



DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2018.1.01

УДК 531/534: [57+61]

## О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ УПРУГИЕ СВОЙСТВА КОРНЕОСКЛЕРАЛЬНОЙ ОБОЛОЧКИ ГЛАЗА, ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ЕЕ ИЗМЕНЕННОГО МЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ПЕРВИЧНОЙ ОТКРЫТОУГОЛЬНОЙ ГЛАУКОМЕ

Г.А. Любимов<sup>1</sup>, И.Н. Моисеева<sup>1</sup>, А.А. Штейн<sup>1</sup>,  
Е.Н. Иомдина<sup>2</sup>, А.Ю. Арчаков<sup>2</sup>, О.А. Киселева<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Россия, 119192, Москва, Мичуринский пр., 1, e-mail: stein@imec.msu.ru

<sup>2</sup> Московский научно-исследовательский институт глазных болезней им. Гельмгольца Минздравсоцразвития России, Россия, 105062, Москва, ул. Садовая-Черногрозская, 14/19, e-mail: iomdina@mail.ru

**Аннотация.** Обоснована математическим моделированием возможность использования в офтальмологической практике показателей, характеризующих упругие свойства корнеосклеральной оболочки при первичной открытоугольной глаукоме и базирующихся на применяемых в клинике тонометрических исследованиях. В качестве теоретической основы моделирования используется модель глазного яблока, разработанная авторами ранее. Предложенные механические критерии, коррелирующие с тяжестью заболевания, верифицированы клиническими измерениями с использованием тонометров Маклакова и Шиотца. Результаты проведенного исследования свидетельствуют в пользу современной гипотезы о корреляции между тяжестью первичной открытоугольной глаукомы и степенью отклонения от нормы упругих свойств корнеосклеральной оболочки глаза. Показано, что развитие заболевания сопровождается ростом коэффициента эластоподъема по Шиотцу и падением коэффициента эластоподъема по Маклакову. Наряду с этим, информативным показателем оказалось возрастание отношения этих коэффициентов. Как следует из расчетов авторов, такие изменения соответствуют увеличению склеральной жесткости при более значительном возрастании жесткости роговицы.

**Ключевые слова:** глаз, математические модели, корнеосклеральная оболочка, упругие свойства, внутриглазное давление, эластонометрия, дифференциальная тонометрия, тонометр Шиотца, тонометр Маклакова.

### ВВЕДЕНИЕ

Первичная открытоугольная глаукома – широко распространенное заболевание глаза, приводящее к необратимой утрате зрительных функций, основные диагностические признаки которого – повышенное внутриглазное давление и

---

© Любимов Г.А., Моисеева И.Н., Штейн А.А., Иомдина Е.Н., Арчаков А.Ю., Киселева О.А., 2018

Любимов Григорий Александрович, д.ф.-м.н., профессор, г.н.с. института механики МГУ, Москва

Моисеева Ирина Никитична, к.ф.-м.н., с.н.с. института механики МГУ, Москва

Штейн Александр Александрович, к.ф.-м.н., в.н.с. института механики МГУ, Москва

Иомдина Елена Наумовна, д.б.н., профессор, г.н.с. МНИИ глазных болезней им. Гельмгольца, Москва

Арчаков Ахмед Юсупович, аспирант МНИИ глазных болезней им. Гельмгольца, Москва

Киселева Ольга Александровна, д.м.н., руководитель отдела глаукомы МНИИ глазных болезней им. Гельмгольца, Москва

характерное изменение поля зрения [3]. Однако для уверенной ранней диагностики первичной открытоугольной глаукомы, когда поле зрения еще сохранно, а увеличение внутриглазного давления может наблюдаться непостоянно, эти признаки, как правило, недостаточно информативны. Кроме того, измеряемая при тонометрии величина внутриглазного давления может не соответствовать реальному уровню офтальмотонуса, поскольку на результаты его определения большое влияние оказывают индивидуальные механические характеристики роговицы и корнеосклеральной капсулы в целом [1, 3, 15]. Вызванные этим обстоятельством неточность и ненадежность определения внутриглазного давления снижают достоверность диагностики первичной открытоугольной глаукомы и оценки тяжести глаукомного поражения.

В то же время полученные в последнее время данные говорят не только о влиянии механических характеристик, в частности упругих свойств корнеосклеральной оболочки глаза, на результаты определения внутриглазного давления, но и об их важной роли в патогенезе глаукомы [1, 4, 12–14, 16–18]. Однако существующие методики оценки механических свойств корнеосклеральной капсулы не позволяют точно определять индивидуальные значения параметров роговой и склеральной оболочек, которые необходимы при диагностике и оценке эффективности лечения конкретного пациента с первичной открытоугольной глаукомой [4, 18]. В связи с этим возникает потребность в дополнительных показателях, уточняющих диагностику.

В работе на основе математического моделирования изучается возможность выбора и обоснования таких показателей, базирующихся на применяемых в офтальмологической практике тонометрических исследованиях и коррелирующих с данными о степени заболевания исследуемого глаза. В качестве теоретической основы исследования используется модель глазного яблока, предложенная в работе [9].

### **ПАРАМЕТРЫ, ПОЛУЧАЕМЫЕ ПРИ ЭЛАСТОТОНОМЕТРИИ И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ТОНОМЕТРИИ, И ИХ ЗАВИСИМОСТЬ ОТ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОГОВОЙ И СКЛЕРАЛЬНОЙ ОБОЛОЧЕК ГЛАЗА**

Исследования последних лет подтвердили эффективность методов биомеханики глазного яблока для оценки точности измерения тех или иных параметров существующими диагностическими методами, выяснения физического содержания этих, как правило, эмпирических методов, обоснования путей совершенствования их и связанных с ними приборов и т.д. [7–11].

Успех этих исследований во многом связан с обоснованием относительно простой механической модели глазного яблока и формулировкой системы уравнений, описывающей эту модель [9]. Это дало возможность эффективно исследовать физическую сущность, границы применимости и возможность повышения информативности ряда диагностических методов и процедур, используемых в настоящее время в офтальмологии [7–11].

Для решения многих задач, в том числе связанных с моделированием статической тонометрии, глазное яблоко может быть схематично представлено деформируемой оболочкой, состоящей из роговицы и склеры и распираемой изнутри давлением заключенной в ней жидкости. Данные экспериментов и анализ структуры роговицы, которая при тонометрии подвергается намного большим по сравнению со склерой, и притом неоднородным, деформациям, дают основание предполагать, что она слабо сопротивляется изгибу [2]. Склеральная же область при тонометрии вовлечена в процесс деформирования в основном через перераспределение внутриглазной жидкости. В соответствии с этим в предложенной авторами модели роговица

представлена безмоментной (мягкой) упругой поверхностью, а склеральная область заменяется упругим элементом, откликающимся на изменение давления только изменением объема. Если считать роговицу линейно упругой и по упругим свойствам пространственно однородной и изотропной в тангенциальном направлении, то такая модель характеризуется тремя упругими константами. Когда нагружение не слишком отклоняется от изотропного (а именно так обстоит дело в большинстве задач тонометрии), основных определяющих констант оказывается только две [9].

В данной работе модель глазного яблока [9] будет использована для оценки диагностических возможностей методов эластотонометрии и дифференциальной тонометрии. Эти методы базируются на нагружении глаза с помощью стандартных тонометров. В первом случае это широко используемый в России тонометр Маклакова, а во втором – тонометр Шиотца. Оба метода предполагают нагружение глаза последовательно грузами разного веса. В дальнейшем, если нет необходимости в конкретизации, будем использовать хорошо отражающий суть процесса термин «дифференциальная тонометрия» для обеих этих процедур.

В тонометре Маклакова нагружающее устройство представляет собой широкий штамп с плоским основанием. При опускании такого штампа на роговицу глаза вдоль оси симметрии глазного яблока роговица деформируется, и образуется область контакта штампа и роговицы, по форме близкая к кругу, размер которой зависит от веса штампа.

В тонометре Шиотца роговица нагружается вогнутой стопой весом 11,5 Г с радиусом кривизны основания 15 мм, т.е. приблизительно вдвое большим, чем у нормальной роговицы человека. Через центральное отверстие стопы на роговицу опускается имеющий форму тонкого стержня груз (плунжер) диаметром 3 мм с тем же радиусом кривизны основания, что и стопа.

Измеряемые величины – размер пятна контакта роговицы и штампа в тонометре Маклакова и величина заглубления плунжера по отношению к стопе в тонометре Шиотца. По величинам этих параметров для конкретного испытуемого с помощью эмпирических формул рассчитываются значения внутриглазного давления  $p_i$  в нагруженном глазу (тонометрического), соответствующие разным весам  $G$  тонометра. Механически корректная теория нагружения глаза тонометром Маклакова разработана в [9], а в тонометре Шиотца – в [10, 11].

Расчеты, проведенные с помощью описанной выше математической модели глазного яблока, показывают, что для данного испытуемого, т.е. при фиксированных значениях внутриглазного давления до нагружения (истинного)  $p_0$  и упругих характеристик (жесткостей) роговицы  $E_c$  и склерального сегмента  $E_s$ , зависимость тонометрического давления  $p_i$  от веса груза  $G$  близка к линейной при  $G > G^* \approx 4$  Г (рис. 1).

Таким образом, исключая область очень малых весов  $G < G^*$ , функцию  $p_i = p_i(G, p_0, E_c, E_s)$  можно характеризовать величиной  $\gamma = (p_{i1} - p_{i2}) / (G_1 - G_2)$  (индексы 1, 2 соответствуют двум измерениям с грузами  $G_1$  и  $G_2$  соответственно), зависящей от упругих характеристик оболочки глаза  $E_c, E_s$  и истинного внутриглазного давления  $p_0$ . Эту величину будем далее называть коэффициентом эластоподъема.

Расчетные зависимости коэффициента эластоподъема от склеральной жесткости при нагружении глаза тонометрами Маклакова  $\gamma_{Mak}$  и Шиотца  $\gamma_{Sch}$  представлены на рис. 2. Видно, что и  $\gamma_{Sch}$ , и  $\gamma_{Mak}$  возрастают как с ростом параметра  $E_s$ ,

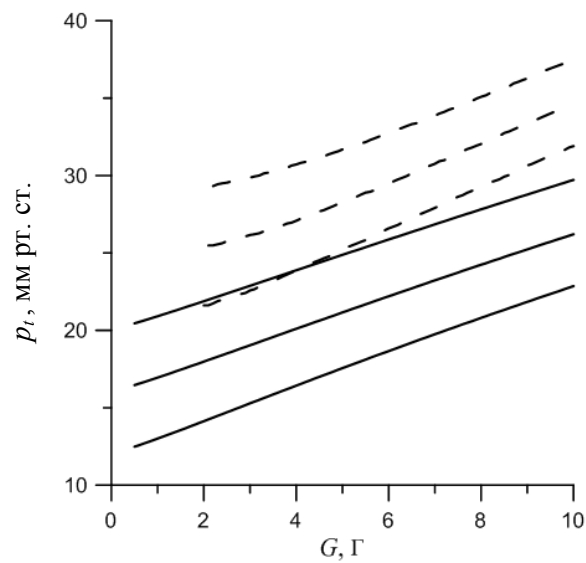


Рис. 1. Зависимости тонометрического давления от веса плунжера в тонометре Шиотца (пунктир) и веса груза в тонометре Маклакова (сплошная линия), рассчитанные для средних значений упругих констант глазного яблока ( $E_c = 0,3$ ,  $E_s = 10$  МПа [9]) при различных значениях истинного давления  $p_0 = 20$  (1), 16 (2), 12 (3) мм рт. ст.

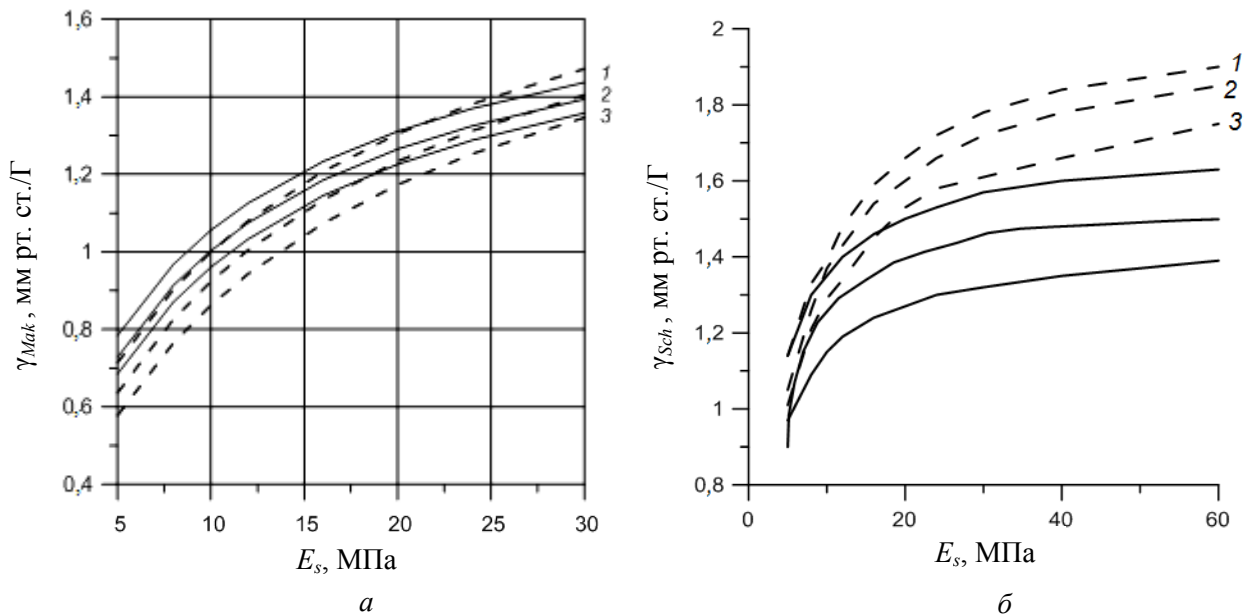


Рис. 2. Зависимость коэффициента эластоподъема от  $E_s$  при  $E_c = 0,3$  (сплошные кривые), 0,6 МПа (пунктир) для тонометров Маклакова (а) и Шиотца (б);  $p_0 = 12$  (1), 16 (2), 20 (3) мм рт. ст.

характеризующего упругие свойства склерального сегмента, так и с убыванием истинного внутриглазного давления  $p_0$ . В то же время возрастание жесткости роговицы  $E_c$  приводит к росту  $\gamma_{Sch}$  (рис. 2), но убыванию  $\gamma_{Mak}$ , которое тем значительнее, чем мягче склеральный сегмент (рис. 3).

В качестве еще одного показателя, характеризующего механическое поведение глазной оболочки, рассмотрим отношение  $K = \gamma_{Sch} / \gamma_{Mak}$  и исследуем зависимость этой величины от механических параметров, присутствующих в модели глаза (рис. 4). Этот показатель убывает с ростом жесткости склерального сегмента и слабо зависит от истинного внутриглазного давления, в особенности при ужесточении роговицы. С другой стороны, при возрастании жесткости роговицы показатель  $K$  растет. Более того, из рис. 4 видно, что при значительном различии роговичных жесткостей (0,3 и 0,6 МПа) практически все значения  $K$  в случае большей  $E_c$  оказываются выше, чем в случае меньшей  $E_c$ , независимо от склеральной жесткости, а в значительной степени и от истинного давления. Убывание функции  $K(E_s)$  связано с более крутым ростом функции  $\gamma_{Mak}(E_s)$ , чем функции  $\gamma_{Sch}(E_s)$  (см. рис. 2, а, б), а возрастание функции  $K(E_c)$  с убыванием функции  $\gamma_{Mak}(E_c)$ , более интенсивным, чем рост функции  $\gamma_{Sch}(E_c)$ .

Существует принципиальная возможность отдельно оценить константы  $E_c$  и  $E_s$ , характеризующие в рамках модели упругие свойства глаза, с помощью измерений, выполненных двумя стандартными тонометрами с разными нагружающими весами [7]. Однако определение этих величин требует специальных расчетов, затруднительных при клиническом обследовании. Накопление клинических данных по оценке диагностического значения этих параметров – дело будущего. Поэтому использование для диагностики рассмотренных выше простых критериев, легко вычисляемых по результатам измерений, но тем не менее адекватно отражающих упругие свойства глазного яблока, весьма перспективно.

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЭЛАСТОПОДЪЕМА, ОПРЕДЕЛЕННЫХ ТОНОМЕТРАМИ МАКЛАКОВА И ШИОТЦА, ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЯЖЕСТИ ПЕРВИЧНОЙ ОТКРЫТОУГОЛЬНОЙ ГЛАУКОМЫ**

До недавнего времени считалось, что основным фактором, влияющим на развитие глаукомы, является внутриглазное давление, и по степени его увеличения в сравнении с нормой (в сочетании с определенными изменениями поля зрения) судили о тяжести заболевания. Однако в последние годы стали появляться исследования (см., например, [4]), в которых развитие глаукомы связывается, в числе других факторов, с изменением физических свойств корнеосклеральной оболочки глаза, в частности, с изменением упругих свойств роговицы и склеры.

Описанные выше параметры эластоподъема, измеряемые последовательно на исследуемом глазу тонометрами Маклакова и Шиотца, и их отношение являются удобными характеристиками оболочки глаза, позволяющими оценить изменение ее упругих характеристик (возможно более удобными, чем сами значения этих характеристик по причине отсутствия на сегодняшний день корректных экспериментальных данных для сравнения). В связи с этим было проведено исследование корреляции этих параметров со степенью развития одного из тяжелых офтальмологических заболеваний – первичной открытоугольной глаукомы.

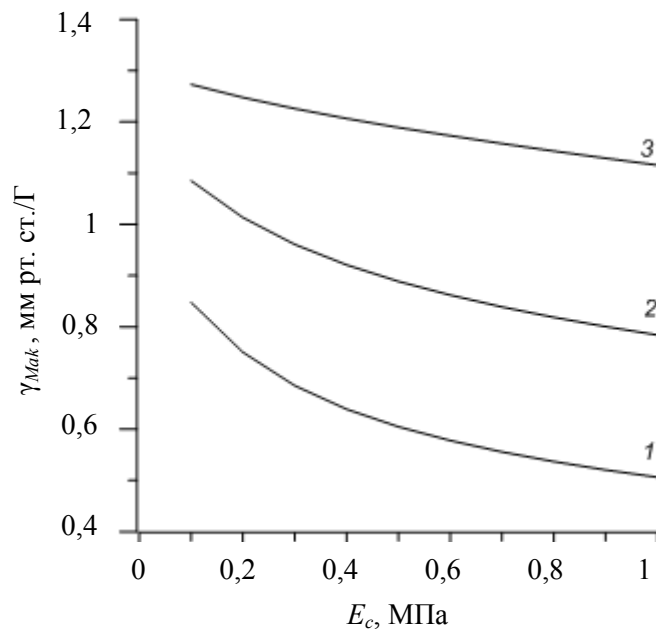


Рис. 3. Зависимость коэффициента эластоподъема для тонометра Маклакова  $\gamma_{Mak}$  от  $E_c$  при различных значениях  $E_s = 5$  (1), 10 (2), 20 (3) МПа и  $p_0 = 20$  мм рт. ст.

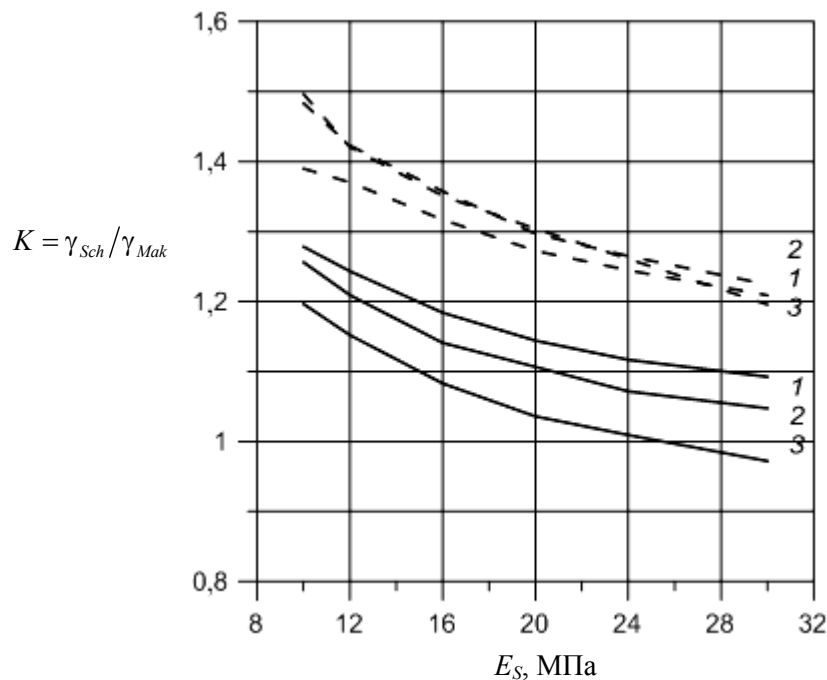


Рис. 4. Зависимость отношения  $K = \gamma_{Sch} / \gamma_{Mak}$  от  $E_s$  при  $E_c = 0,3$  МПа (сплошные кривые), 0,6 МПа (пунктир);  $p_0 = 12$  (1), 16 (2), 20 (3) мм рт. ст.

ТонOMETрические измерения были проведены у 57 человек, в том числе у 49 пациентов в возрасте от 51 до 75 лет (средний возраст – 66 лет) с различными стадиями первичной открытоугольной глаукомы и у 8 пациентов без офтальмопатологии (кроме возрастной катаракты) в возрасте от 61 до 68 лет (средний возраст – 63,7 г.), которые составили группу контроля. Эти измерения использовались

для определения коэффициентов эластоподъема  $\gamma_{Mak}$  и  $\gamma_{Sch}$ , а также отношения  $K = \gamma_{Sch} / \gamma_{Mak}$ .

Для определения  $\gamma_{Mak}$  проводились измерения четырьмя весами (5; 7,5; 10 и 15 Г, рис. 5) и находился тангенс угла наклона прямой, наилучшим образом аппроксимирующей зависимость  $p_t(G)$  (пунктир на рис. 5). Значение параметра  $\gamma_{Sch}$  определялось по заглаблениям  $h$  плунжера тонометра Шиотца и расчетным кривым  $p_t(h)$ , полученным для средних значений упругих констант, соответствующих нормальному глазу [9].

Как показали эти исследования, значения  $\gamma_{Mak}$ , определенные на основе эластотонетрии (дифференциальной тонометрии) по Маклакову, при I стадии первичной открытоугольной глаукомы составляют в среднем  $0,88 \pm 0,20$  мм рт. ст./Г, при II стадии –  $0,80 \pm 0,04$  мм рт. ст./Г, при III стадии –  $0,63 \pm 0,03$  мм рт. ст./Г, в то время как в группе контроля этот показатель в среднем равен  $0,86 \pm 0,07$  мм рт. ст./Г (различие с показателем при III стадии первичной открытоугольной глаукомы достоверно,  $p < 0,05$ ).

Значения другого биомеханического параметра –  $\gamma_{Sch}$ , определяемого по данным дифференциальной тонометрии по Шиотцу, демонстрируют повышение по мере развития первичной открытоугольной глаукомы, составляя при I стадии  $1,65 \pm 0,25$  мм рт. ст./Г, при II стадии –  $1,88 \pm 0,13$  мм рт. ст./Г и  $1,97 \pm 0,14$  мм рт. ст./Г – при III стадии, в то время как в норме этот параметр существенно ниже –  $1,47 \pm 0,10$  мм рт. ст./Г (отличия от II и III стадий первичной открытоугольной глаукомы статистически достоверны,  $p < 0,05$ ) [6].

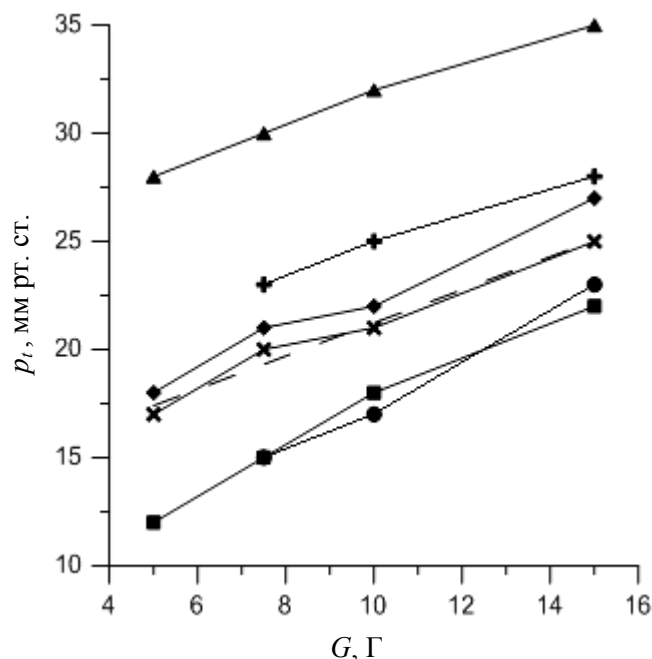


Рис. 5. Зависимости тонометрического давления от веса груза при измерении тонометром Маклакова, полученные в клинике для шести конкретных пациентов при  $G = 5; 7,5; 10; 15$  Г. Пунктирная прямая соответствует наилучшему приближению одной из них

Более значимыми в отношении различий первичной открытоугольной глаукомы с контролем оказались значения предложенного нами коэффициента  $K = \gamma_{Sch} / \gamma_{Mak}$ , характеризующего соотношение упругих свойств роговицы и склеры. Расчет этого коэффициента в норме показал, что он варьируется в пределах от 1,4 до 2,4, составляя в среднем  $1,90 \pm 0,22$ . В то же время при I стадии первичной открытоугольной глаукомы отмечается повышение значений  $K$  в среднем до  $2,15 \pm 0,75$ , при II стадии – до  $2,53 \pm 0,17$ , а при III стадии – до  $3,31 \pm 0,18$ . Отличия данного показателя при II и III стадиях от нормы, а также различия по этому показателю между II и III стадиями достоверны ( $p < 0,05$ ). В то же время статистически недостоверное (в силу большого индивидуального разброса значений) повышение значений  $K$ , наблюдаемое при I стадии первичной открытоугольной глаукомы, свидетельствует о том, что в ряде случаев нарушение биомеханических свойств корнеосклеральной капсулы глаза наблюдается уже на раннем этапе развития первичной открытоугольной глаукомы.

Превышение показателем  $K$  (как индивидуального соотношения жесткости роговицы и склеры) порогового уровня ( $K > 2,4$ ) является фактором риска прогрессирования глаукомы. В этих случаях при дальнейшем наблюдении отмечаются клинические признаки прогрессирования глаукомного процесса, что свидетельствует о диагностической и прогностической значимости этого биомеханического критерия [5].

Анализ полученных данных, основанный на результатах вычислений (предыдущий раздел, рис. 2–4), показывает, что возрастание  $\gamma_{Sch}$  по мере прогрессирования заболевания свидетельствует в первую очередь об увеличении склеральной жесткости, а уменьшение  $\gamma_{Mak}$  – об ужесточении роговицы, в известном смысле «опережающем» рост жесткости склеры. Анализ рис. 4 показывает, что при пропорциональном росте жесткостей обоих сегментов корнеосклеральной оболочки нарастание параметра  $K$  было бы незначительным. Что касается диагностического значения этого параметра, то его можно связать как с тем, что он убывает при возрастании склеральной жесткости, но возрастает при увеличении жесткости роговицы, так и с его относительно слабой зависимостью от истинного давления. Последнее обстоятельство делает этот критерий более отражающим именно упругие свойства глазного яблока, чем отдельно коэффициенты эластоподъема по Шиотцу и Маклакову. Возрастание параметра  $K$  на фоне растущего  $\gamma_{Sch}$  указывает на нарастающий дисбаланс биомеханических свойств роговицы и склеры при развитии заболевания.

Заметим, что в результате вычислений на основе модели (см. рис. 2, б) не удалось получить значения  $\gamma_{Sch}$ , соответствующие максимальным значениям этой величины при клинических измерениях. Одним из возможных объяснений этого факта может быть необходимость учета нелинейной зависимости деформаций роговицы от напряжений. Такая нелинейность может оказаться существенной при значительном увеличении как жесткости роговицы, так и давления в нагруженном тонометром Шиотца глазу (особенно при достаточно большом весе плунжера). Этот вопрос требует дальнейших исследований, однако качественное объяснение наблюдаемых корреляций, которое, собственно, и нужно для их физической интерпретации, при модификации модели не изменится. Следует также принять во внимание, что на конкретные измеренные значения  $\gamma_{Sch}$  может повлиять известная нестабильность измерений при работе с тонометром Шиотца, связанная как с индивидуальными особенностями пациента, так и с навыками оператора, выполняющего эти измерения.

Поскольку до настоящего времени влияние антиглаукомных препаратов на биомеханические свойства роговицы и склеры практически не изучалось и клиническая



значимость коррекции этих свойств для стабилизации глаукомного поражения также не оценивалась, исследования, аналогичные описанным выше, были проведены на глазах, для лечения которых применялась гипотензивная терапия аналогами простагландинов. Эти исследования показали, что в группе глаз со второй и третьей стадиями глаукомы, где применялись инстилляционные аналоги простагландинов, в частности, препарат «Глаупрост», значения параметра  $K$  оказались заметно ниже (ближе к нормальному уровню), чем в отсутствие такой терапии [5]. Таким образом, определение параметра  $K$  может быть полезно не только для оценки тяжести глаукомного поражения и прогноза его дальнейшего течения, но и для определения эффективности медикаментозного лечения первичной открытоугольной глаукомы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен и обоснован расчетами в рамках эффективной математической модели, а также верифицирован данными клинических измерений метод оценки степени развития первичной открытоугольной глаукомы, основанный на измерении величины коэффициента эластоподъема двумя широко используемыми в офтальмологической практике приборами – тонометрами Маклакова и Шиотца.

Результаты проведенного исследования свидетельствуют о правомочности современной гипотезы о корреляции между тяжестью первичной открытоугольной глаукомы и степенью отклонения от нормы упругих свойств корнеосклеральной оболочки глаза. Установлено, что развитие заболевания сопровождается возрастанием коэффициента эластоподъема по Шиотцу и падением коэффициента эластоподъема по Маклакову. Как показали расчеты, эти изменения соответствуют увеличению склеральной жесткости при более значительном (в пропорции к последней) росте жесткости роговицы. Наиболее полно происходящие в корнеосклеральной оболочке глаукомного глаза процессы аккумулируются в величине отношения названных коэффициентов, которая не только растет с развитием заболевания, но и относительно слабо зависит от истинного внутриглазного давления, что особенно важно для клинической практики в силу неточности (зачастую значительной) в его измерении у пациентов с первичной открытоугольной глаукомой. В связи с этим предлагаемый параметр (индивидуальное соотношение жесткости роговицы и склеры) может быть использован в качестве информативного критерия для ранней диагностики, оценки тяжести первичной открытоугольной глаукомы и прогноза его течения, а также эффективности терапии, направленной на коррекцию биомеханических нарушений корнеосклеральной оболочки глаукомного глаза.

Предсказанное в настоящей работе на основе сопоставления расчетов в рамках математической модели с клиническими данными опережающее в сравнении со склеральной областью возрастание жесткости роговицы при первичной открытоугольной глаукоме нуждается в дополнительной проверке, не только в биомеханических, но и в гистологических и биохимических исследованиях.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа поддержана РФФИ (проект № 17-01-00380).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арутюнян Л.Л. Роль биомеханических свойств глаза в определении целевого давления // Глаукома. – 2007. – № 3. – С. 60–67.

2. Бауэр С.М., Любимов Г.А., Товстик П.Е. Математическое моделирование метода Маклакова измерения внутриглазного давления // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2005. – № 1. – С. 24–39.
3. Егоров Е.А., Астахов Ю.С., Шуко А.Г. Национальное руководство по глаукоме. – М., 2008.
4. Иомдина Е.Н., Бауэр С.М., Котляр К.Е. Биомеханика глаза: теоретические аспекты и клинические приложения. – М.: Реальное время, 2015.
5. Иомдина Е.Н., Киселева О.А., Арчаков А.Ю., Моисеева И.Н., Штейн А.А. Влияние аналогов простагландинов на биомеханические показатели корнеосклеральной оболочки глаза при первичной открытоугольной глаукоме // Российский офтальмологический журнал. – 2017. – Т. 10, № 1. – С. 15–19.
6. Иомдина Е.Н., Киселева О.А., Моисеева И.Н., Штейн А.А., Бессмертный А.М., Арчаков А.Ю., Калинина О.М., Василенкова Л.В., Любимов Г.А. Биомеханические критерии оценки риска прогрессирования первичной открытоугольной глаукомы // Современные технологии в медицине. – 2016. – № 4. – С. 59–63.
7. Любимов Г.А., Моисеева И.Н., Штейн А.А. О повышении информативности теста тонометрии // Национальный журнал глаукома. – 2015. – Т. 14, № 4. – С. 58–65.
8. Любимов Г.А., Моисеева И.Н., Штейн А.А., Иомдина Е.Н., Назаренко Л.А. Об оценке величины оттока жидкости из глаза с помощью модифицированного метода тонографии // Российский журнал биомеханики. – 2012. – Т. 16, № 2. – С. 8–20.
9. Моисеева И.Н., Штейн А.А. Анализ зависимости давления – объем для глазного яблока, нагруженного плоским штампом, на основе двухсегментной упругой модели // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2011. – № 5. – С. 3–15.
10. Моисеева И.Н., Штейн А.А. Оценка корректности стандартной методики расчета внутриглазного давления при тонометрии по Шиотцу // Российский журнал биомеханики. – 2015. – Т. 19, № 3. – С. 243–257.
11. Моисеева И.Н., Штейн А.А., Любимов Г.А. Оценка упругих свойств глаза с помощью дифференциальной тонометрии тонометром Шиотца: анализ измерительной процедуры на основе двухкомпонентной математической модели // Биофизика. – 2016. – Т. 61, № 6. – С. 1219–1227.
12. Светикова Л.А., Иомдина Е.Н., Киселева О.А. Биомеханические и биохимические особенности корнеосклеральной капсулы глаза при первичной открытоугольной глаукоме // Российский офтальмологический журнал. – 2013. – № 6 (2). – С. 105–112.
13. Страхов В.В., Алексеев В.В. Патофизиология первичной глаукомы: все или ничего // Глаукома. – 2009. – Т. 2. – С. 40–52.
14. Burgoyne C.F., Downs J.C., Bellezza A.J., Suh J.K., Hart R.T. The optic nerve head as a biomechanical structure: A new paradigm for understanding the role of IOP-related stress and strain in the pathophysiology of glaucomatous optic nerve head damage // Prog. Retin. Eye Res. – 2005. – Vol. 24. – P. 39–73.
15. Costin B.R., Fleming G.P., Weber P.A. Corneal biomechanical properties affect Goldmann applanation tonometry in primary open-angle glaucoma // J. Glaucoma. – 2014. – Vol. 23. – P. 69–74.
16. Coudrillier B., Pijanka J.K., Jefferys J.L., Goel A., Quigley H.A., Boote C., Nguyen T.D. Glaucoma related changes in the mechanical properties and collagen micro-architecture of the human sclera // PLoS One. – 2015. – Vol. 10. – P. 1–21.
17. Quigley H.A. The contribution of the sclera and lamina cribrosa to the pathogenesis of glaucoma: diagnostic and treatment implications // Prog. Brain Res. – 2015. – Vol. 220. – P. 59–86.
18. Quigley H.A., Cone F.E. Development of diagnostic and treatment strategies for glaucoma through understanding and modification of scleral and lamina cribrosa connective tissue // Cell Tissue Res. – 2013 – Vol. 353, № 2. – P. 231–244.

## ON THE POSSIBILITY TO USE PARAMETERS THAT CHARACTERIZE THE ELASTIC PROPERTIES OF THE CORNEOSCLERAL COAT OF THE EYE FOR THE DIAGNOSTICS OF ITS ABNORMAL MECHANICAL STATE AT PRIMARY OPEN-ANGLE GLAUCOMA

G.A. Lyubimov, I.N. Moiseeva, A.A. Stein, E.N. Iomdina,  
A.Yu. Archakov, O.A. Kiseleva (Moscow, Russia)

The possibility to use in ophthalmology practice certain tonometry-based characteristics of the elastic properties of the corneoscleral coat at primary open-angle glaucoma is justified by mathematical modelling. As a theoretical basis for modelling, the model of the eyeball the authors developed earlier is used. The proposed mechanical criteria, which correlate with the severity of the disease, are verified using the Maklakoff and Schiøtz tonometers. The results testify in favor of the contemporary hypothesis about the correlation between the primary open-angle glaucoma severity and the level of abnormality of the elastic properties of the corneoscleral coat of the eye. It is shown that the progress of the disease is accompanied by increase in the Schiøtz pressure difference coefficient and decrease in the similar Maklakoff coefficient. An important additional information is given by the ratio of these coefficients. As follows from calculations, such changes correspond to increase in scleral stiffness simultaneously with a more significant increase in the stiffness of the cornea.

**Key words:** eye, mathematical models, corneoscleral coat, elastic properties, intraocular pressure, elastotonometry, differential tonometry, Schiøtz tonometer, Maklakoff tonometer.

*Получено 21 ноября 2017*