

ELABORATION OF THE CONCEPTION OF THE BIOMECHANICAL MODEL OF THE AQUEOUS OUTFLOW

O.V. Svetlova*, N.V. Zinovieva*, I.S. Krylova, I.N. Koshitz**, B.A. Smolnikov***, E.M. Fyodorova***, K.E. Kotliar****

* Department of Ophthalmology, Saint-Petersburg Medical Academy of Post Graduate Education, Uchebni per, 5, St.-Petersburg, 194354, Russia

** Petercom/MS Consulting group, Cl.corp., Bol'shoi Smoltnsky pr, 4, St.-Petersburg, 193029, Russia

*** Mechanics and Control Processing Department, State Technical University, Politehnicheskaya, 29, St.-Petersburg, 195251, Russia, e-mail: borovkov@compmech.stu.neva.ru

**** Department of Ophthalmology, Munich University of Technology, Ismaninger St., 22, 81675, Munich, Germany, e-mail: koskot3@0101freenet.ru

Abstract: General problems of the biomechanics of the aqueous outflow are considered. Basic drawbacks of existing aqueous theory are stated, ways of creation of the adequate biomechanical model of the outflow regulation are worked out.

Key words: biomechanical model, aqueous, outflow regulation, intraocular pressure, ciliary's body, sclera, "breath of the eye-shells", glaucoma

One of the main tasks of the modern Biomechanics is the analysis, closer definition and development of the nowadays-existing medical conceptions of the inner structures of human organism functioning with the consideration of the latest clinical data. The section of the ophthalmologic biomechanics dealing with the aqueous outflow theory should be doubtless regarded as one of the most urgent tasks.

Although there were some tremendous achievements in a number of minor questions, unfortunately, the world ophthalmology entered the new millennium with the minimal success in the creation of the fundamental aqueous outflow theory. The reason of that is that the available diagnostic equipment allows us to assess only qualitatively some physiological peculiarities of the phenomena, which occur in outflow process. The explanations of the achieved results by different researchers contradict each other very often. Apparently it is needed to conduct an intensive fundamental theoretical research of the outflow biomechanics, which would be done on the junction of the Mechanics, Physiology, Biology, Physics and Chemistry and which would base on the collected clinical data.

The recent 10 years researches allowed us to make a step forward both in the closer definition of the Helmholtz accommodation theory [1-4] and in the finding of the closest connection between accommodation and the outflow [5-14]. Whereas in the accommodation theory there is only one undecided fundamental question (i.e. the question on the relations of the levels of the ciliary's muscle innervations from the side of the parasympathic nerve system (close-distance accommodation) and the sympathetic nerve system (far-distance accommodation)), in the outflow theory we can observe a deep crisis [15-20].

To overcome it we suggest the modern conception of the biomechanical model of the aqueous outflow, which is the goal of the given research.

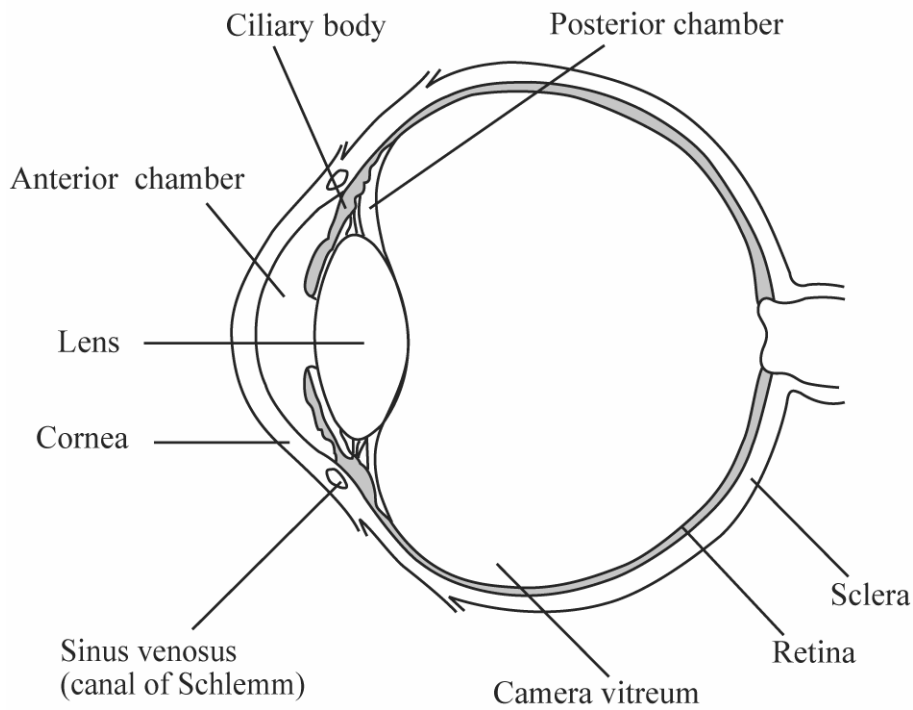


Fig. 1. An eyeball.

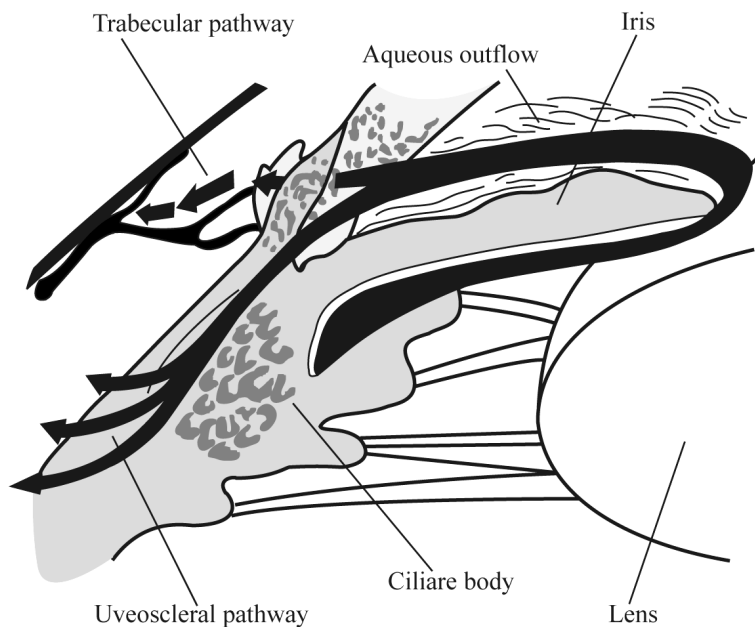


Fig. 2. Normal outflow of aqueous humour: (a) trabecular (conventional) route; (b) uveoscleral (unconventional) route; (c) through the iris.

According to the outflow theory existing in the ophthalmology “an eyeball may be considered as a spherical reservoir filled with fluid non-constricting content, and intraocular pressure is stipulated by the action of the elastic forces, which occur in the outer cover of the eye, when it stretches” [21, p.7].

The main postulates of the existing outflow theory are:

- “in the eye there is an unbroken movement of the aqueous, which is produced by the ciliary’s body (Fig. 1) and flows finally into the episcleral veins through a complicated drainage system” [21, pp.8-9];
- “the pressure in the posterior chamber of the eyeball is a bit higher than in the front section” [21, p.117].

Let us consider these two postulates of the outflow theory now accepted in ophthalmology. Normal outflow of aqueous humour is shown in Fig. 2. Let us start with the second postulate. The posterior and anterior chambers of the eyeball are the communicating vessels, the pressure in them according to the hydraulic laws is the same. Pressure in these chambers is different only in case of the closed angle glaucoma, when the lens blocks the pupil and normal communication between these eyes chambers stops. One can then observe “standing” of the iris. Strictly saying, we need to consider some resistance to aqueous flow from the posterior chamber to the anterior one of the eye, which is normally stipulated by the more or less degree of the attachment of the iris to the front surface of the lens capsule. However, such resistance is too weak for the outflow, otherwise because of the pressure differences we could constantly notice “standing” of the iris, thin as a petal. That is why we may disregard this component in the general resistance to the outflow. We should regard as false the modern idea that the outflow occurs due to the difference in the pressures in the posterior and anterior chambers. And although, how it was mentioned before, when the task was first stated, the fact of the elasto-plastic deformation of the sclera was considered, its importance in the outflow process was not discovered and was overlooked in the outflow theory.

Now the first postulate of the outflow theory is assessed. We can accept only partially the hypothesis of the continuous aqueous flow in the eye. Let us explain this. In order for the normal processes of the nourishment of the intraocular structures it is necessary:

- in the course of life of a person to pump actively the constant minute volume of the aqueous through the inner eye cavities in order to maintain metabolic processes in those intraocular structures, which are mostly nourished by the chemical substances delivered with the help of aqueous;
- in order to maintain metabolic processes in the eye aqueous should be produced continuously no less than a certain minute level by the outgrowths of the ciliary body;
- certain time is needed in order to fulfil convective exchange of warmer “newly born” aqueous with the colder aqueous, “worked out” as a result of the metabolism in the inner structures of the eye. For that either the outflow should occur with a delay or we have to admit that the lower portions of the ciliary muscle should be more developed and should work independently, what is not observed in the reality.

Whereas the accepted in ophthalmology hypothesis about the necessity of the continuous aqueous production by the branches of the ciliary’s body raises no doubts, the hypothesis about the continuous aqueous outflow needs some correction.

If the outflow is continuous, then the part of the produced (i.e. warmer and lighter) aqueous will be driven in the upper part of the sinus venosus (Schlemm canal) of the drainage system immediately taking away necessary nourishing substances. This idea is proved by the clinical observations: glaucoma surgery – perforating sinusotrabeculectomy at 12 o'clock (in terms of mechanics – perforating hole in the upper segment of the inner wall of the Schlemm’s canal) – necessarily brings to the development of cataracts (i.e. lens opacity because of the possible violation of the metabolism of its structures).

That is why in the healthy eye the newly came aqueous should be delayed for a certain time so that it could penetrate different parts of the eye by convection way and so that metabolic process could run. At the same time the main release valve-trabecular meshwork should be closed. Since intraocular structures are incompressible, any aqueous “release” in the

eye cavity should lead at this moment to the increase of the intraocular pressure (IOP) and, naturally, to the adequate increase of the inner volume of the sclera.

Let us note one more important thing. If the sclera has completely lost its elasto-plastic properties, i.e. became totally tough, then any little aqueous volume removal would immediately cause IOP decrease to the level, close to the pressure level in the episcleral veins. This happens, because intraocular structures (excluding the chorioid, of course) are incompressible in general. There will be no needed pressure overfall, the outflow will stop.

Hence, there should be another mechanism, which ensures physiologically with not only the constant IOP level, but also delay and following removal of the aqueous, “worked out” in the metabolic process. Such executive mechanism is most probably executed by the sclera. Its elasto-plastic properties are as though created to run the peculiar mechanism of the “sclera breath” [22].

This executing mechanism works the following way (Fig. 3). When the “trabecular valve” is closed in the process of aqueous production, because the intraocular structures can not be compressed, the sclera should expand and accept the minimal aqueous volume inside the eye. This volume is needed for the normal metabolic processes and is called “meta-volume”. Then due to the work of the elastic sclera forces the “meta-volume” will be “pushed” out of the eye when the “trabecular valve” is open (the IOP should be constant!). At this moment the sclera works as a pump, which accepts inside aqueous and pushes it out. The possible range of this “sclera breath” mechanism should be found out during special clinical research.

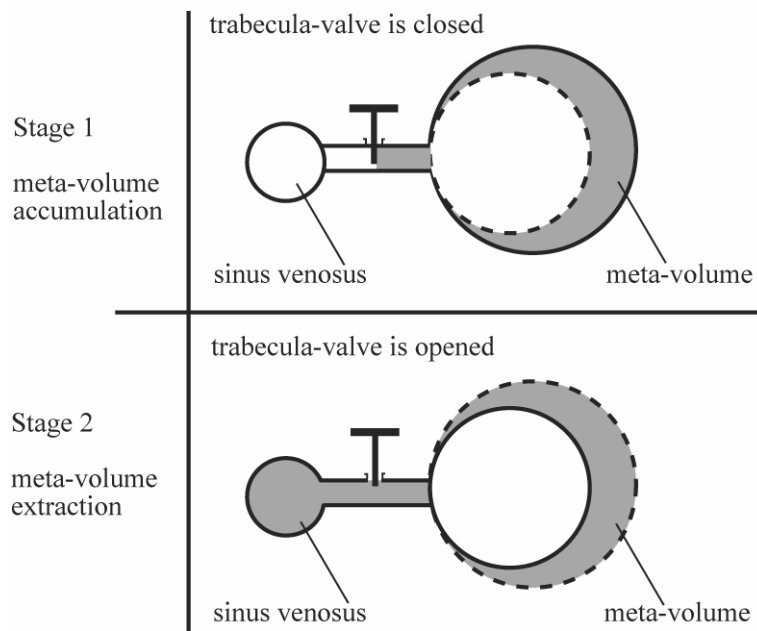


Fig. 3. The "sclera breath".

Such executive mechanism of the outflow ensuring definitely exists because the aging of the sclera and the loss of its elastic properties lead to intra-ocular pressure disorders turning then in the number of cases into the open-angle glaucoma (OAG). Clinical proof of the fact that the aging of the eye shells which we predicted is the main cause of the OAG pathogenesis [23-25] is obtained as a result of the thorough analyses of the possible OAG causes by Samara ophthalmologists from the long term clinical observations [26].

So, we come to the conclusion that the peculiar response mechanism of the "breath of the eye shells" (BOS) should necessarily exist. With the help of such mechanism the eye can

accept inside the aqueous volume, which is needed for the normal metabolic process and after a while the eye can actively remove the worked out aqueous through the already open "Trabecular valve" and, partially, through the uveoscleral way.

However, the aging sclera and other eye shells significantly lose their elasticity. That is why when a person reaches the presbyopic and involution period (after 45 years old) in order to stretch the sclera and other eye shells to the same value as earlier, it will be necessary to realise the BOS process at the higher IOP level.

This conclusion leads to a very important consequence: for the normal metabolic processes the natural IOP level should be increased even in healthy eyes when the sclera and other eye shells age. This IOP age increase in healthy eyes is proved by the clinical observations [27, 28].

Finally, let us notice that the suggested principles of the construction of the biomechanical outflow model are based on the analyses of the long-term clinical observations. These principles allow us to come closely to the construction of the adequate mathematical model of the aqueous outflow dynamics for the elaboration of the new effective methods of treatment and prophylactics of the eye diseases.

References

1. KOTLIAR K.E., SVETLOVA O.V., SKOBLIKOV A.S., SMOLNIKOV B.A. Biomechanical Modelling of the Accommodative System based on some Contemporale Conceptions of Lens Supporting Apparatus Functioning. **Vision Science and Its Applications**, OSA, Santa Fe, 1999, p.157-160.
2. СВЕТЛОВА О.В, КОШИЦ И.Н. КОТЛЯР К.Е. Биомеханическое уточнение теории аккомодации Гельмгольца по результатам исследований поддерживающего аппарата хрусталика. В кн.: Тезисы докладов V Всероссийской конференции по биомеханике «Биомеханика 2000», Нижний Новгород, 2000, с.92 (in Russian).
3. СВЕТЛОВА О.В., КОШИЦ И.Н. Современные биомеханические представления о теории аккомодации Гельмгольца. В Сб.: **Биомеханика глаза**, МНИИ ГБ им. Гельмгольца, М., 2001, с.142-160.
4. КОШИЦ И.Н., СВЕТЛОВА О.В., ЯНДИЕВ Я.И. Уточнение теории аккомодации Гельмгольца по результатам современных исследований поддерживающего аппарата хрусталика. В сб.: **Вопросы офтальмологии**, Красноярск, 2001, с.160 (in Russian).
5. КОТЛЯР К.Е., ВОЛКОВ В.В., СВЕТЛОВА О.В., СМОЛЬНИКОВ Б.А. Биомеханическая модель взаимодействия аккомодационной и дренажной регуляторных систем глазного яблока человека. В сб.: Тезисы докладов «Всероссийской научной конференции «Биомеханика-96», Том 2, Нижний Новгород, 1996, с.101-102 (in Russian).
6. КОТЛЯР К.Е., СВЕТЛОВА О.В., КОШИЦ И.Н. Биомеханическое обоснование разработки современных методов лечения открытоугольной глаукомы. В сб.: Материалы научно-технической конференции «Фундаментальные исследования в технических университетах», СПб., 1997, с.278-279 (in Russian).
7. ВОЛКОВ В.В., СВЕТЛОВА О.В., КОШИЦ И.Н., КОТЛЯР К.Е., СМОЛЬНИКОВ Б.А. Биомеханические особенности взаимодействия аккомодационной и дренажной регуляторных систем глаза в норме и при контузионном подвывихе хрусталика. **Вестник офтальмологии**, 113(3): 5-7, 1997 (in Russian).
8. КОТЛЯР К.Е., СВЕТЛОВА О.В., СМОЛЬНИКОВ Б.А. Биомеханическая взаимосвязь систем управления аккомодацией и регуляцией внутриглазного давления. Труды СПб ГТУ «Механика и процессы управления», Изд. СПб ГТУ, 1997, с.85-88 (in Russian).
9. КОТЛЯР К.Е. Разработка и анализ математических моделей независимого и связанного функционирования дренажной и аккомодационной регуляторных систем человеческого глаза. Автореферат дисс. канд. техн. наук, СПб ГТУ, 1998, 24 с (in Russian).
10. STRANOV V.V., ALEXEEV V.V., REMIZOV M.S. Biomechanical and hydrodynamic aspects of accommodative eye hypertension. **Experimental eye research**, vol.67, Supplement 1, Paris, 1998, A.219, p.69.
11. KOTLIAR K.E., SVETLOVA O.V., KOSHITZ I.N., VOLKOV V.V. The Biomechanical interaction of the accommodative and productive regulatory systems of an eye. **Experimental eye research**, vol. 67, Supplement 1, Paris, 1998, A.222, p.69.

12. СВЕТЛОВА О.В., КОШИЦ И.Н. Биомеханические аспекты профилактики индивидуальных расстройств офтальмотонуса. В Сб.: **Биомеханика глаза**, МНИИ ГБ им. Гельмгольца, М., 2001, с.65-79 (in Russian).
13. СВЕТЛОВА О.В. Биомеханические особенности взаимодействия основных путей оттока внутриглазной жидкости в норме и при открытоугольной глаукоме. В Сб.: **Биомеханика глаза**, МНИИ ГБ им. Гельмгольца, М., 2001. с.95-107 (in Russian).
14. СВЕТЛОВА О.В., ВОЛКОВ В.В., КОТЛЯР К.Е., КУГЛЕЕВ А.А., СМОЛЬНИКОВ Б.А. Об особенностях функционирования некоторых внутриглазных систем при контузионном смещении хрусталика, вызванном различными типами ушиба глазницы. В кн.: **Актуальные проблемы офтальмологии**, Вологда, 1997, с.32-36 (in Russian).
15. КОТЛЯР К.Е., ВОЛКОВ В.В., СВЕТЛОВА О.В., СМОЛЬНИКОВ Б.А., КОШИЦ И.Н.. Биомеханические модели регуляции оттока внутриглазной жидкости через дренажную систему. В кн.: Тезисы докладов IV всероссийской конф. по биомеханике «Биомеханика – 98», Нижний Новгород, 1998, с.63 (in Russian).
16. СКОБЛИКОВ А.С., СВЕТЛОВА О.В., КОШИЦ И.Н., СМОЛЬНИКОВ Б.А. Разработка биомеханической модели общей системы управления оттоком внутриглазной жидкости. В сб.: Белорусский конгресс по теоретической и прикладной механике «Механика-99», Минск, 1999, с.365-366 (in Russian).
17. SVETLOVA O.V., KOSHITZ I.N., RODZEVICH G.V. Eye membranes oldness, may be the main point in patho-genesis of open angled glaucoma. Abstract of papers presented at the XIV ICER, Santa-Fe, OSA, 2000, s.51, p.168.
18. СВЕТЛОВА О.В., КОШИЦ И.Н., ЯФАИ Ю.Р. Биомеханическое взаимодействие трабекулярного и увеального путей оттока при начальной стадии открытоугольной глаукомы. В сб.: **Вопросы офтальмологии**, Красноярск, 2001, с.83-84 (in Russian).
19. СВЕТЛОВА О.В. Биомеханизм регуляции увеосклерального оттока в глазу человека. В сб.: **Офтальмология на рубеже веков**, ВМА, СПб., 2001, с.207-208 (in Russian).
20. СВЕТЛОВА О.В., КОШИЦ И.Н. К вопросу об адекватной модели механизма оттока внутриглазной жидкости. В Сб.: **Офтальмология на рубеже веков**, ВМА, СПб., 2001, с.208-209 (in Russian).
21. НЕСТЕРОВ А.П., БУНИН А.Я., КАЦНЕЛЬСОН Л.А. **Внутриглазное давление**. Москва, Наука, 1974 (in Russian).
22. ИОМДИНА Е.Н. Биомеханика склеральной оболочки глаза при миопии: диагностика нарушений и их экспериментальная коррекция. Автореферат дисс. докт. биол. наук, МНИИ ГБ им. Гельмгольца, М., 2000, 48с (in Russian).
23. KOTLIAR K.E., SVETLOVA O.V., KOSHITZ I.N. Some Peculiarities in Functioning of the Biomechanical Model of Interactions between the Drainage and Accommodation Regulatory Systems of the Eye. Third World Congress of Biomechanics, Abstracts, Sapporo, 1998, p.297.
24. SVETLOVA O.V., KOSHITZ I.V., SKOBLIKOV A.S. Biomechanical aspects of primary open angle glaucoma, etiology and pathogenesis. International Conference «Glaucoma and Pseudoexfoliation Syndrome», Abstract, Pulawy, Poland, 1999, p.43.
25. СВЕТЛОВА О.В., КОШИЦ И.Н. Старение оболочек глаза – возможное ключевое звено в патогенезе открытоугольной глаукомы. В Сб.: Тезисы докладов VII съезда офтальмологов России, часть 1, М., 2000, с.193 (in Russian).
26. ЗАТУЛИНА Н.И., ПАНОРМОВА Н.В., СЕННОВА Л.Г. Концепция патогенеза первичной открытоугольной глаукомы. В Сб.: Тезисы докладов VII съезда офтальмологов России, часть 1, М., 2000, с.131 (in Russian).
27. ПАНКОВ О.В. Возрастные диагностические критерии гидродинамических показателей. В сб.: **Новое в диагностике и лечении глаукомы**, МНИИ ГБ им. Гельмгольца, М., 1976, с. 36-37 (in Russian).
28. КУНИН В.Д. Офтальмодинамография в изучении гемодинамики глаз у здоровых лиц в зависимости от возраста и уровня артериального давления. **Вестник офтальмологии**, 116(6): 33-35, 2000 (in Russian).

ПРОРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ БИОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОТТОКА ВНУТРИГЛАЗНОЙ ЖИДКОСТИ

О.В. Светлова, Н.В.Зиновьева, И.С.Крылова, И.Н.Кошиц, Б.А. Смольников, Е.М. Федорова (Санкт-Петербург, Россия), К.Е.Котляр (Мюнхен, Германия)

Биомеханический анализ существующей в настоящий момент в офтальмологии теории оттока показал явную необходимость её корректировки из-за неполного соответствия ряда принятых в ней положений законам механики.

Обобщение данных многолетних клинических наблюдений в различных разделах офтальмологии позволило авторам сформулировать новые взаимосвязанные гипотезы для построения адекватной математической модели динамики оттока внутриглазной жидкости (ВГЖ) и найти в результате исследований основные физиологические условия, необходимые для полноценного осуществления процессов метаболизма внутриглазных структур. Это позволило концептуально оформить новую теорию оттока, согласно которой одним из главных исполнительных механизмов является упругопластическая деформация склеры и других оболочек глаза. С помощью такого механизма глаз может принять внутрь требуемый для нормального осуществления метаболизма объём ВГЖ и по прошествии определённого времени осуществить процесс активного удаления отработанной водянистой влаги как трабекулярным, так и частично увеосклеральным путями.

Для предложенного механизма функционирования внутриглазной системы оттока авторами введено понятие «дыхание оболочек глаза» (ДОГ), а сам механизм хорошо согласуется с современными клиническими наблюдениями, в том числе фиксирующими увеличение внутриглазного давления в здоровых глазах с возрастом, поскольку в процессе старения склера и другие оболочки глаза существенно теряют свою эластичность.

По мере роста ригидности оболочек глаза процесс ДОГ должен происходить при более высоком уровне внутриглазного давления, который может приводить к расстройствам офтальмотонуса, переходящим в ряде случаев в открытоугольную глаукому. Поэтому ключевым звеном развития глаукомного процесса в глазу необходимо признать старение оболочек глаза, что подтверждается многолетними клиническими наблюдениями.

Предложенная концепция механизма оттока внутриглазной жидкости облегчает поиск эффективных способов лечения и профилактики глазных заболеваний, но, однако, должна быть подтверждена специализированными клиническими наблюдениями. Библ. 28.

Ключевые слова: биомеханическая модель, внутриглазная жидкость, регуляция оттока, внутриглазное давление, цилиарное тело, склера, «дыхание оболочек» глаза, глаукома

Received 6 October 2001