

Взаимосвязь тонометрии по Маклакову с результатами двунаправленной пневмоапланации роговицы после рефракционной хирургии

Антонов А.А., д.м.н., заведующий отделом глаукомы; <https://orcid.org/0000-0002-5171-8261>

Клиничева Е.А., аспирант; <https://orcid.org/0000-0001-9744-0149>

Волжанин А.В., к.м.н., н.с. отдела глаукомы; <https://orcid.org/0000-0002-1421-8882>

Агаджанян Т.М., м.н.с. отдела глаукомы. <https://orcid.org/0000-0001-8275-3740>

ФГБНУ «НИИГБ им. М.М. Краснова», ул. Россолимо, 11 А, Б, Москва, Российская Федерация, 119021.

Финансирование: авторы не получили финансирование при проведении исследования и написании статьи.

Конфликт интересов: отсутствует.

Для цитирования: Антонов А.А., Клиничева Е.А., Волжанин А.В., Агаджанян Т.М. Взаимосвязь тонометрии по Маклакову с результатами двунаправленной пневмоапланации роговицы после рефракционной хирургии.

Национальный журнал глаукома. 2026; 25(1):18-26.

Резюме

ЦЕЛЬ. Исследовать взаимосвязь между показателями тонометрии по Маклакову (с использованием грузов разной массы) и биомеханически скорректированными значениями внутриглазного давления (ВГД), полученными методом двунаправленной пневмоапланации, у пациентов после различных видов кераторефракционной хирургии (LASIK, FS-LASIK, ФПК)

МЕТОДЫ. В исследовании принял участие 61 пациент (121 глаз): контрольная группа (n=31) и три послеоперационные группы — LASIK (n=26), FS-LASIK (n=32) и ФПК (n=32). Всем пациентам выполнена тонометрия по Маклакову грузом 5, 10 и 15 г. С помощью Ocular Response Analyzer (ORA) определены роговично компенсированное ВГД (ВГДрк), ВГД по Гольдману (ВГДг), корнеальный гистерезис (КГ), фактор резистентности роговицы (ФРР) и коэффициент биомеханического напряжения (Kbs).

РЕЗУЛЬТАТЫ. Наиболее выраженные обратные корреляции между результатами тонометрии по Маклакову и показателями ВГДрк наблюдались в группе ФПК ($r = -0,8$

и $r = -0,91$ для грузов 5 и 10 г), в то время как в группе LASIK максимальная связь выявлена для груза 5 г ($r = -0,85$), ослабевающая с увеличением массы груза. В группе FS-LASIK значимые корреляции присутствовали преимущественно при использовании груза 10 г ($r = -0,67$). В контрольной группе груз 10 г не коррелировал ни с чем, тогда как грузы 5 и 15 г умеренно коррелировали с ВГДрк, ВГДг, ФРР и Kbs. КГ достоверно коррелировал только с грузом 5 г в группе ФПК ($r = -0,491$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. После LASIK и ФПК тонометрия по Маклакову с грузом 5 г обеспечивает наилучшую сопоставимость с биомеханически скорректированными значениями ВГД; после FS-LASIK предпочтительнее использовать груз 10 г. Полученные данные подчёркивают необходимость индивидуального подбора массы груза при тонометрии по Маклакову у пациентов с изменённой биомеханикой роговицы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: внутриглазное давление, тонометрия по Маклакову, LASIK, FS-LASIK, ФПК, двунаправленная пневмоапланация, Ocular Response Analyzer.

Для контактов:

Клиничева Елизавета Андреева, e-mail: klinichevaeliza@gmail.com

ORIGINAL ARTICLE

Relationship between Maklakov tonometry and pneumatic applanation tonometry readings after refractive surgery

ANTONOV A.A., Dr. Sci. (Med.), Head of the Glaucoma Department;
<https://orcid.org/0000-0002-5171-8261>

KLINICHEVA E.A., postgraduate student; <https://orcid.org/0000-0001-9744-0149>

VOLZHANIN A.V., Cand. Sci. (Med.), researcher at the Glaucoma Department;
<https://orcid.org/0000-0002-1421-8882>

AGHAJANYAN T.M., junior researcher at the Glaucoma Department. <https://orcid.org/0000-0001-8275-3740>

Krasnov Research Institute of Eye Diseases, 11A Rossolimo St., Moscow, Russian Federation, 119021.

Funding: the authors received no specific funding for this work.

Conflicts of Interest: none declared.

For citations: Antonov A.A., Klinicheva E.A., Volzhanin A.V., Aghajanyan T.M. Relationship between Maklakov tonometry and pneumatic applanation tonometry readings after refractive surgery. *Natsional'nyi zhurnal glaukoma*. 2026; 25(1):18-26.

Abstract

PURPOSE. This study examined the relationship between Maklakov tonometry readings obtained using weights of different masses and biomechanically corrected intraocular pressure (IOP) values measured by pneumatic applanation tonometry in patients after various types of keratorefractive surgery (LASIK, FS-LASIK, and PRK).

METHODS. The study included 61 patients (121 eyes): a control group (n=31) and three postoperative groups — LASIK (n=26), FS-LASIK (n=32), and PRK (n=32). All patients underwent Maklakov tonometry using 5-, 10-, and 15-g weights. Using the Ocular Response Analyzer (ORA), corneal-compensated IOP (IOPcc), Goldmann-correlated IOP (IOPg), corneal hysteresis (CH), corneal resistance factor (CRF), and the biomechanical stress coefficient (Kbs) were measured.

RESULTS. The strongest inverse correlations between Maklakov tonometry and IOPcc were observed in the PRK group ($r=-0.80$ and $r=-0.91$ for the 5- and 10-g weights, respectively), whereas in the LASIK group the maximum

association was found with the 5-g weight ($r=-0.85$), weakening as the weight mass increased. In the FS-LASIK group, significant correlations were predominantly observed with the 10-g weight ($r=-0.67$). In the control group, the 10-g weight showed no correlation with any parameter, while the 5- and 15-g weights demonstrated moderate correlations with IOPcc, IOPg, CRF, and Kbs. Corneal hysteresis correlated significantly only with the 5-g weight in the PRK group ($r=-0.491$).

CONCLUSION. After LASIK and PRK, Maklakov tonometry using a 5-g weight compares the best with biomechanically corrected IOP values, whereas after FS-LASIK the 10-g weight appears to be preferable. These findings underscore the need for individualized selection of weight mass when performing Maklakov tonometry in patients with altered corneal biomechanics.

KEYWORDS: intraocular pressure, Maklakov tonometry, LASIK, FS-LASIK, PRK, pneumatic applanation tonometry, Ocular Response Analyzer.

Иntenсивное развитие кераторефракционной хирургии за последние десятилетия определило необходимость в новых методах тонометрии, менее чувствительных к измененным свойствам роговицы. Наиболее распространенными подходами в рефракционной хирургии на сегодняшний день являются лазерный кератомилез in situ (LASIK), LASIK с фемтосекундным сопровождением (FS-LASIK) и фоторефракционная кератэктомия (ФПК) благодаря своей безопасности, предсказуемости и стабильности рефракционного результата [1, 2].

Глаукома является одной из ведущих причин необратимого снижения зрения [3, 4]. Глаукома является многофакторным заболеванием со сложным, до конца неизученным патогенезом. На сегодняшний день известен только один модифицируемый фактор риска развития и прогрессирования глаукомы – уровень внутриглазного давления (ВГД) [5, 6]. Достоверная оценка ВГД принципиальна для диагностики, лечения и динамического наблюдения глаукомы. Подавляющее большинство тонометров (в том числе наиболее распространенный в СНГ тонометр Маклакова) для качественного

Таблица 1. Распределение клинического материала по полу и возрасту в контрольной группе и в подгруппах основной группы, $M \pm SE$; для непараметрических данных — медиана, 1-й и 3-й квартили.

Table 1. Distribution of patients by gender and age in the control group and in subgroups of the main group, $M \pm SE$; for non-parametric data — median, 1st and 3rd quartiles.

	Контрольная группа Control group	Основная группа / Main group		
		LASIK	FS-LASIK	ФПК / PRK
Возраст, лет ($M \pm \sigma$) Age, years ($M \pm \sigma$)	33,45 \pm 6,15	40,0 [32,25; 46,25]	41,72 \pm 6,01	48,75 \pm 5,90
Всего, n / Total, n	31	26	32	32
М/Ж, n / M/F, n	10/21	10/16	15/17	13/19

Таблица 2. Рефракция и острота зрения по данным субъективных исследований, $M \pm SE$; для непараметрических данных — медиана, 1-й и 3-й квартили.

Table 2. Refraction and visual acuity based on subjective examinations, $M \pm SE$; for non-parametric data — median, 1st and 3rd quartiles.

	Контрольная группа Control group	Основная группа / Main group		
		LASIK	FS-LASIK	ФПК / PRK
СЭ до опер., дптр SE before surgery, D	-3,93 \pm 2,19	-6,40 \pm 2,02	-4,53 \pm 1,68	-4,45 \pm 1,49
СЭ после опер., дптр SE after surgery, D	—	-0,25 [-1,47; 0,19]	-0,55 \pm 0,56	-0,63 \pm 0,94
НКОЗ / UCVA	0,15 \pm 0,14	0,78 \pm 0,39	0,89 \pm 0,25	0,80 \pm 0,18
Sph, дптр / Sph, D	-3,7 \pm 2,06	-0,46 \pm 1,12	-0,32 \pm 0,56	-0,34 \pm 0,89
Cyl, дптр / Cyl, D	-0,42 \pm 0,47	-0,61 \pm 0,37	-0,45 \pm 0,16	-0,56 \pm 0,34
МКОЗ / BCVA	0,99 \pm 0,15	0,99 \pm 0,098	1,14 \pm 0,24	0,96 \pm 0,10

исследования требует интактного состояния роговицы. О важности кривизны и жесткости роговицы для корректного измерения ВГД известно давно [7, 8], однако, среди методов, учитывающих эти факторы, в широкую клиническую практику вошли только эластонометрия Филатова – Кальфа и, в последние десятилетия, метод двунаправленной апланации (прибор Ocular Response Analyzer, ORA; Reichert, США).

Прибор ORA был разработан специально для оценки ВГД в глазах после кераторефракционной хирургии. Двунаправленная апланация основана на сравнении ВГД в момент первой апланации, возникающей при прогибе роговицы внутрь, и повторной, происходящей при её возврате в исходное состояние. На основании разницы между этими показателями и имеющегося массива данных об изменениях свойств роговицы после LASIK происходит оценка

биомеханических параметров роговицы — фактора резистентности роговицы (ФРП) и корнеального гистерезиса (КГ) — и расчет уровня ВГД с поправкой на полученные биомеханические данные (ВГДрк — роговично компенсированное). К настоящему времени описана взаимосвязь результатов тонометрии по Маклакову с результатами ORA [9] и точечной контактной тонометрии [10], однако, подобная взаимосвязь в глазах, перенесших кераторефракционные вмешательства, до сих пор не изучена.

Исходя из этого, целью нашего исследования стало изучение взаимосвязи между показателями тонометрии по Маклакову (с использованием грузов разной массы) и биомеханически скорректированными значениями ВГД, полученными методом двунаправленной пневмоапланации, у пациентов после различных видов кераторефракционной хирургии (LASIK, FS-LASIK, ФПК).

Таблица 3. Биометрические и кератометрические данные в различных группах, $M \pm SE$.Table 3. Biometry and keratometry findings in patients of the study groups, $M \pm SE$.

	Контрольная группа Control group	Основная группа / Main group		
		LASIK	FS-LASIK	ФПК / PRK
ПЗО, мм / AL, mm	24,8±0,9	25,7±1,4	25,3±0,7	24,9±0,8
ГПК, мм / ACD, mm	3,7±0,2	3,6±0,3	3,7±0,5	3,4±0,4
ТХ, мм / CT, mm	3,7±0,3	3,9±0,3	3,7±0,3	4,0±0,2
К1, дптр / K1, D	43,3±1,1	39,2±2,4	39,9±1,6	40,8±1,5
К2, дптр / K2, D	44,3±1,3	40,1±2,4	40,2±1,6	41,6±1,8
Сул, дптр / Суl, D	0,9±0,4	0,9±0,2	0,3±0,4	0,8±0,5
WTW	12,2±0,3	12,4±0,4	12,0±0,3	11,8±0,3

Примечание: WTW (white-to-white) — горизонтальный диаметр роговицы «от белого до белого», мм.

Note: WTW (white-to-white) — horizontal diameter of the cornea "from white to white" in mm.

Материал и методы

В исследовании приняли участие 61 человек (121 глаз) в возрасте от 21 до 60 лет (41,0 [36,0; 48,0]), из них женщин — 60,3% (73 глаза), мужчин — 39,7% (48 глаз). Все пациенты были разделены на основную и контрольную группы. В контрольную группу вошло 16 человек (31 глаз) с миопией слабой, средней или высокой степени, сложным миопическим астигматизмом без ранее выполненных кераторефракционных вмешательств. Женщины составили 67,7% (21 глаз), мужчины — 32,3% (10 глаз), средний возраст составил $33,45 \pm 6,15$ лет.

Основная группа включила 45 человек (90 глаз, 74,3) с миопией и миопическим астигматизмом после эксимерлазерной коррекции аномалий рефракции методами LASIK, FS-LASIK и ФПК. Основная группа была разделена на три подгруппы в зависимости от метода эксимерлазерной коррекции. В группу LASIK вошли 13 пациентов (26 глаз) в возрасте 40,0 [32,25; 46,25] лет, из них женщин — 61,5% (16 глаз), мужчин — 38,5% (10 глаз). Группу FS-LASIK составили 16 человек (32 глаза), из которых женщины составили 53,1% (17 глаз), мужчины — 46,9% (15 глаз), средний возраст составил $41,7 \pm 6,01$ лет. Группа ФПК включила 16 человек (32 глаза) в возрасте $48,75 \pm 5,89$ лет, из которых женщины составили 59,4% (19 глаз), мужчины — 40,6% (13 глаз). Характеристика клинического материала приведена в табл. 1.

Критерии включения в основную группу были следующие: возраст от 25 до 60 лет включительно, наличие в анамнезе перенесенной первичной кераторефракционной хирургии с целью коррекции миопии и/или миопического астигматизма методами LASIK, FS-LASIK, ФПК более 1 года назад, отсутствие других оперативных вмешательств на глазах. В контрольную группу были включены пациенты от 25 до 45 лет с эмметропической и миопической рефракцией по сферозэквиваленту (СЭ) от 1,0 дптр

до 10 дптр с длиной переднезадней оси (ПЗО) менее 29,0 мм и нативным хрусталиком. Критериями исключения для всех группы считали оперированную миопию очень высокой степени (более 10 дптр по сферозэквиваленту и/или ПЗО свыше 29,0 мм), оперированную гиперметропию, гиперметропический и смешанный астигматизм, другие виды кераторефракционной хирургии (рефракционная экстракция линтикулы [ReLEx SMILE], радиальная кератотомия) в анамнезе, глазные и общесоматические состояния, влияющие на морфофункциональные параметры фиброзной оболочки глаза и снижение прозрачности оптических сред любой этиологии (помутнения роговицы, выраженные помутнения хрусталика с остротой зрения менее 0,5 и т.д.).

Оценка клинической рефракции включала определение величины и типа аметропии, а также СЭ до и после хирургического вмешательства. Данные об аметропии до операции в основной группе были получены ретроспективно по данным документации. Всем пациентам основной и контрольной групп была произведена оценка максимальной корригированной остроты зрения вдаль (МКОЗ) и некорригированной остроты зрения (НКОЗ), оценка манифестной и циклоплегической рефракции с использованием авторефрактометрии, оптическая биометрия с использованием биометра (Lenstar 500, Haag-Streit, США) с определением величины ПЗО, глубины передней камеры (ГПК), толщины хрусталика (ТХ), центральной толщины роговицы (ЦТР) и средней кератометрии в двух главных меридианах (К1 — слабый, К2 — сильный) (табл. 2, 3).

Кератотопографию производили по Шеймпфлюг-технологии с использованием прибора ALLEGRO Oculyzer (Alcon, США). Оценку значений кератометрии в 3-, 5- и 6-миллиметровой зонах проводили в равноудаленных от центра точках с шагом 1 мм в двух главных меридианах по сагиттальной карте передней поверхности роговицы.

Таблица 4. Результаты тонометрии по Маклакову грузами разной массы с распределением по группам, мм рт.ст., $M \pm SE$; для непараметрических данных — медиана, 1-й и 3-й квартили.

Table 4. Results of Maklakov tonometry with different weights in different groups, mm Hg, $M \pm SE$; for non-parametric data – median, 1st and 3rd quartiles.

	Контроль / Controls	LASIK	FS-LASIK	ФПК / PRK
	мм / mm			
∅ 5 г	5,40±0,06	5,48±0,08	5,48±0,03	5,37±0,08
∅ 10 г	6,68±0,06	6,78±0,08	6,96±0,04	6,84±0,08
∅ 15 г	7,34±0,07	7,35±0,07	7,45±0,04	7,36 [7,26; 7,46]
	мм рт.ст. / mm Hg			
∅ 5 г	16,13±0,67	15,04±0,56	14,97±0,26	16,5±0,45
∅ 10 г	19,19±0,59	20,15±0,53	19,06±0,30	20,0 [18,0;22,0]
∅ 15 г	23,70±0,56	26,04±0,55	25,25±0,34	26,19±0,31

Таблица 5. Результаты двунаправленной пневмоаппланации с разделением по группам, мм рт.ст., $M \pm SE$; для непараметрических данных — медиана, 1-й и 3-й квартили.

Table 5. Results of bidirectional pneumatic applanation by groups, mm Hg, $M \pm SE$; for non-parametric data – median, 1st and 3rd quartiles.

	Контроль / Controls	LASIK	FS-LASIK	ФПК / PRK
ВГДрк / IOPcc	14,97±0,49	13,28±0,43	12,35 [11,8; 14,8]	15,03±0,46
ВГДг / IOPg	15,13±0,58	11,9±0,65	10,95 [10,3; 12,1]	15,00±0,63
КГ / CH	11,09±0,21	10,07±0,24	9,40 [8,5; 10,3]	10,91±0,26
ФРП / CRF	10,87±0,28	9,06±0,37	8,50 [8,1; 8,8]	10,70±0,36
Kbs	0,69±0,02	0,61±0,02	0,58 [0,55; 0,73]	0,69±0,02

Тонометрию по Маклакову проводили грузами 5, 10 и 15 г, динамическую двунаправленную пневмоаппланацию роговицы выполняли на приборе ORA (Ocular Response Analyzer, Reichert, США) с определением значений ВГДрк, ВГД, аналогичного тонометрии по Гольдману (ВГДг), ФРП и КГ.

Тонометрию по Маклакову выполняли по классической методике, под местной капельной анестезией раствором *Sol. Охуброкаи* 0,4% («Инокаин», SENTISS, Индия), в положении пациента лежа на спине. Результаты интерпретировали с использованием измерительной линейки Поляка для грузов разной массы с получением значений в миллиметрах ртутного столба, а также путем ручного измерения диаметров отпечатков с помощью штангенциркуля. Такой способ измерения предполагает наиболее точную интерпретацию значений, поскольку минимизирует человеческий фактор при измерении и нивелирует возможную погрешность линеек разных производителей. Известно, что на сегодняшний

день нет четкой стандартизации измерительных линеек для тонометров Маклакова, в связи с чем результаты, измеренные в мм рт.ст., могут сильно варьировать при измерении линейками от разных производителей из-за качества нанесения измерительной шкалы и плотности основы [11].

Для анализа вязко-эластических свойств фиброзной оболочки глаза, помимо ФРП и КГ, оценивали коэффициент биомеханического сопротивления (Kbs) и значение результатов тонометрии по Маклакову. КГ и ФРП вычислялись программным обеспечением прибора ORA.

Kbs обладает высокими специфичностью и чувствительностью в оценке степени компенсации офтальмотонуса и прогнозировании развития глаукомы [12]. Kbs вычисляется по формуле $Kbs = \text{ВГДг} / (\text{КГ} + \text{ФРП})$. За норму принимали значение $Kbs \leq 1,0$; пограничное значение – 1,1; результат более 1,1 принимался как отклонение от нормы и расценивался как признак декомпенсации офтальмотонуса и фактор риска развития глаукомы.

Статистический анализ

Систематизация и анализ полученных данных производился с использованием статистического пакета Microsoft Office Excel 2010, а также программного обеспечения IBM SPSS Statistics версия 21 (IBM Corporation).

Первичную проверку на нормальность всех количественных признаков проводили в два этапа. Первично анализировали величину среднего значения, медиану, эксцесс и асимметрию. Далее проводили оценка с использованием специальных статистических критериев Шапиро – Уилка и Колмогорова-Смирнова. В тех случаях, когда результаты анализа распределения получались противоречивыми, окончательное решение принимали на основе значения критерия Шапиро – Уилка, как более мощного.

Оценку значимости различия средних значений между четырьмя несвязанными выборками, представленными количественными данными, не подчиняющимися закону нормального распределения, проводили с помощью непараметрического критерия Краскела – Уоллиса с применением поправки Бонферрони для множественных сравнений.

Результаты, соответствующие нормальному распределению, представлены в виде $M \pm SE$; не соответствующие — медианы, 1-го и 3-го квартилей.

Корреляционную связь устанавливали с помощью вычисления коэффициента корреляции Спирмена. Степень показателя тесноты корреляционной связи между параметрами качественно оценивали по шкале Чеддока (0,1–0,3 — слабая, 0,3–0,5 — умеренная, 0,5–0,7 — заметная, 0,7–0,9 — высокая, 0,9–0,99 — весьма высокая). Критический уровень значимости при проверке гипотез для принятия достоверных различий был принят равным 0,05.

Результаты

Во всех 4 группах среднее значение диаметра отпечатка груза 5 г составило $5,43 \pm 0,36$ мм (4,5–6,22 мм), груза 10 г — $6,8 \pm 0,38$ мм (5,88–7,75 мм) и груза 15 г — $7,37 \pm 0,29$ мм (6,66–8,2 мм). Распределение полученных значений по подгруппам с перерасчетом в мм рт.ст. приведено в табл. 4 и 5. Так, с увеличением массы самого груза увеличивается и сила, с которой измерительная площадка апплирует роговицу, что, в свою очередь, приведет к большему диаметру измеряемого отпечатка и увеличению площади роговицы, охватываемой грузом и большему влиянию параоптической кривизны роговицы на результат измерения.

Выявленные корреляции

В группе пациентов, перенесших LASIK, обнаружены статистически значимые ($p < 0,05$) обратные корреляции между диаметром груза результатов тонометрии по Маклакову тонометра разной

массы и данными офтальмотонуса, полученными с использованием двунаправленной пневмоаппликации, а также с ФРР и Kbs. Корреляция уменьшается соразмерно с увеличением диаметра груза: максимальная корреляция соответствовала диаметру груза 5 г (для ВГДрк $r = -0,85$; $p < 0,01$; для ВГДг $r = -0,86$; $p < 0,01$), минимальная — диаметру груза 15 г (для ВГДрк $r = -0,47$; $p < 0,05$; для ВГДг $r = -0,46$; $p < 0,05$). Корреляция диаметра отпечатка грузов разной массы с результатами анализа вязко-эластичных свойств роговицы продемонстрировали наличие статистически значимой ($p < 0,05$) обратной связи «умеренной» и «заметной» силы с коэффициентом резистентности роговицы для груза 5 и 10 г, а также «заметной» и «высокой» корреляционной связи с Kbs с аналогичным уменьшением взаимосвязи меньшего диаметра к большему (табл. 6).

В подгруппе пациентов после FS-LASIK были обнаружены статистически значимые корреляционные взаимосвязи для грузов массой 10 г для ВГДрк ($r = -0,67$; $p < 0,05$) и массой 10 и 15 г для ВГДг (соответственно, $r = -0,67$ [$p < 0,01$] и $r = -0,47$ [$p < 0,01$]). Значимые корреляции для ФРР были обнаружены только для диаметра груза массой 15 г, при этом сила связи была умеренной ($r = -0,36$; $p < 0,05$). Kbs обратно коррелировал только с диаметром груза 10 г ($r = -0,65$; $p < 0,01$).

Максимальная взаимосвязь результатов тонометрии по Маклакову тонометрии с данными двунаправленной пневмоаппликации была выявлена в подгруппе ФРК, где была установлена обратная связь «высокой» и «весьма высокой» степени для ВГДрк и ВГДг с диаметрами грузов 5 и 10 г ($r = -0,8...-0,91$; $p < 0,01$). Минимальная корреляция определялась для диаметра груза 15 г. Биомеханические параметры роговицы также значимо коррелировали с диаметрами грузов массой 5 и 10 г с постепенным уменьшением взаимосвязи от меньшего диаметра отпечатка к большему при описании ФРР. Для Kbs максимальная корреляция была обнаружена для груза массой 10 г ($r = -0,85$; $p < 0,01$).

Анализ корреляционных взаимоотношений в группе контроля показал меньше статистически значимых результатов. В частности, для отпечатка груза массой 10 г не было обнаружено значимых корреляций ни с одним сравниваемым показателем. Максимальное значение коэффициента корреляции между ВГДрк, ВГДг, ФРР и Kbs приходилось на диаметр отпечатка груза массой 5 г с постепенным уменьшением в зависимости от массы груза, как в основной группе.

Стоит отметить, что статистически значимые корреляции величины КГ и диаметра отпечатков грузов разной массы не были обнаружены ни для одной из исследуемых групп.

Таблица 6. Корреляционная взаимосвязь результатов тонометрии по Маклакову и двунаправленной пневмоаппланации, мм рт.ст., $M \pm SE$.Table 6. Correlations between Maklakov tonometry and bidirectional pneumatic applanation, mm Hg, $M \pm SE$.

LASIK	ВГДрк / IOPcc		ВГДг / IOPg		КГ / CH		ФПП / CRF		KBs	
	r	p	r	p	r	p	r	p	r	p
∅ 5 г	-0,853	0,000	-0,860**	0,000	-0,327	0,000	-0,673**	0,000	-0,869**	0,000
∅ 10 г	-0,591**	0,001	-0,619**	0,001	-0,295	0,143	-0,560**	0,003	-0,597**	0,001
∅ 15 г	-0,474*	0,014	-0,463*	0,017	-0,055	0,790	-0,256	0,207	-0,519**	0,007
FS-LASIK	ВГДрк / IOPcc		ВГДг / IOPg		КГ / CH		ФПП / CRF		KBs	
	r	p	r	p	r	p	r	p	r	p
∅ 5 г	-0,101	0,581	-0,269	0,136	-0,127	0,489	-0,348	0,051	-0,061	0,740
∅ 10 г	-0,674**	0,000	-0,675**	0,000	0,0379*	0,032	0,158	0,389	-0,651**	0,000
∅ 15 г	-0,227	0,212	-0,468**	0,007	-0,195	0,285	-0,357*	0,045	-0,175	0,337
ФПК / PRK	ВГДрк / IOPcc		ВГДг / IOPg		КГ / CH		ФПП / CRF		KBs	
	r	p	r	p	r	p	r	p	r	p
∅ 5 г	-0,802**	0,000	-0,887**	0,000	-0,491**	0,004	-0,749**	0,000	-0,680**	0,000
∅ 10 г	-0,913**	0,000	-0,861**	0,000	-0,229	0,207	-0,605**	0,000	-0,854**	0,000
∅ 15 г	-0,510	0,003	-0,450**	0,010	0,015	0,935	-0,244	0,178	-0,519**	0,002
Контроль Controls	ВГДрк / IOPcc		ВГДг / IOPg		КГ / CH		ФПП / CRF		KBs	
	r	p	r	p	r	p	r	p	r	p
∅ 5 г	-0,626**	0,000	-0,645**	0,000	-0,230	0,212	-0,537**	0,002	-0,566**	0,001
∅ 10 г	-0,330	0,070	-0,338	0,063	-0,178	0,337	-0,318	0,081	-0,291	0,112
∅ 15 г	-0,437*	0,014	-0,464**	0,009	-0,198	0,286	-0,404*	0,024	-0,385*	0,033

Примечание: * — корреляция значима на уровне 0,05 (двусторонняя), ** — корреляция значима на уровне 0,01 (двусторонняя). ∅ — диаметр. Значимые корреляции выделены жирным.

Note: * — correlation is significant at 0.05 (two-tailed), ** — correlation is significant at 0.01 (two-tailed). ∅ — diameter. Significant correlations are shown in bold.

Обсуждение

На наш взгляд, полученные нами закономерности корреляционного анализа можно объяснить разницей в механизме аппланации при тонометрии по Маклакову и особенностями измерения методом двунаправленной пневмоаппланации. Аппланационная тонометрия может быть реализована в двух вариантах: воздействие на роговицу постоянной силой, соответствующей массе тонометра (тонометр Маклакова) и компрессия роговицы с последующей оценкой силы, необходимой для уплощения вершины роговицы до заданного диаметра (тонометр Гольдмана). Тонометрия по Маклакову основана на первом варианте, вследствие чего минимальная сила аппланации и, как следствие, минимальная компрессия центральной зоны роговицы будет соответствовать наименьшему по массе грузу (5 г), а полученный диаметр отпечатка будет меньше всего выходить за пределы центральной зоны роговицы, особенно при повышении ВГД и ригидности фиброзной оболочки [13].

Оценка офтальмотонуса и вязко-эластических свойств роговицы с использованием двунаправленной пневмоаппланации проводится программным обеспечением оборудования. Топографическая специфика подобной методики может лежать в основе более высокой корреляционной связи между результатами тонометрии по Маклакову при меньшем охвате парацентральной зоны роговицы при аппланации. Такое предположение подкрепляется особенностями динамики изменения значимых корреляций в ответ на увеличение массы груза тонометра Маклакова: в подгруппе LASIK и в группе контроля максимальное значение корреляции (отрицательное) соответствует диаметру отпечатка груза 5 г, а минимальное, соответственно, грузу массой 15 г. В группах ФПК и FS-LASIK отмечается нелинейная тенденция: в этих группах максимальная корреляция наблюдается для результата, полученного грузом 10 г. Не исключено, что подобное распределение корреляционных взаимодействий прямо или косвенно связано с различным

воздействием представленных технологий кераторефракционной хирургии на биомеханические свойства роговицы, что является перспективным направлением для дополнительного исследования.

При апланации роговицы тонометром Маклакова происходит не только локальное уплощение центральной зоны роговицы, но и смещение внутриглазной жидкости из передней камеры вглубь глазного яблока. Этот процесс сопровождается кратковременным увеличением объёма стекловидного тела и компенсаторной деформацией задних отделов фиброзной оболочки глаза. Степень и характер этого смещения напрямую зависят от массы используемого груза: при апланации грузом 5 г деформация ограничена преимущественно центром роговицы, и смещение жидкости минимально; в то время как при использовании грузов 10 и особенно 15 г объём вытесняемой водянистой влаги возрастает, что приводит к более выраженному давлению на хрусталик, стекловидное тело и, как следствие, к деформации склеральной оболочки. Таким образом, при больших массах груза в измерении ВГД всё большую роль начинает играть не только роговичная, но и склеральная биомеханика.

Это особенно актуально в контексте тонометрии после кераторефракционной хирургии, где структурная целостность роговицы нарушена (например, при формировании лоскута в LASIK или удалении эпителия в ФПК), а её жёсткость снижена. В таких условиях при апланации тяжёлыми грузами (10 и 15 г) увеличивается роль системы «роговица-склера» как единого биомеханического комплекса, и реакция глаза на внешнее давление определяется уже не только свойствами изменённой роговицы, но и эластичностью склеры. Именно этим, вероятно, объясняется ослабление корреляции между результатами тонометрии по Маклакову и ВГДрк при увеличении массы груза: чем больше груз, тем сильнее в процесс вовлекается склера, чьи свойства не учитываются ни в алгоритмах ORA, ни в традиционной интерпретации данных тонометрии по Маклакову.

Среди других работ, посвященных проблеме сопоставления результатов апланационной тонометрии с ORA после кераторефракционной хирургии, крупнейшей является мета-анализ 2020 года, включивший 724 глаза. Средняя разница между тонометрией по Гольдману и ВГДрк оказалась равной 2,67 мм рт.ст. (95% доверительный интервал 2,20–3,14 мм рт.ст., $p < 0,0001$), тонометрий по Гольдману и ВГДг — 0,27 мм рт.ст. (95% доверительный интервал 0,70–0,16 мм рт.ст., $p = 0,2174$) [14]. Более поздние работы показали, что развитие методов тонометрии, учитывающих поправку, не уменьшает актуальность проблемы: так, после ФПК показатели ВГДрк и «биомеханического» ВГД (ВГДб), полученного на приборе Corvis ST, не согласовывались

между собой (средняя дельта результатов после операции составила $-1,6 \pm 4,0$ мм рт.ст. для ВГДрк и $0,3 \pm 1,7$ мм рт.ст. для ВГДб) [15]. Сравнение ВГДб с результатами бесконтактной пневмотонометрии и тонометрии по Гольдману в глазах после ФПК и LASIK также показало отсутствие согласованности между всеми тремя методами [16].

Проведённое исследование продемонстрировало, что после кераторефракционных вмешательств (LASIK, FS-LASIK, ФПК) сохраняется статистически значимая обратная корреляционная связь между результатами тонометрии по Маклакову и данными двунаправленной пневмоапланации. Наиболее тесная корреляция наблюдается при использовании грузов меньшей массы (5 и 10 г), что указывает на большую чувствительность этих измерений к центральным биомеханическим свойствам роговицы и меньшую – к парацентральной деформации. При этом характер взаимосвязи варьирует в зависимости от типа рефракционной операции: максимальная корреляция выявлена в группе после ФПК, тогда как после FS-LASIK отмечается нелинейная динамика, предположительно обусловленная различиями в биомеханическом ремоделировании роговицы.

Важно отметить, что КГ не продемонстрировал значимой корреляции с результатами тонометрии по Маклакову ни в одной из групп, в то время как ФПР и Kbs показали устойчивые обратные связи, особенно в подгруппах LASIK и ФПК. Это подчёркивает потенциальную клиническую ценность Kbs как интегративного показателя компенсации офтальмотонуса в условиях изменённой роговичной биомеханики.

Мы сравниваем «быстрый» и «медленный» методы исследования, поэтому полученные различия могут быть связаны с вязкостными свойствами роговицы. Постепенная компрессия роговицы тонометром Маклакова не вызывает вязкостного ответа, в то время как часть энергии воздушного импульса ORA из-за своей внезапности поглощается роговицей, не оказывая влияния на её фактическую деформацию. Это объясняет отсутствие взаимосвязи тонометрии по Маклакову с КГ, который является числовым выражением вязкостных свойств роговицы.

Полученные данные свидетельствуют о том, что тонометрия по Маклакову может быть адаптирована для оценки ВГД у пациентов после кераторефракционной хирургии при условии учёта массы груза и соответствующей интерпретации результатов в контексте биомеханических параметров роговицы. Для повышения точности и сопоставимости измерений настоятельно рекомендуется использовать методы, учитывающие индивидуальные биомеханические характеристики роговицы, такие как ORA, особенно в рамках скрининга и мониторинга глаукомы у данной категории пациентов.

Таким образом, результаты исследования подтверждают необходимость персонализированного подхода к измерению ВГД после рефракционной хирургии и открывают перспективы для разработки алгоритмов коррекции данных традиционной тонометрии на основе биомеханических маркеров, получаемых с помощью современных неинвазивных технологий.

Литература

- Kim TI, Alió Del Barrio JL, Wilkins M, Cochener B, Ang M. Refractive surgery. *Lancet* 2019; 393(10185):2085-2098. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)33209-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)33209-4).
- Ang M, Gatinel D, Reinstein DZ, Mertens E, Alió Del Barrio JL, Alió JL. Refractive surgery beyond 2020. *Eye (Lond)* 2021; 35(2):362-382. <https://doi.org/10.1038/s41433-020-1096-5>
- Tham, Y.C., Li, X., Wong, T.Y., Quigley, H.A., Aung, T., Cheng, C.Y. Global prevalence of glaucoma and projections of glaucoma burden through 2040: a systematic review and meta-analysis. *Ophthalmology* 2014; 121(11):2081-2090. <https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2014.05.013>
- GBD 2019 Blindness and Vision Impairment Collaborators; Vision Loss Expert Group of the Global Burden of Disease Study. Causes of blindness and vision impairment in 2020 and trends over 30 years, and prevalence of avoidable blindness in relation to VISION 2020: the Right to Sight: an analysis for the Global Burden of Disease Study *Lancet Glob Health* 2021; 9(2):e144-e160. [https://doi.org/10.1016/S2214-109X\(20\)30489-7](https://doi.org/10.1016/S2214-109X(20)30489-7)
- Национальное руководство по глаукоме для практикующих врачей, 3-е издание, исправленное и дополненное. Под ред. Егорова Е.А., Астахова Ю.С., Еричева В.П. М: ГЭОТАР-Медиа 2015; 456.
- Terminology and guidelines for glaucoma: European glaucoma society. 5th edition. Savona, Italy, PubliComm, 2020.
- Рачевский ФА. К вопросу о напряжениях в роговой оболочке. *Офтальмологический журнал* 1930; 12:3-16.
- Friedenwald, J.S. Contribution to the theory and practice of tonometry. *American Journal of Ophthalmology* 1939; 22(4):375-383.
- Антонов А.А. Современные подходы к трактовке результатов тонометрии по Маклакову. *Национальный журнал глаукома* 2023; 22(2):17-22. <https://doi.org/10.53432/2078-4104-2023-22-2-17-22>
- Дорофеев Д.А., Поздеева О.Г., Экгардт В.Ф., Антонов А.А. и соавт. Результаты тонометрии апланационной по Маклакову и точечной контактной прибором Icare в сравнительном аспекте. *Отражение* 2018; 2(7):27-32. <https://doi.org/10.25276/2686-6986-2018-2-27-32>
- Вурдафт АЕ. О точности измерительных линеек Б.Л. Поляка. *Национальный журнал глаукома* 2017; 16:11-22.
- Антонов АА, Козлова ИВ. Коэффициент биомеханического напряжения в оценке степени компенсации внутриглазного давления. *Вестник офтальмологии* 2021; 5(2):255-261.
- Аветисов СЭ, Бубнова ИА, Антонов АА. Клинико-экспериментальные аспекты изучения биомеханических свойств фиброзной оболочки глаза. *Вестник офтальмологии* 2013; 129(5):83-91.
- Zhang H, Sun Z, Li L, Sun R, Zhang H. Comparison of intraocular pressure measured by ocular response analyzer and Goldmann applanation tonometer after corneal refractive surgery: A systematic review and meta-analysis. *BMC Ophthalmol* 2020; 20(1):1-9. <https://doi.org/10.1186/s12886-019-1288-6>
- Salouti R, Azimi A, Meshksar A, Takapouy R, et al. Intraocular Pressure Before and After Corneal Refractive Surgery: A Prospective Comparison of Corvis ST and Ocular Response Analyzer. *J Glaucoma* 2024; 33(10):780-784. <https://doi.org/10.1097/IJG.0000000000002434>.
- Karmiris E, Tsiogka A, Stavrakas P, Tsiropidis K, et al. Comparison of intraocular pressure measurements obtained by Goldmann applanation tonometer, corvis ST and a conventional non-contact airpuff tonometer in eyes with previous myopic refractive surgery and correlation with corneal biomechanical parameters. *Int Ophthalmol* 2025; 45(1):232. <https://doi.org/10.1007/s10792-025-03598-z>.

Участие авторов:

Концепция и дизайн исследования: Антонов А.А., Клиничева Е.А.

Сбор и обработка материала: Клиничева Е.А., Агаджанян Т.М.

Статистическая обработка: Клиничева Е.А, Волжанин А.В.

Написание статьи: Клиничева Е.А, Волжанин А.В.,

Агаджанян Т.М.

Редактирование: Антонов А.А.

References

- Kim TI, Alió Del Barrio JL, Wilkins M, Cochener B, Ang M. Refractive surgery. *Lancet* 2019; 393(10185):2085-2098. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)33209-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)33209-4).
- Ang M, Gatinel D, Reinstein DZ, Mertens E, Alió Del Barrio JL, Alió JL. Refractive surgery beyond 2020. *Eye (Lond)* 2021; 35(2):362-382. <https://doi.org/10.1038/s41433-020-1096-5>
- Tham, Y.C., Li, X., Wong, T.Y., Quigley, H.A., Aung, T., Cheng, C.Y. Global prevalence of glaucoma and projections of glaucoma burden through 2040: a systematic review and meta-analysis. *Ophthalmology* 2014; 121(11):2081-2090. <https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2014.05.013>
- GBD 2019 Blindness and Vision Impairment Collaborators; Vision Loss Expert Group of the Global Burden of Disease Study. Causes of blindness and vision impairment in 2020 and trends over 30 years, and prevalence of avoidable blindness in relation to VISION 2020: the Right to Sight: an analysis for the Global Burden of Disease Study *Lancet Glob Health* 2021; 9(2):e144-e160. [https://doi.org/10.1016/S2214-109X\(20\)30489-7](https://doi.org/10.1016/S2214-109X(20)30489-7)
- Natsional'noe rukovodstvo po glaukome dlya praktikuyuschikh vrachei [National glaucoma guidelines for practitioners]. 3rd ed, revised and extended. Egorov E.A., Astakhov Yu.S., Erichev V.P, eds. Moscow, Geotar-Media Publ., 2015. 456 p.
- Terminology and guidelines for glaucoma: European glaucoma society. 5th edition. Savona, Italy, PubliComm, 2020.
- Rachevsky FA. On the issue of tensions in the cornea. *Journal of Ophthalmology (USSR)* 1930; 12:3-16.
- Friedenwald, J.S. Contribution to the theory and practice of tonometry. *American Journal of Ophthalmology* 1939; 22(4):375-383.
- Antonov A.A. Modern approaches to interpretation of Maklakov tonometry results. *National Journal glaucoma* 2023; 22(2):17-22. <https://doi.org/10.53432/2078-4104-2023-22-2-17-22>
- Dorofeev D.A., Pozdeeva O.G., Ekgardt V.F., Antonov A.A. et al. Ophthalmotonometer indicators measured by Maklakov applanation tonometer and rebound tonometer. *Otrazhenie* 2018; 2(7):27-32. <https://doi.org/10.25276/2686-6986-2018-2-27-32>
- Vurdaft A.E. On the precision of Polyak measuring scales in Maklakov tonometry. *Natsional'nyi zhurnal glaukoma* 2017; 16(4):11-22.
- Antonov AA, Kozlova IV. Coefficient of biomechanical stress in assessment of the degree of intraocular pressure compensation. *Vestnik Oftalmologii* 2021; 137(5-2):255-261. <https://doi.org/10.17116/oftalma2021137052255>
- Avetisov SE, Bubnova IA, Antonov AA. Clinical and experimental aspects of investigation of biomechanical properties of corneoscleral shell. *Vestnik Oftalmologii* 2013; 129(5):83-91.
- Zhang H, Sun Z, Li L, Sun R, Zhang H. Comparison of intraocular pressure measured by ocular response analyzer and Goldmann applanation tonometer after corneal refractive surgery: A systematic review and meta-analysis. *BMC Ophthalmol* 2020; 20(1):1-9. <https://doi.org/10.1186/s12886-019-1288-6>
- Salouti R, Azimi A, Meshksar A, Takapouy R, et al. Intraocular Pressure Before and After Corneal Refractive Surgery: A Prospective Comparison of Corvis ST and Ocular Response Analyzer. *J Glaucoma* 2024; 33(10):780-784. <https://doi.org/10.1097/IJG.0000000000002434>.
- Karmiris E, Tsiogka A, Stavrakas P, Tsiropidis K, et al. Comparison of intraocular pressure measurements obtained by Goldmann applanation tonometer, corvis ST and a conventional non-contact airpuff tonometer in eyes with previous myopic refractive surgery and correlation with corneal biomechanical parameters. *Int Ophthalmol* 2025; 45(1):232. <https://doi.org/10.1007/s10792-025-03598-z>.