабекулы, расширении межтрабекулярных пространств и склерального синуса.

Следует отметить, что в механизме аккомодации цилиарная мышца сохраняет свои лидирующие позиции и играет чрезвычайно важную многофункциональную роль. Эта роль заключается в обеспечении различной степени натяжения склеральной шпоры, корнеосклеральной трабекулы, расширении межтрабекулярных щелей и срабатывании клапанного механизма регуляции просвета склерального синуса, перераспределении кровотока в секреторной части цилиарного тела и активации секреции ВГЖ [2]. Необходимо ещё раз сделать акцент на том, что именно за счёт клапанного механизма работы склерального синуса реализуется эффект быстрого снижения ВГД в передней и задней камерах при аккомодации. Под влиянием большего давления в хрусталике изменяется его форма и преломляющая сила. С позиций новой концепции гидравлического компонента в реализации механизма хрусталиковой аккомодации становится понятным, как сокращение небольшой по величине цилиарной мышцы может изменить форму столь объёмного хрусталика.

Формирование аккомодации в глазу человека прошло длительный эволюционный путь, и она стала более совершенной с позиций биомеханики и экономичной с энергетической точки зрения. Исследования различных авторов указывают на то, что способность глаза видеть предметы на различном расстоянии реализуется не только через изменение преломляющей силы хрусталиком. В этом участвует целый комплекс взаимосвязанных между собой структур глаза, которые в конечном итоге и определяют возможность

видеть предметы на различном расстоянии и обеспечивать различную по продолжительности работу на близком расстоянии. Среди всех структурных элементов глаза ведущим в реализации энергосберегающего механизма аккомодации по праву следует считать иридоциклохрусталиковый комплекс (ИЦХК). Данный комплекс играет чрезвычайно важную роль в акте зрительного восприятия, гидродинамике и гемодинамике глаза. Достаточно отметить важную роль диафрагмальной функции радужной оболочки, когда только сужение зрачка может привести к уменьшению оптических аберраций, повысить остроту зрения и увеличить глубину клинического фокуса. При эмметропии такого увеличения глубины фокуса бывает достаточно для рассматривания предметов на расстоянии более метра, без участия хрусталиковой аккомодации. Кроме того, при работе вблизи конвергентные мышечные напряжения и гидравлические сдвиги в стекловидном теле приводят к смещению вперед всего ИЦХК. При недостаточности зрачковой и мышечной компенсации ответа на аккомодационный стимул включается хрусталиковая аккомодация. При этом происходит сокращение различных порций цилиарной мышцы, натяжение склеральной шпоры, расширение межтрабекулярных щелей, склерального синуса и быстрое снижение ВГД в переднем отделе глаза. Это сопровождается изменением формы и увеличением преломляющей силы хрусталика. Во всех случаях натяжение и расслабление цилиарной мышцей склеральной шпоры и корнеосклеральных трабекул вызывает срабатывание клапанного механизма склерального синуса. Именно наличие гидравлического компонента в механизме хрусталиковой аккомодации позволяет с минимальными энергетическими затратами увеличить преломляющую силу хрусталика для работы на близком расстоянии. При напряжениях и расслаблениях различных отделов цилиарной мышцы активизируется увеосклеральный путь оттока и переход ВГЖ из склерального синуса в коллекторные каналцы, которые связаны с поверхностным и глубоким венозными сплетениями (Рис.4). Повышение давления и увеличение скорости перемещения ВГЖ в коллекторных каналцах, в свою очередь, активизирует кровоток в венозной системе глаза. Можно предположить, что именно появление склерального синуса (Шлемова канала) у приматов и человека играет важную роль в формировании эффекта быстрых колебаний ВГД в переднем отрезке глаза и имеет непосредственное отношения не только к тесной взаимосвязи между гидродинамической и гемодинамической системами глаза, но и непосредственно к акту аккомодации. За счёт срабатывания клапанного механизма работы склерального синуса реализуется эффект быстрого снижения ВГД в переднем отрезке глаза, который опережает монокулярное аккомодационное и бинокулярное аккомодационно-конвергентное повышение ВГД с соответствующими гидродинамическими сдвигами в его заднем отделе. По нашему мнению гидродинамические сдвиги в заднем отделе глаза при

аккомодации и конвергенции имеют свой механизм реализации. В данном механизме особую роль играет прямая связь ретролентального пространства с током и обменом ВГЖ в стекловидном теле. При аккомодации имеет место своеобразный гидравлический удар, передающий давление жидкости ретролентального пространства на хрусталик.

Согласно новой концепции для реализации аккомодации хрусталика не требуется значительного напряжения и расслабления Цинновых связок. Фактически в данном случае вся работа цилиарной мышцы сводится только к тому, чтобы лучше натянуть склеральную шпору, расширить межтрабекулярные щели, склеральный синус и активизировать отток ВГЖ. При этом необходимо учесть стимулирующий эффект сокращений цилиарной мышцы в активации кровотока и секреции ВГЖ в цилиарных отростках. Гидравлический компонент в реализации хрусталиковой аккомодации, на наш взгляд, вполне правомерен с энергетической точки зрения и обеспечивает целый ряд других важных функций. Данные функции заключаются в активизации направленного тока ВГЖ и её обмен в хрусталике, стимуляции гидродинамики в каналах стекловидного тела и активации гемодинамики с перераспределением кровотока в тканях переднего и заднего отделов глаза.

В 2010 году нами впервые была предложена энергосберегающая гидрогемодинамическая теория аккомодации [2]. Согласно данной теории в механизме реализации хрусталиковой аккомодации важное место отводилось гидравлическому компоненту и клапанному механизму работы склерального синуса. Однако, трактовка такого механизма хрусталиковой аккомодации оказалась не совсем корректной. Слабым местом в данной теории аккомодации оказалось положение, согласно которому в норме хрусталик под влиянием ВГД уплощён и имеет форму “сжатого” эллипсоида. Именно это и вызвало справедливую критику гидравлического компонента в механизме аккомодации, поскольку не были учтены особенности гидростатического буферного эффекта. Исследования А.П.Нестерова [28] было показано, что все внутриглазные ткани можно рассматривать как диафрагмы, которые разделяют камеры, полости и щелевидные пространства. Таким образом, каждая внутриглазная структура окружена жидкостью, находящейся приблизительно под одинаковым давлением, поэтому не испытывает механического действия всего офтальмотонуса. Как бы высоко он не поднимался, на ткани глаза действует сила, не превышающая 2-3 мм рт. Это явление получило название гидростатического буферного эффекта. Именно благодаря наличию этого эффекта ВГД не может придавать хрусталику форму “сжатого” эллипсоида. Исключение в этом отношении составляет наружная оболочка глаза, испытывающая действие всего офтальмотонуса, и диск зрительного нерва, из-за разности давлений по обе стороны от решетчатой пластинки склеры [28].

Принятие хрусталиком формы “выпуклого” эллипсоида и усиление его преломляющей силы при аккомодации возможно при быстром понижении ВГД в передней и задней камерах глаза. Такой эффект объясняется тем, что хрусталик является закрытой гидростатической системой, в которой уровень давления устанавливается посредством ультрафильтрации и диффузии ВГЖ с участием механочувствительных аквапоринов в капсуле, кубическом эпителии и волокнах хрусталика. Гидростатическое равновесие между давлением в хрусталике, передней и задней камерах глаза обеспечивает капсула хрусталика. В данном случае капсулу хрусталика можно рассматривать, как изогнутой формы диафрагму, которая разделяет две гидростатических системы с различным уровнем давления. Даже, если давление внутри хрусталика соответствует ВГД, то при быстром понижении давления в передней и задней камерах хрусталик принимает более округлую форму. Чем больше эта разница давлений, тем сильнее растягивается капсула и более выпуклую форму приобретает хрусталик. Быстрое снижение давления в передней и задней камерах реализуется посредством срабатывания клапанного механизма склерального синуса при натяжении склеральной шпоры меридиональной порцией цилиарной мышцы. Изложенный механизм полностью соответствует всем положениям гидростатики и эффекту обратимой функциональной блокады Шлеммова канала в глазу, которые были обоснованы фундаментальными исследованиями А.П. Нестеров [28] . Необходимо отметить исследования Oliveira R.H. с соавторами, в которых была выявлена быстрая реакции цилиарной мышцы на аккомодационные импульсы. Динамическая реакция цилиарной мышцы на входные импульсы демонстрировала отчетливую пиковую амплитуду [29].

Всё вышеизложенное указывает на важную роль аккомодации, кубического эпителия и механочувствительных аквапоринов в активном транспорте и обмене ВГЖ в хрусталике. Изложенная новая концепция наличия гидравлического компонента в реализации хрусталиковой аккомодации расширяет наше клиническое понимание энергосберегающего механизма аккомодации в восприятии окружающего нас мира и возможности длительной зрительной работоспособности на близком расстоянии. В этом большую роль играет иридоциклохрусталиковый комплекс и клапанный механизм работы склерального синуса. Именно такой механизм работы аккомодации, выработанный в процессе эволюции, является наиболее адекватным с энергетической точки зрения. Энергосберегающая концепция работы аккомодационного аппарата глаза указывает на важную роль в её реализации диафрагмальной функции зрачка. Кроме того, зрачковая регуляция светового потока и его аккомодационная фокусировка обеспечивают наименьшую световую нагрузку на сетчатку, позволяют достичь наибольшей контрастности изображения и сформировать сильный

аккомодационный стимул. Это подтверждается различной аккомодацией при фотопическом, мезопическом и скотопическом освещении.

Выводы.

1. Хрусталик представляет собой замкнутую гидростатическую систему, в которой необходимый уровень давления обеспечивается за счет активного направленного транспорта внутриглазной жидкости кубическим эпителием от передних к задним слоям коры с ее пассивной диффузией через заднюю капсулу. В этом принимают участие механочувствительные аквапорины, образующие ионные каналы в капсуле, кубовидном эпителии и волокнах хрусталика.

2. При аккомодационном сокращении цилиарной мышцы натягивается склеральная шпора, корнеосклеральная трабекула, расширяются межтрабекулярные пространства, склеральный синус, увеличивается отток ВГЖ и быстро снижается давление в передней и задней камерах, которое опережает его аккомодационно-конвергентное повышение в заднем отделе глаза.

3. Благодаря наличию гидростатического буферного эффекта хрусталик не испытывает внешнего давления, однако при быстром снижении давления в передней и задней камерах глаза хрусталик принимает форму выпуклого эллипсоида и усиливает преломляющую способность.

4. Различная степень открытия и блокады склерального синуса при сокращениях и расслаблениях цилиарной мышцы позволяет рассматривать его, как уникальный клапанный механизм, обеспечивающий быстрые колебания ВГД в переднем отделе глаза.

5. Гидравлический компонент в реализации механизма хрусталиковой аккомодации позволяет по-новому взглянуть на роль цилиарной мышцы, Цинновых связок и склерального синуса в энергосберегающей работе аккомодации и понять, как маленькая цилиарная мышца может изменять форму столь объёмного хрусталика.

Литература.

1. Иомдина Е.Н., Полоз М.В. Биомеханическая модель глаза человека, как основа для изучения его аккомодационной способности. Российский журнал биомеханики. 2010;14(3):7-18.
2. Корниловский И.М. Новая энергосберегающая гидродинамическая теория аккомодации. Рефракционная хирургия и офтальмология. 2010;10, (3):16-22.
3. Страхов В.В., Иомдина Е.Н. Аккомодация: анатомия, физиология, биомеханизмы. Аккомодация. Руководство для врачей под редакцией Л.А.Катаргиной. Изд. "Апрель", Москва, 2012:12-34.
4. Ovenseri-Ogbomo GO, Oduntan OA. Mechanism of accommodation: A review of theoretical propositions. Afr Vision Eye Health. 2015;74(1), Art. #28, 6 pages. <http://dx.doi.org/10.4102/aveh.v74i1.28>

5. Koshits IN, Svetlova OV, Egemberdiev MB, Guseva MG, Makarov FN, et al. Theory: Morphological and functional features of the structure of the Zonula Lens Fibers as a key executive link in the mechanism of the human eye accommodation. *J Clin Res Ophthalmol.* 2020;7(2): 061-074. DOI: <https://dx.doi.org/10.17352/2455-1414.000075>.
6. López-Gil, N. Gullstrand Intracapsular Accommodation Mechanism Revised. *Photonics* 2022; 9:152. <https://doi.org/10.3390/photonics9030152>
7. Strenk SA, Strenk LM, Semmlow JL, DeMarco JK. Magnetic resonance imaging study of the effects of age and accommodation on the human lens cross-sectional area. *Invest Ophthalmol Vis Sci.*,2004 Feb;45(2):539-45. doi:10.1167/iovs.03-0092. PMID: 14744896.
8. Tadahiro Mitsukawa, Yumi Suzuki, Yosuke Momota, Shun Suzuki, Masakazu Yamada Anterior Segment Biometry During Accommodation and Effects of Cycloplegics by Swept-Source Optical Coherence Tomography. *Clinical Ophthalmology* 2020;14:1237-1243 DOI:10.2147/oph.s252474.
9. Li Z, Meng Z, Qu W, Li X, Chang P, Wang D and Zhao Y. The Relationship Between Age and the Morphology of the Crystalline Lens, Ciliary Muscle, Trabecular Meshwork, and Schlemm's Canal: An in vivo Swept-Source Optical Coherence Tomography Study. *Front. Physiol.*, 2021;12:763736. doi: 10.3389/fphys.2021.763736.
10. Wang L, Jin G, Ruan X, Gu X, Chen X, Wang W, Dai Y, Liu Z, Luo L. Changes in crystalline lens parameters during accommodation evaluated using swept source anterior segment optical coherence tomography. *Ann Eye Sci* 2022;7:33. doi: 10.21037/aes-21-70.
11. Rozanova, O.I. Scheimpflug Imaging of the Anterior Eye Segment during Standardized Accommodation Stimulation in Patients with Emmetropia, Myopia and Hypermetropia. *Open Journal of Ophthalmology*, 2023;13:73-82. <https://doi.org/10.4236/ojoph.2023.131008>.
12. Liu, G.; Li, A.; Liu, J.; Zhao, Y.; Zhu, K.; Li, Z.; Lin, Y.; Yan, S.; Lv H.; Wang, S.; et al. Establishment of Personalized Finite Element Model of Crystalline Lens Based on Sweep-Source Optical Coherence Tomography. *Photonics*, 2022; 9: 803. <https://doi.org/10.3390/photonics9110803>.
13. Сычев Г.М., Лазаренко В.В., Степанова Л.В., Сычев А.Г. Направленность транспортных потоков эпителия хрусталика крупного рогатого скота. *Сибирское медицинское обозрение.* 2003;1:29-31.
14. Сычев Г.М., Лазаренко В.В., Сычев А.Г., Степанова Л.В, Марченко И.Ю. Водный обмен хрусталика в окружающих его средах глаза. *Сибирское медицинское обозрение.* 2003; 4:55-57.
15. Степанова Л.В. Марченко И.Ю., Сычев Г.М. Направление транспорта жидкости в хрусталике. *Бюллетень экспериментальной биологии и медицины*, 2005; 39 (1): 57-58.
16. Степанова Л.В. Транспортные функции эпителия хрусталика (биофизические аспекты) Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук Красноярск 2005. 19С.
17. Hamann S. Molecular mechanisms of water transport in the eye. *Int Rev Cytol.* 2002;215:395-431. doi: 10.1016/s0074-7696(02)15016-9. PMID: 11952236.
18. Verkman AS, Ruiz-Ederra J, Levin MH. Functions of aquaporins in the eye. *Prog Retin Eye Res.* 2008 Jul;27(4):420-33. doi: 10.1016/j.preteyeres.2008.04.001. Epub 2008 May 22. PMID: 18501660; PMCID: PMC3319433.
19. Tran TL, Bek T, Holm L, la Cour M, Nielsen S, Prause JU, Rojek A, Hamann S, Heegaard S. Aquaporins 6-12 in the human eye. *Acta Ophthalmol.* 2013 Sep;91(6):557-63. doi: 10.1111/j.1755-3768.2012.02547.x. Epub 2012 Sep 13. PMID: 22974000.
20. Tran TL, Hamann S, Heegaard S. Aquaporins in Eye. *Adv Exp Med Biol.* 2023;1398:203-209, doi: 10.1007/978-981-19-7415-1_14. PMID: 36717496.
21. Schey KL, Gletten RB, O'Neale CVT, Wang Z, Petrova RS, Donaldson PJ. Lens Aquaporins in Health and Disease: Location is Everything!. *Front. Physiol.*, 2022;13:882550. doi: 10.3389/fphys.2022.882550.
22. Gao, J., Sun, X., Moore, L. C., Brink, P. R., White, T. W., and Mathias, R. T. (2013). The Effect

- of Size and Species on Lens Intracellular Hydrostatic Pressure. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.*, 2013;54:83–192. doi:10.1167/iovs.12-10217.
23. Gao, J., Sun, X., White, T. W., Delamere, N. A., and Mathias, R. T. (2015). Feedback Regulation of Intracellular Hydrostatic Pressure in Surface Cells of the Lens. *Biophysical J.*, 2015;1091:830–1839. doi:10.1016/j.bpj.2015.09.018.
24. Goodman MB, Haswell ES, Vásquez V. Mechanosensitive membrane proteins: Usual and unusual suspects in mediating mechanotransduction. *J Gen Physiol.* 2023 Mar 6;155(3): e202213248. doi: 10.1085/jgp.202213248.
25. Королёва И.А., Егоров А.Е. Метаболизм хрусталика: особенности и пути коррекции. *Русский медицинский журнал. Клиническая офтальмология.* 2015;4:191-195.
26. Ueki S, Suzuki Y, Igarashi H. Retinal aquaporin-4 and regulation of water inflow into the vitreous body. *Invest Ophthalmol Vis. Sci.* 2021; 62(2):24. <https://doi.org/10.1167/iovs.62.2.24>
27. Золотарёв А.В. Микрохирургическая анатомия дренажной системы глаза. Самара, 2009: 22-23.
28. Нестеров А. П. Глаукома. – М.: ООО «Медицинское информационное агентство», 2008:360 С.
29. Oliveira RH, Silva MD, Nunes GA, Faria RM, Santos KS, Rosa LL, Rosa MF, Rosa SD. Control engineering investigation of the effects of proliferative diabetic retinopathy on the crystalline lens and ciliary muscle dynamic behavior. *Research on Biomedical Engineering.* 2023 Aug 28:1-4.

Корниловский Игорь Михайлович,

доктор медицинских наук, профессор, академик ЛАН РФ,

профессор кафедры глазных болезней ИУВ

ФГБУ "НМХЦ им. Н.И. Пирогова" Минздрава России

моб. т. +7-910-453-41-12, e-mail: Kornilovsky51@yandex.ru