

Современные подходы к трактовке результатов тонометрии по Маклакову

Антонов А.А., к.м.н., ведущий научный сотрудник отдела глаукомы.

<https://orcid.org/0000-0002-5171-8261>

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

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

Конфликт интересов: отсутствует.

Для цитирования: Антонов А.А. Современные подходы к трактовке результатов тонометрии по Маклакову. Национальный журнал глаукома. 2023; 22(2):17-22.

Резюме

Калибровка тонометра Маклакова выполнена без учета влияния биомеханических свойств оболочек глаза на измерение внутриглазного давления (ВГД) на основе предположения, что средних показателей ригидности глаза, измеренных *ex vivo*, достаточно для клинической оценки офтальмотонуса. Роговично-компенсированное ВГД (ЮРсс) позволяет оценить индивидуальные особенности строения фиброзной оболочки глаза пациентов и, по литературным данным, является диагностически более важным показателем при глаукоме. Сопоставление показателя тонометрии по Маклакову и ЮРсс у одних и тех же пациентов может внести коррективы в наши представления о диагностической ценности тонометров.

Целью данной работы стало определение на достаточном клиническом материале диапазонов роговично-компенсированного ВГД, соответствующих результатам апланации роговицы тонометром Маклакова массой 10 граммов, и выявление зависимости между диаметром отпечатка и офтальмотонусом с учетом вариабельности биомеханических свойств фиброзной оболочки в популяции.

Проведено сравнительное исследование показателя тонометрии, измеряемого тонометром Маклакова массой 10 г, и роговично-компенсированного внутриглазного давления на 14 440 глазах 7 220 пациентов (средний возраст $60,1 \pm 10,8$ лет) с первичной открытоугольной

глаукомой и подозрением на данное заболевание. Для анализа использовали данные в диапазоне роговично-компенсированного ВГД от 6 до 35, обязательным условием было высокое качество корнеограммы. Диаметр апланации измеряли штангенциркулем с точностью до 0,1 мм в соответствии с рекомендациями из инструкции к тонометру.

Установлено, что при одинаковом диаметре апланации значения ВГД могут существенно отличаться, что связано с популяционным разнообразием в строении фиброзной оболочки глаза. Получена измерительная линейка, на которой границы доверительного интервала значений ЮРсс нанесены на номограмму для измерения отпечатков по Маклакову для тонометра массой 10 г. Среднее значение роговично-компенсированного ВГД связано с диаметром апланационного взаимодействия тонометра с роговицей уравнением: $ВГД = 4,14 \times D^2 - 62,4 \times D + 248$, которое можно считать калибровочным для тонометра Маклакова в среднем и нижнем диапазоне значений офтальмотонуса.

Результаты тонометрии по Маклакову грузом массой 10 г могут быть представлены в виде диапазона значений ВГД, в котором с определённой вероятностью лежит уровень конкретного пациента.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: внутриглазное давление, тонометрия, роговично-компенсированное ВГД, глаукома, фиброзная оболочка глаза, Ocular Response Analyzer.

Для контактов:

Антонов Алексей Анатольевич, e-mail niigb.antonov@gmail.com

ORIGINAL ARTICLE

Modern approaches to interpretation of Maklakov tonometry results

ANTONOV A.A., Cand. Sci. (Med.), senior researcher at the Department of Glaucoma.
<https://orcid.org/0000-0002-5171-8261>

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. Modern approaches to interpretation of Maklakov tonometry results. *Natsional'nyi zhurnal glaukoma*. 2023; 22(2):17-22.

Abstract

Based on the presumption that the average values of ocular rigidity determined ex vivo are sufficient for clinical evaluation of intraocular pressure (IOP), calibration of the Maklakov tonometer is done without taking into due account the biomechanical properties of the tunics of the eye, which can affect the results of IOP measurements. Corneal-compensated IOP (IOPcc) allows evaluating patients' individual structural features of the fibrous tunic of the eye, and according to literature sources, for glaucoma it is a parameter with higher diagnostic value. Comparison of Maklakov tonometer readings and IOPcc from the same patients can improve our understanding of the diagnostic value of tonometry.

This article aims to determine based on sufficient clinical data the ranges of corneal-compensated IOP corresponding to applanation tonometry readings performed with a 10-g Maklakov tonometer, and to reveal the dependency between the tip diameter and the IOP with consideration of the variability of biomechanical properties of the fibrous tunic in the population.

The comparison study analyzed the readings of 10-g Maklakov tonometer and corneal-compensated intraocular pressure in 14 440 eyes of 7 220 patients (mean age

60.1±10.8 years old) with primary open-angle glaucoma and suspected glaucoma. For analysis, IOPcc values of 6 to 35 were included, with a prerequisite of corneal thickness/hysteresis data being of high quality. The tip diameter was measured with a Vernier caliper within the accuracy of 0.1 mm according to the instructions from the tonometer manual.

It was established that with equal tip diameter the readings of applanation tonometry can still vary significantly, which is associated with population variability in the structure of the fibrous tunic of the eye. A measuring scale was derived consisting of a computation chart with markings denoting the borders of confidence intervals for IOPcc values for 10-g Maklakov tonometer. Mean IOPcc is connected to the applanation tip diameter and the cornea by the following equation: $IOP = 4.14 \times D^2 - 62.4 \times D + 248$, which can be used for calibrating Maklakov tonometer in the lower and upper ranges of IOP values.

The results of 10-g Maklakov tonometry can be presented as a range of IOP values, which with a certain probability includes the individual IOP level of the patient.

KEYWORDS: intraocular pressure, tonometry, corneal-compensated IOP, glaucoma, fibrous tunic of the eye, Ocular Response Analyzer.

Относительно точное определение истинного внутриглазного давления (ВГД) возможно только методом прямой (манометрической) тонометрии с катетеризацией передней камеры глаза [1]. Прочие методы регистрируют показатель тонометрии, который зависит от давления внутриглазной жидкости, формы и строения оболочек глаза, а также реакции на проведение измерения. Повышение результата при определении офтальмотонуса зависит от силы воздействия на глаз, при использовании значимого воздействия (например, при тонометрии по Маклакову) получаются значения «тонометрического ВГД», или P_t . Приборы, действие которых менее выражено (например, тонометр Гольдмана), измеряют показатель тонометрии, который называют

«истинным ВГД», или P_0 . Существуют таблицы для определения такого «истинного» ВГД с помощью тонометра Маклакова [2].

Калибровочные таблицы для тонометра Маклакова созданы при исследованиях на открытой манометрической системе. Величины тонометрического давления для тонометров весом 5, 7,5, 10 и 15 г основаны на данных, полученных на 10 энуклеированных глазах. Значения истинного ВГД рассчитаны по уравнению J. Friedenwald. В расчетах использованы значения P_t , объема жидкости, смещаемой при тонометрии, и коэффициента ригидности глаза. Значения последнего показателя для различных уровней были получены также в опытах на энуклеированных глазах. При расчете количества смещаемой камерной влаги радиус внутренней

Таблица 1. Результаты измерения показателей тонометрии с помощью тонометра Маклакова массой 10 граммов и методом двунаправленной пневмоаппланации роговицы.

Table 1. Results of 10-g Maklakov tonometry and bidirectional applanation tonometry of the cornea.

Диаметр аппланации, мм <i>Applanation tip diameter, mm</i>	ВГД по калибровочной таблице (мм рт.ст.) <i>IOP from the calibration table (mm Hg)</i>		Результаты двунаправленной пневмоаппланации роговицы (мм рт.ст.) <i>Bidirectional applanation tonometry (mm Hg)</i>		
	P_t	P_o	ИОРсс	ИОРсс минимум / <i>min</i>	ИОРсс максимум / <i>max</i>
5,5	36,0	30,9	30,7±2,4	24,7	35,6
5,6	34,2	28,9	28,7±2,6	19,7	34,7
5,7	32,6	27	26,4±2,7	16,5	33,2
5,8	31,0	25,4	24,8±2,5	16,0	32,2
5,9	29,6	23,7	22,9±2,4	14,3	30,0
6	28,3	22,3	21,8±2,4	16,0	28,0
6,1	27,4	21	20,5±2,1	15,2	27,1
6,2	26,5	20	19,8±1,9	12,7	25,8
6,3	25,7	19	19,0±2,0	13,3	25,1
6,4	24,9	18,1	18,2±1,9	11,4	23,5
6,5	24,1	17,1	17,3±1,9	11,2	22,7
6,6	23,4	16,2	16,8±1,8	9,8	21,7
6,7	22,7	15,3	15,9±1,8	9,5	22,2
6,8	22,1	14,4	15,4±1,8	9,1	21,1
6,9	21,5	13,6	14,6±1,8	9,2	19,9
7	20,9	12,8	13,8±1,8	8,2	23,5
7,1	20,2	11,9	13,4±1,7	8,4	18,2
7,2	19,5	11,1	12,8±1,7	7,8	17,9
7,3	18,8	10,4	12,2±1,7	6,6	16,6

поверхности роговицы был принят равным 7 мм, а толщина роговицы — 0,7 мм. Тонограмма включает в себя не только кружок сплющивания, но и кольцо слезы, ширина которого была определена на глазах 5 человек на основании измерений с применением окуляр-микрометра [3].

Однако данная терминология и калибровочные таблицы были приняты без учета влияния биомеханических свойств оболочек глаза на измерение ВГД. Считалось, что использование средних показателей ригидности глаза, измеренных *ex vivo*, достаточно для клинической оценки офтальмотонуса, а погрешностью можно пренебречь.

В настоящее время считается, что необходимо учитывать устойчивость роговицы и склеры к деформации — параметр, который в большей степени, чем изученные ранее биометрические характеристики (например, толщина роговицы в центральной зоне), определяет погрешность при тонометрии.

Для простоты понимания фиброзную оболочку с низкой устойчивостью к деформации можно назвать мягкой, а с высокой — жесткой. При измерении ВГД у пациента с мягкой фиброзной оболочкой (например, при снижении центральной толщины роговицы или увеличении переднезадней оси глаза при миопии) показатель тонометрии ниже истинного офтальмотонуса. Жесткая фиброзная оболочка (например, при гиперметропии или увеличении кривизны роговицы) приводит к завышению показаний тонометров [4].

Прибор Ocular Response Analyzer (ORA) (Reichert, США) может оценивать вязко-эластические свойства роговицы с помощью ее двунаправленной пневмоаппланации. Прогибаясь внутрь под действием воздушной струи и возвращаясь к первоначальному положению, роговица дважды проходит стадию уплощения в центральной зоне, при этом определяется величина давления в обеих точках аппланации.

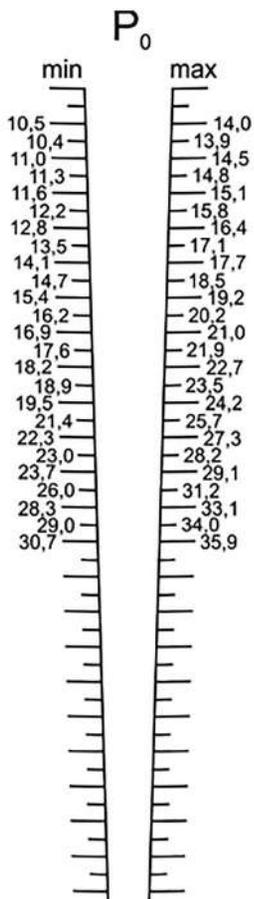


Рис. 1. Измерительная линейка для определения диапазона значений ИОРсс с помощью тонометра Маклакова массой 10 граммов (масштаб 150%).

Fig. 1. Measurement scale for determining the range of IOPcc values using 10-g Maklakov tonometry readings (magnified to 150%).

На основании этих данных рассчитываются показатель ВГД, аналогичный измеряемому при тонометрии по Гольдману (ИОРг), и роговично-компенсированное, то есть учитывающее биомеханические свойства фиброзной оболочки ВГД (ИОРсс) [5].

Расчет ИОРсс позволяет оценить индивидуальные особенности строения фиброзной оболочки глаза пациентов и является диагностически более важным показателем, чем результаты других методов тонометрии. Сопоставление показателя тонометрии по Маклакову и ИОРсс у одних и тех же пациентов может внести коррективы в наши представления о диагностической ценности тонометров.

Целью данной работы стало определение на достаточном клиническом материале диапазонов ИОРсс, соответствующих результатам апланации роговицы тонометром Маклакова массой 10 г, и выявление зависимости между диаметром отпечатка и офтальмотонусом с учетом вариабельности биомеханических свойств фиброзной оболочки в популяции.

На популяции пациентов с первичной открытоугольной глаукомой и подозрением на данное заболевание проведено сравнительное исследование показателя тонометрии, измеряемого тонометром Маклакова массой 10 г, и ИОРсс, определяемого с помощью метода двунаправленной пневмоапланации роговицы на приборе Ocular Response Analyzer. В исследование включены результаты исследования 14 440 глаз 7 220 пациентов, средний возраст составил $60,1 \pm 10,8$ лет, 38,1% был мужского пола и 61,9% — женского.

Критерии исключения из исследования: острота зрения менее 0,4; наличие прочих видов глаукомы и причин повышения офтальмотонуса; инфекционные и воспалительные заболевания глаза; патологические изменения роговицы; нистагм и другие состояния, затрудняющие диагностику глаукомы и проведение тонометрии.

Выполняли последовательное измерение сначала бесконтактным прибором в положении сидя, а затем тонометром Маклакова в горизонтальном положении с применением анестезии. Прибор Ocular Response Analyzer не позволяет достоверно измерять существенно повышенные уровни офтальмотонуса (по нашим наблюдениям, более 35 мм рт.ст.), что связано с конструктивными особенностями и калибровкой, для которой использовали результаты измерения у здоровых пациентов до и после рефракционной хирургии. Поэтому для анализа использовали данные в диапазоне ИОРсс от 6 до 35. Обязательным условием было высокое качество корнеограммы, которое оценивали по показателю WS, считая допустимыми результаты со значением более 7. Тонометрию по Маклакову проводили по стандартной методике, используя для расчетов среднее значение диаметра двух отпечатков, полученных на каждом глазу последовательно. Диаметр апланации измеряли в соответствии с рекомендациями из инструкции к тонометру, используя штангенциркуль, с точностью до 0,1 мм.

Статистический анализ результатов проведен с помощью программы MS Excel, использованы методы описательной статистики и регрессионный анализ с построением линии тренда.

Все полученные результаты были отсортированы по значению размера отпечатка и проведен анализ показателей описательной статистики.

Установлено, что при одинаковом диаметре апланации значения ВГД могут существенно отличаться. Это связано с популяционным разнообразием в строении фиброзной оболочки глаза, которое в настоящее время не учитывается при проведении тонометрических измерений по Маклакову. Поскольку различия существенны и могут оказывать влияние на мониторинг и диагностику глаукомы возможно создание тонометрической линейки, содержащей крайние значения доверительного

Таблица 2. Формирование доверительного интервала значений ИОРсс для результатов апланации роговицы тонометром Маклакова массой 10 г.

Table 2. Forming the confidence intervals for IOPcc values based on the results of 10-g Maklakov tonometr.

Диаметр апланации, мм Applanation tip diameter, mm	«Истинное» ВГД по калибровочной таблице "True" IOP from the calibration chart	Результаты двунаправленной пневмо-апланации роговицы (мм рт.ст.) Results of bidirectional applanation tonometry (mm Hg)	Границы доверительного интервала значений ИОРсс (мм рт.ст.) Borders of confidence interval for IOPcc values (mm Hg)	
			ИОРсс	минимум / min
5,5	30,9	30,7±2,4	28,3	33,1
5,6	28,9	28,7±2,6	26,0	31,3
5,7	27	26,4±2,7	23,7	29,1
5,8	25,4	24,8±2,5	22,3	27,3
5,9	23,7	22,9±2,4	20,5	25,3
6	22,3	21,8±2,4	19,5	24,2
6,1	21	20,5±2,1	18,4	22,6
6,2	20	19,8±1,9	17,9	21,8
6,3	19	19,0±2,0	16,9	21,0
6,4	18,1	18,2±1,9	16,3	20,1
6,5	17,1	17,3±1,9	15,4	19,2
6,6	16,2	16,8±1,8	15,0	18,5
6,7	15,3	15,9±1,8	14,1	17,7
6,8	14,4	15,4±1,8	13,6	17,2
6,9	13,6	14,6±1,8	12,8	16,4
7	12,8	13,8±1,8	12,0	15,7
7,1	11,9	13,4±1,7	11,6	15,1
7,2	11,1	12,8±1,7	11,0	14,5
7,3	10,4	12,2±1,7	10,4	13,9

интервала (68,26%) значений роговично-компенсированного ВГД, измеренного перед тонометрией по Маклакову.

Границы доверительного интервала значений ИОРсс нанесены на номограмму для измерения отпечатков тонометрии по Маклакову для тонометра массой 10 граммов. Полученная измерительная линейка позволяет в отсутствие биомеханического анализатора оценить возможное влияние фиброзной оболочки глаза на результаты определения офтальмотонуса.

Зависимость ИОРсс от диаметра апланации по Маклакову проанализирована статистически и выявлена зависимость близкая к параболической для максимального ($R^2=0,9947$) и минимального ($R^2=0,9888$) значений. Регрессионное уравнение, связывающее минимальное значение внутри-

глазного давления (ВГД_{min}) и диаметр апланации (D), имеет вид квадратного уравнения:

$$\text{ВГД}_{\min} = 3,85 \times D^2 - 58,2 \times D + 231.$$

По аналогии для максимального значения (ВГД_{max}) уравнение выглядит следующим образом:

$$\text{ВГД}_{\max} = 4,43 \times D^2 - 66,7 \times D + 265.$$

Среднее значение роговично-компенсированного ВГД связано с диаметром апланационного взаимодействия тонометра с роговицей уравнением:

$$\text{ВГД} = 4,14 \times D^2 - 62,4 \times D + 248,$$

которое можно считать калибровочным для тонометра Маклакова в среднем и нижнем диапазоне значений офтальмотонуса.

Значения, полученные при апланационной тонометрии по Маклакову грузом 10 г, могут быть графически проанализированы с помощью номограммы.

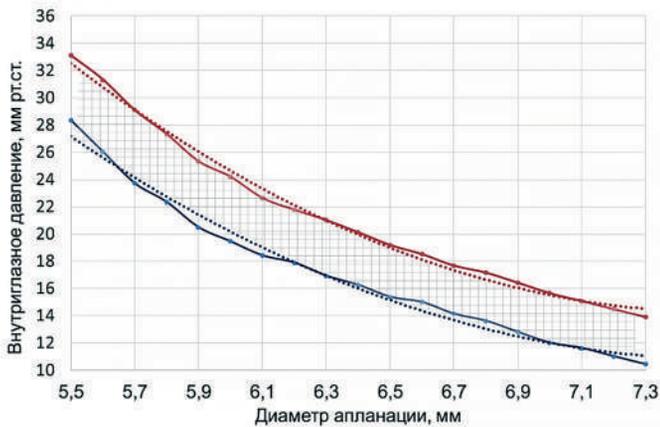


Рис 2. Зависимость крайних значений IOPcc от диаметра апланации тонометра Маклакова массой 10 г. В заштрихованной области лежат большинство значений офтальмотонуса при определенном размере отпечатка.

Fig. 2. Dependency of the extreme IOPcc values from applanation tip diameter of the 10-g Maklakov tonometer. The shaded area includes the majority of IOP values observed with the specified tip diameter.

Полученные зависимости имеют ряд ограничений, связанных с различием используемых способов тонометрии. Двухнаправленная пневмоапланация происходит при деформации роговицы в центральной зоне, воздействие тонометра Маклакова затрагивает среднюю периферию. Измерения происходят при разном положении пациента — вертикальном и горизонтальном, соответственно.

Литература

1. Аветисов С.Э., Антонов А.А., Вострухин С.В., Аветисов К.С. Измерение давления в передней камере глаза: новое техническое решение и результаты. *Вестник офтальмологии* 2016; 132(6):4-10. <https://doi.org/10.17116/oftalma201613264-10>
2. Антонов А.А., Карлова Е.В., Брежнев А.Ю., Дорофеев Д.А. Современное состояние офтальмотонометрии. *Вестник офтальмологии* 2020; 136(6):100-107. <https://doi.org/10.17116/oftalma2020136061100>
3. Нестеров А.П., Вургафт М.Б. Калибровочные таблицы для эластонометра Филатова-Кальфа. *Вестник офтальмологии* 1972; 88(2): 20-25.
4. Аветисов С.Э., Бубнова И.А., Антонов А.А. Вариабельность биомеханических свойств фиброзной оболочки глаза в здоровой популяции. *Вестник офтальмологии* 2015; 131(5):20-25. <https://doi.org/10.17116/oftalma2015131520-24>
5. Ehrlich J.R., Radcliffe N.M., Shimmyo M. Goldmann applanation tonometry compared with corneal-compensated intraocular pressure in the evaluation of primary open-angle glaucoma. *BMC ophthalmology* 2012; 12(1):1-7.

Однако результаты имеют высокую клиническую ценность, поскольку в практике часто одновременно используются контактные и бесконтактные апланационные тонометры и их результаты дополняют друг друга. Влияние положения тела на результаты измерения известно, но происходящие изменения могут быть противоположными у разных пациентов, поэтому в большой группе данный эффект может быть нивелирован или, по крайней мере, клинически не значим. Установленная таким образом зависимость, включая калибровочное уравнение и измерительную линейку для определения диапазона значений роговично-компенсированного ВГД с помощью тонометра Маклакова массой 10 г, может применяться для скрининга, диагностики и мониторинга глаукомы.

Результаты апланационной тонометрии в значительной степени зависят от биомеханических свойств фиброзной оболочки глаза.

Популяционное разнообразие свойств роговицы и склеры, выявляемое с помощью биомеханического анализатора, может быть частично нивелировано определением IOPcc.

Результаты тонометрии по Маклакову грузом массой 10 г могут быть представлены в виде диапазона значений ВГД, в котором с определённой вероятностью лежит уровень конкретного пациента. Такой подход позволяет повысить диагностическую ценность офтальмотонометрии при недоступности проведения биомеханических исследований (двухнаправленной апланации или дифференциальной тонометрии).

References

1. Avetisov S.E., Antonov A.A., Vostrukhin S.V., Avetisov K.S. Intraocular pressure measurement inside the anterior chamber: a new technical solution and results. *Vestnik oftalmologii* 2016; 132(6):4-10. <https://doi.org/10.17116/oftalma201613264-10>
2. Antonov A.A., Karlova E.V., Brezhnev A.Yu., Dorofeev D.A. Current state of ophthalmic tonometry. *Vestnik oftalmologii* 2020; 136(6):100-107. <https://doi.org/10.17116/oftalma2020136061100>
3. Nesterov A.P., Vurgaft M.B. Calibration tables for the Filatov-Kalf elastonometer. *Vestnik oftalmologii* 1972; 88(2): 20-25.
4. Avetisov S.E., Bubnova I.A., Antonov A.A. Variability in biomechanical properties of the fibrous tunic of the eye in a healthy population. *Vestnik oftalmologii* 2015; 131(5):20-25. <https://doi.org/10.17116/oftalma2015131520-24>
5. Ehrlich J.R., Radcliffe N.M., Shimmyo M. Goldmann applanation tonometry compared with corneal-compensated intraocular pressure in the evaluation of primary open-angle glaucoma. *BMC ophthalmology* 2012; 12(1):1-7.