

Показатели офтальмотонометрии в здоровой популяции

ЕГОРОВ Е.А., д.м.н., профессор¹;

ЕРИЧЕВ В.П., д.м.н., профессор, руководитель отдела глаукомы²;

КУРОЕДОВ А.В., д.м.н., профессор³;

ПЕТРОВ С.Ю., д.м.н., вед. науч. сотрудник отдела глаукомы²;

АНТОНОВ А.А., к.м.н., вед. науч. сотрудник отдела глаукомы².

¹Кафедра офтальмологии лечебного факультета им. акад. А.П. Нестерова ФГБОУ ВО РНИМУ им. Н.И. Пирогова МЗ, 117997, Российская Федерация, Москва, ул. Островитянова, 1;

²ФГБНУ «НИИ глазных болезней», 119021, Российская Федерация, Москва, ул. Россолимо, 11А;

³ФКУ «ЦВКГ им. П.В. Мандрыка» МО РФ, 107014, Российская Федерация, Москва, ул. Большая Оленья, 8А.

Авторы не получали финансирования при проведении исследования и написании статьи.

Конфликт интересов: отсутствует.

Для цитирования: Егоров Е.А., Еричев В.П., Куроедов А.В., Петров С.Ю., Антонов А.А. Показатели офтальмотонометрии в здоровой популяции. *Национальный журнал глаукома*. 2018; 17(2):91-98.

Резюме

Внутриглазное давление (ВГД) является основным фактором риска развития и прогрессирования глаукомы. Скрининг на глаукому основан в первую очередь на офтальмотонометрических измерениях, и это самая часто повторяемая процедура при обследовании пациентов. В клинической практике для оценки ВГД используют показатели тонометрии, которые тесно связаны с офтальмотонусом, но могут существенно отличаться по абсолютной величине, поэтому нормативы зависят от прибора, применяемого для измерения.

Практически важными являются значения показателей тонометрии в здоровой популяции, определяемые с помощью тонометров Маклакова, Гольдмана, бесконтактных приборов и метода двунаправленной пневмоаппланации роговицы. Исследования, выполненные с использованием тонометра Маклакова, указывают на среднее значение показателя тонометрии в здоровой популяции, равное 20 мм рт.ст. Стандартное отклонение результатов составило в работах 2,5-3 мм рт.ст. Наибольшее количество популяционных исследований офтальмотонуса проведено с помощью тонометра Гольдмана. Средние значения показателя тонометрии для этого прибора в здоровой популяции, по данным авторов, различны, но наиболее частое значение – 16 мм рт.ст. со стандартным отклонением от 2 до 3 мм рт.ст.

Бесконтактные тонометры в большинстве исследований показывают более низкие значения офтальмотонуса, в среднем на 2-3 мм рт.ст., с большим разнообразием результатов, проявляющемся в стандартном отклонении 3-5 мм рт.ст. Нормальные значения роговично-компенсированного ВГД (ЮРсс) распределены аналогично показателю тонометрии по Гольдману, что связано с особенностями калибровки и создания модели измерения. Среднее значение ЮРсс в здоровой популяции равно 16 мм рт.ст. со стандартным отклонением около 2,5 мм рт.ст. Стоит отметить, что распределение значений роговично-компенсированного ВГД является более равномерным.

Таким образом, вопрос нормы ВГД и результатов офтальмотонометрических исследований является более сложным, чем принято в современной офтальмологии. Исследование ВГД в условиях природного популяционного разнообразия, усугубляемого ятрогенными факторами, должно проводиться с помощью методов, реализующих персонализированный подход.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: внутриглазное давление, офтальмотонометрия, роговица, склера, тонометр Маклакова, тонометр Гольдмана, центральная толщина роговицы, роговично-компенсированное ВГД, динамическая контурная тонометрия, точечная контактная тонометрия.

Для контактов:

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

ENGLISH

Tonometric intraocular pressure reference values in healthy population

EGOROV E.A., Med.Sc.D., Professor;

ERICHEV V.P., Med.Sc.D., Professor, Head of Glaucoma Department;

KUROEDOV A.V., Med.Sc.D., Professor;

PETROV S.YU., Med.Sc.D., leading research associate of Glaucoma Department;

ANTONOV A.A., Ph.D., leading research associate of Glaucoma Department.

¹Pirogov Russian National Research Medical University, Ophthalmology Department, 1 Ostrovitianov str., Moscow, Russian Federation, 117997;

²Scientific Research Institute of Eye Diseases, 11A Rossolimo st., Moscow, Russian Federation, 119021;

³Mandryka Central Clinical Military Hospital, 8A Bolshaya Olenya st., Moscow, Russian Federation, 107014.

Conflicts of Interest and Source of Funding: none declared.

For citations: Egorov E.A., Erichev V.P., Kuroedov A.V., Petrov S.Yu., Antonov A.A. Tonometry values of intraocular pressure in healthy population. *Natsional'nyi zhurnal glaucoma*. 2018; 17(2):91-98.

Abstract

Intraocular pressure (IOP) is the main risk factor of glaucoma development and progression. Glaucoma screening is mostly based on performing ocular tonometry – the most frequent procedure in patient examination. Clinical practice uses tonometry values that are closely connected to ocular pressure but may differ significantly in absolute values, which is why normative bases of various tonometry devices differ.

Values obtained with Maklakoff and Goldmann tonometers, non-contact tonometry devices and bidirectional applanation tonometry have a practical importance. Data provided by Maklakoff tonometry establishes a mean tonometry value in healthy population at 20 mm Hg with a standard deviation of 2.5-3.0 mm Hg. Most population-based studies are conducted with the use of Goldmann tonometer.

Its mean tonometry values vary according to different authors, but most prevalently denominated level is 16 mm Hg with a standard deviation of 2-3 mm Hg. Non-

contact tonometers generally show a lower by 2-3 mm Hg IOP level and a higher range of standard deviation (3-5 mm Hg). Corneal compensated IOP values normally have an allocation similar to Goldmann tonometry, which can be explained by specifics of calibration and measurement model development. Its mean value in healthy population is 16 mm Hg with a standard deviation of 2.5 mm Hg. It should also be noted that corneal compensated IOP has less variation in value distribution.

Thus a question of normal IOP values and tonometric measurements is much more complex than is considered to be the case in modern ophthalmology. Intraocular pressure examination in the context of population diversity aggravated by iatrogenic factors should be conducted by adequate means implementing personalized approach.

KEYWORDS: intraocular pressure, tonometry, cornea, sclera, Maklakoff tonometer, Goldmann tonometer, central corneal thickness, corneal-compensated IOP, dynamic contour tonometry, rebound tonometry.

Внутриглазное давление (ВГД) является основным фактором риска развития и прогрессирования глаукомы. В исследовании Advanced Glaucoma Intervention Study (AGIS) доказано, что снижение офтальмотонуса до нормальных значений (менее 18 мм рт.ст. по Гольдману) способствует стабилизации зрительных функций при глаукоме [1].

Скрининг населения на глаукому основан в первую очередь на офтальмотонометрических измерениях. Выявление признаков повышенного ВГД является стимулом для диагностического обследования.

При лечении пациентов с глаукомой главная цель и единственный доказанный механизм стабилизации оптической нейропатии заключается в снижении офтальмотонуса. В исследовании Early Manifest Glaucoma Trial (EMGT) подтверждена роль гипотензивного лечения в уменьшении риска прогрессирования глаукомы [2]. Применение гипотензивных методов направлено на достижение так называемого целевого ВГД [3].

Измерение ВГД — самая часто повторяемая процедура при обследовании пациентов с подозрением на глаукому и мониторинге лиц с верифицированным диагнозом [4].

Учитывая перечисленные факты, ключевым является понятие нормы при определении ВГД.

Сложность в трактовке общепринятых методов офтальмотонометрии связана с отсутствием возможности прямого измерения показателя давления в передней камере глаза, вариабельностью этого показателя и устойчивости к его повышению в популяции. Точное значение ВГД может быть измерено только при инвазивном манометрическом исследовании в условиях операционной [5]. Учитывая сложность методики и отсутствие коммерческих приборов для ее проведения, имеются единичные работы, посвященные данному измерению, результаты которых не могут служить для формирования представления о норме в популяции [6-15].

Офтальмотонометрические методы основаны на деформации фиброзной оболочки глаза с целью косвенного определения ВГД. На результаты таких исследований существенно влияют биомеханические параметры роговицы и склеры, связанные с их биометрическими и структурными характеристиками [16-19]. От механизма измерения зависит ошибка конкретной методики и ее шкала результатов. Разнообразие параметров фиброзной оболочки глаза в популяции столь существенно, что им нельзя пренебречь при проведении офтальмотонометрических исследований [20].

Вторым ключевым моментом в трактовке нормативов офтальмотонуса является калибровка тонометра, материалом для которой, как правило, не являются прижизненные манометрические измерения [21]. Таким образом, стоит понимать, что в клинической практике в оценке ВГД используют показатели тонометрии, которые тесно связаны с офтальмотонусом, но могут существенно отличаться по абсолютной величине.

Исходя из сказанного выше, нормативы офтальмотонуса зависят от прибора, применяемого для измерения. В мировой клинической практике стандартом тонометрических исследований является измерение с помощью тонометра Гольдмана [22]. Методика имеет переменную силу воздействия на глазное яблоко, которой пренебрегают при анализе результатов, считая полученный результат «истинным ВГД». Данный показатель тонометрии называют P_0 и используют не только в практике, но и научных теоретических работах, связанных с глаукомой.

Популярным методом диагностики уровня ВГД за счет возможности быстрого измерения и простоты стала бесконтактная (воздушная) тонометрия [23]. Калибровка приборов этой группы основана на методе Гольдмана, поэтому их шкалу считают совпадающей. Различие в механизме и времени воздействия на глаз может исказить данное соответствие, однако долгое время этот факт считали несущественным для клиники, что закрепилось в сознании практических специалистов.

Одним из стимулов персонализации тонометрических исследований с учетом индивидуальных свойств фиброзной оболочки глаза стало развитие и распространение кераторефракционной хирургии. Поиск способа нивелировать влияние ятрогенно измененной роговицы на определение офтальмотонуса привел к созданию метода двунаправленной пневмоаппланации роговицы и показателя роговично-компенсированного ВГД [24]. Основанный на математической модели и учитывающий широкое распространение метода Гольдмана данный показатель сильнее приближен к давлению в передней камере глаза и изменяется в привычном для зарубежных докторов диапазоне [25].

В отечественной медицине базовым способом определения офтальмотонуса является измерение тонометром Маклакова массой 10 грамм [26]. Результат этого исследования выше, чем P_0 , за счет сильного механического воздействия на глаз. Такой показатель тонометрии называется тонометрическим давлением (P_t), он рассчитывается по диаметру аппланации роговицы в соответствии с калибровочными таблицами [27]. Его различие с «истинным ВГД» имеет нелинейный характер и уменьшается с повышением офтальмотонуса. Имеются способы пересчета результатов тонометрии по Маклакову в значения P_0 , созданные на основании манометрических исследований *ex vivo* [28-30].

Таким образом, в настоящее время важными для практической офтальмологии являются нормативы показателей тонометрии, определяемых с помощью тонометров Маклакова, Гольдмана и метода двунаправленной пневмоаппланации роговицы. Отдельно стоит рассматривать метод динамической контурной тонометрии, который реже применяется в практике, но имеет важное преимущество — совпадение результатов с манометрическими исследованиями *in vivo* [13, 31]. В ряде публикаций авторы указывают на большие значения показателя тонометрии, измеряемого данным способом, в сравнении с тонометрией по Гольдману [32].

Поднимая вопрос о норме тонометрических показателей в популяции, следует разделить все проведенные исследования в соответствии с использованными методами. При исследовании с помощью тонометра Маклакова получаются результаты, превышающие значения, описанные в зарубежной литературе (табл. 1). Традиционное применение тонометрических показателей на постсоветском пространстве привело к двойственным представлениям в классификации и путанице при трактовке литературных данных. Крупнейшие клинические исследования, выполненные с использованием тонометра Маклакова, указывают на среднее значение показателя тонометрии в здоровой популяции, равное 20 мм рт.ст. Стандартное отклонение результатов составило в работах 2,5-3 мм рт.ст., поэтому верхним значением нормы считается величина 26 мм рт.ст.

Таблица 1. Результаты исследований показателей тонометрии в здоровой популяции
 Table 1. Tonometry values in health population

Метод тонометрии Tonometry method	Среднее значение показателя тонометрии, стандартное отклонение или доверительный интервал, мм рт.ст. Mean tonometry value, standard deviation, confidence interval, mm Hg	Автор, год Author, year	Число наблюдений Number of measurements
Маклакова/Maklakoff	27,4* (φ аппланации 6,1 мм) (applanation diameter 6.1 mm)	Маклаков А.Н., 1893 Maklakoff A.N., 1893 [26]	2 271
Маклакова/Maklakoff	23,8 [17,9-29,6]	Мельник Л.С., 1961 Melnik L.S., 1961 [33]	3 386
Маклакова/Maklakoff	23,7 [18,3-29,5]	Нестеров А.П., Черкунов Б.Ф., 1963 Nesterov A.P., Cherkunov B.F., 1963 [34]	427
Маклакова/Maklakoff	23,5 [18,2-28,7]	Белоруссов В.К., 1964 Belorussov V.K., 1964 [35]	2 400
Маклакова/Maklakoff	20 [18-23]	Панина Н.Б., 1971 Panina N.B., 1971 [36]	9 406
Маклакова/Maklakoff	19,9 [17,01-24,06]	Алексеев В.Н., 2001 Alekseev V.N., 2001 [37]	4 902
Шиотца/Shiotz	13,8±3,4	De Venecia G., 1963 [38]	230
Шиотца/Shiotz	14,8±2,59	Shiose Y., 1984 [39]	11 678
Бесконтактный/non-contact	12,0±3,03	Shiose Y., 1984 [39]	10 526
Шиотца/Shiotz	мужчины 14,6±2,52 женщины 15,04±2,33	Shiose Y., Kawase Y., 1986 [40]	151 030 36 292
Гольдмана/Goldmann	16±3	Armaly M.F., 1965 [41]	2 327
Гольдмана/Goldmann	16,5	Leibowitz H.M. et al., 1980 [42]	2 631
Гольдмана/Goldmann	16,2	Costagliola C. et al., 1990 [43]	1 502
Гольдмана/Goldmann	мужчины 15,3±3,2 женщины 15,5±3,3	Klein B. et al., 1992 [44]	2 135 2 721
Гольдмана/Goldmann	15,3±3,2	Klein B.E., 1992 [44]	4 743
Гольдмана/Goldmann	14,6	Qureshi I.A. et al., 1996 [45]	7 201
Гольдмана/Goldmann	16±2	Hornova J., 1997 [46]	240
Гольдмана/Goldmann	15,7±2,7	Emara B. et al., 1998 [47]	288
Гольдмана/Goldmann	11,6±2,6	Mori K. et al., 2000 [48]	70 139
Гольдмана/Goldmann	мужчины 15,1±3,3 женщины 15,8±3,1	Eysteinnsson T. et al., 2002 [49]	415 510
Гольдмана/Goldmann	мужчины 15,8±3,3 женщины 14,8±3,1	Lee J.S. et al., 2002 [50]	13 656
Гольдмана/Goldmann	12,87±2,27	Hashemi H. et al., 2016 [51]	10 312

Примечание: * – тонометрическое давление рассчитано по калибровочным таблицам для эластотонметра Филатова-Кальфа.
Notice: * – tonometric pressure calculations are based on calibration tables for Filatov-Kalf elastotonometer.

Важно отметить постепенное уменьшение показателей тонометрии в исследованиях в хронологическом порядке. Основными причинами данной тенденции, по-видимому, являются изменение калибровочных данных, в том числе создание в 1972 г. современных калибровочных таблиц, а также совершенствование диагностики глаукомы, влияющее на отбор пациентов.

В зарубежной офтальмологии стандартом тонометрии долгое время являлся импрессионный тонометр Шиотца, который начал уступать свое место тонометру Гольдмана только в 50-х годах XX века. При измерении данным механическим тонометром воздействие на глазное яблоко состоит из двух компонентов: постоянной массы измерительной шкалы

(10,5 г) и массы плунжера, которая может изменяться (5,5; 7,5 или 10 г). В клинической практике использовали значения, полученные при импрессионном воздействии массой 5,5 г. Результат взаимодействия прибора с фиброзной оболочкой глаза выражается в единицах шкалы, обратно пропорциональных величине офтальмотонуса. Для практического применения эти значения пересчитывают в миллиметры ртутного столба по калибровочной таблице. Современная шкала преобразования значений тонометра Шиотца предложена в 1955 г. на основании дифференциально-тонометрических исследований J.S. Fridenwald. Средние значения показателя тонометрии данным методом в здоровой популяции составили по результатам клинических работ 14-15 мм рт.ст. при стандартном отклонении 3-3,5 мм рт.ст. Подобные результаты стоит рассматривать как заниженные в сравнении с истинным ВГД. Такое предположение основано на более поздних работах с использованием тонометра Гольдмана и современных манометрических данных, полученных *in vivo*. Следует учитывать, что в работах, посвященных диагностике глаукомы с помощью тонометра Шиотца, верхней границей нормы называют значение 21 мм рт.ст., что соответствует современным представлениям.

Важным фактором, влияющим на тонометрические измерения, является положение тела пациента. Принято считать, что в горизонтальном положении повышается ВГД, и это изменение составляет 2-3 мм рт.ст. Данный факт нельзя упускать из внимания при оценке показателей тонометрии целым рядом современных приборов. Получается, что прямое сопоставление результатов, измеренных лежа и сидя, невозможно, поскольку реакция на перемену положения тела индивидуальна и зависит от целого ряда анатомических и физиологических параметров.

Наибольшее количество популяционных исследований офтальмотонуса проведено с помощью тонометра Гольдмана. Этот прибор является «золотым стандартом» тонометрии в мире и применяется как эталон для сравнения всех современных тонометров. Средние значения показателя тонометрии по Гольдману в здоровой популяции, по данным авторов, различны, но чаще всего получают значение 16 мм рт.ст. со стандартным отклонением от 2 до 3 мм рт.ст. Превышением статистической нормы принято считать значения выше 21 мм рт.ст.

Именно в связи с результатами тонометрии по Гольдману появились первые упоминания о влиянии толщины роговицы в центральной зоне (или центральной толщины роговицы (ЦТР), по аналогии с зарубежной литературой) на показатели офтальмотонуса. Роль данного параметра, по нашему мнению, переоценена в литературе, что обусловлено простотой его измерения и сформировавшимися в офтальмологии традициями. ЦТР называют

основным корректировочным показателем при тонометрических исследованиях и фактором риска развития и прогрессирования глаукомы.

Комплексный анализ причин погрешностей в определении ВГД с помощью тонометрических методик должен учитывать целый ряд биометрических (помимо ЦТР — кривизну и диаметр роговицы, размеры и толщину склеры, глубину передней камеры и т.п.) и биомеханических (например, вязкость, упругость роговицы и склеры) параметров глаза, создаваемых в том числе структурными особенностями коллагена, содержанием жидкости и другими биохимическими факторами. Очевидно, что попытка оценить многообразие индивидуальных условий измерения ВГД в конкретном глазу обречена на неудачу.

Подходы, позволяющие выполнить персонализированное измерение офтальмотонуса, инициированы развитием кераторефракционной хирургии. Среди них стоит выделить двунаправленную пневмоаппланацию роговицы с определением так называемого роговично-компенсированного ВГД и динамическую контурную тонометрию. Перечисленные методы реализованы в доступных приборах, зарегистрированных для медицинского применения более 10 лет назад. Проведено значительное количество исследований, посвященных сравнению данных методов с традиционными. Литературные данные и собственный опыт указывают на большую диагностическую ценность показателей, измеряемых с помощью двунаправленной пневмоаппланации роговицы и динамической контурной тонометрии. Выявлена более сильная связь с прогрессированием глаукомы, чем для результатов по Гольдману.

Нормальные значения роговично-компенсированного ВГД (ЮРсс) распределены аналогично указанному выше традиционному методу, что связано с особенностями калибровки и создания модели измерения. Среднее значение показателя ЮРсс в здоровой популяции равно 16 мм рт.ст. со стандартным отклонением около 2,5 мм рт.ст. Патологическими значениями в литературе также считают показатели, превышающие 21 мм рт.ст. Стоит отметить, что распределение значений роговично-компенсированного ВГД является более равномерным и приближается к гауссову, тогда как для традиционных тонометрических методов указывают на наличие двух или трех максимумов, определяющих так называемые «диапазоны нормы». Алгоритм расчета ЮРсс предполагает снижение влияния индивидуальных свойств роговицы и склеры на результат измерения. Такой показатель тонометрии нивелирует влияние современных кераторефракционных операций, а также популяционного разнообразия в параметрах фиброзной оболочки глаза [52-54]. Анализ результатов современных исследований позволяет предположить, что выявляемые ранее группы с различными показателями тонометрии — это следствие погрешностей, связанных с этим разнообразием.

Дополнительная проблема в трактовке нормальных показателей тонометрии связана с калибровкой современных тонометров. Сравнительные исследования с манометрией *in vivo* представлены только для динамической контурной тонометрии. Результаты, получаемые с помощью этого метода, по данным ряда авторов, превышают показатели тонометрии по Гольдману на 2-3 мм рт.ст. [55-57]. Средние значения офтальмотонуса, определенного динамическим контурным тонометром в здоровой популяции, составили от 17 до 20 мм рт.ст. со стандартным отклонением в диапазоне от 2,5 до 4,5 мм рт.ст.

Среди применяемых в офтальмологии тонометров имеются приборы, целью создания которых было повторение результатов тонометрии по Гольдману при упрощении методики измерения или обеспечении портативности. Бесконтактные тонометры, Топорев, тонометр Перкинса, точечный контактный тонометр iCare и другие диагностические устройства имеют сравнительную калибровку. Результаты измерения такими приборами в здоровой популяции, как правило, лежат в диапазоне нормы для тонометра Гольдмана со средним значением 16 мм рт.ст.

Однако различия в механизме определения показателя тонометрии приводят к погрешностям. Бесконтактные тонометры в большинстве исследований показывают более низкие значения офтальмотонуса, в среднем на 2-3 мм рт.ст., с большим разнообразием результатов, проявляющемся в стандартном отклонении 3-5 мм рт.ст.

Литература

- Heijl A., Leske M.C., Bengtsson B., Hyman L., Bengtsson B., Hussein M. Reduction of intraocular pressure and glaucoma progression: results from the Early Manifest Glaucoma Trial. *Arch Ophthalmol.* 2002; 120(10):1268-1279.
- Leske M.C., Heijl A., Hussein M., Bengtsson B., Hyman L., Komaroff E. Factors for glaucoma progression and the effect of treatment: the early manifest glaucoma trial. *Arch Ophthalmol.* 2003; 121(1):48-56.
- Jampel H.D. Glaucoma care update target pressure in glaucoma therapy. *J Glaucoma.* 1997; 6(2):133-138.
- Holló G., Hommer A. The status of glaucoma diagnostics and care in Europe in 2015: a European survey. *Eur J Ophthalmol.* 2016; 26(3):216-220.
- Smith P. The Blood-Pressure in the eye and its relation to the chamber pressure. *Brit J Ophthalmol.* 1923; 7(10):449.
- Pallikaris I.G., Kymionis G.D., Ginis H.S., Kounis G.A., Tsilimbaris M.K. Ocular rigidity in living human eyes. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2005; 46(2):409-414. doi: 10.1167/iovs.04-0162.
- Boehm A.G., Weber A., Pillunat L.E., Koch R., Spoerl E. Dynamic contour tonometry in comparison to intracameral IOP measurements. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2008; 49(6):2472-2477. doi: 10.1167/iovs.07-1366.
- Yu A.-Y., Duan S.-F., Zhao Y.-E., Li X.-Y., Lu F., Wang J., Wang Q.-M. Correlation between corneal biomechanical properties, applanation tonometry and direct intracameral tonometry. *Brit J Ophthalmol.* 2012; 96(5):640-644.
- Pallikaris I.G., Kymionis G.D., Ginis H.S., Kounis G.A., Christodoulakis E., Tsilimbaris M.K. Ocular rigidity in patients with age-related macular degeneration. *Am J Ophthalmol.* 2006; 141(4):611-611. e617.
- Kymionis G.D., Diakonis V.F., Kounis G., Bouzoukis D., Charisis S., Ginis H., Yoo S., Tsilimbaris M., Pallikaris I.G. Ocular rigidity evaluation after photorefractive keratectomy: an experimental study. *J Refract Surg.* 2008; 24(2):173-177.

Точечная контактная тонометрия (называемая в зарубежной литературе rebound tonometry) является достаточно молодым способом измерения офтальмотонуса. Простота и удобство методики, портативность, применение одноразовых наконечников, отсутствие потребности в анестетике привели к активному исследованию данного метода. Результаты работ указывают на высокую точность определения показателей тонометрии, хорошую повторяемость и средние значения 15-17 мм рт.ст. Выявлено, что результаты тонометров iCare меньше зависят от индивидуальных параметров фиброзной оболочки глаза, чем данные тонометрии по Гольдману и бесконтактных приборов. Верхняя граница диапазона статистической нормы для точечной контактной тонометрии также соответствует 21 мм рт.ст.

Таким образом, вопрос нормы ВГД и результатов офтальмотонометрических исследований является более сложным, чем принято в современной офтальмологии. Развитие знаний о биомеханических свойствах фиброзной оболочки глаза диктует необходимость пересмотра подходов к определению офтальмотонуса. Очевидной является необходимость прижизненной калибровки тонометров с помощью современных высокоточных манометрических измерений. Исследование ВГД в условиях природного популяционного разнообразия, усугубляемого ятрогенными факторами, должно проводиться с помощью методов, реализующих персонализированный подход.

References

- Heijl A., Leske M.C., Bengtsson B., Hyman L., Bengtsson B., Hussein M. Reduction of intraocular pressure and glaucoma progression: results from the Early Manifest Glaucoma Trial. *Arch Ophthalmol.* 2002; 120(10):1268-1279.
- Leske M.C., Heijl A., Hussein M., Bengtsson B., Hyman L., Komaroff E. Factors for glaucoma progression and the effect of treatment: the early manifest glaucoma trial. *Arch Ophthalmol.* 2003; 121(1):48-56.
- Jampel H.D. Glaucoma care update target pressure in glaucoma therapy. *J Glaucoma.* 1997; 6(2):133-138.
- Holló G., Hommer A. The status of glaucoma diagnostics and care in Europe in 2015: a European survey. *Eur J Ophthalmol.* 2016; 26(3):216-220.
- Smith P. The Blood-Pressure in the eye and its relation to the chamber pressure. *Brit J Ophthalmol.* 1923; 7(10):449.
- Pallikaris I.G., Kymionis G.D., Ginis H.S., Kounis G.A., Tsilimbaris M.K. Ocular rigidity in living human eyes. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2005; 46(2):409-414. doi: 10.1167/iovs.04-0162.
- Boehm A.G., Weber A., Pillunat L.E., Koch R., Spoerl E. Dynamic contour tonometry in comparison to intracameral IOP measurements. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2008; 49(6):2472-2477. doi: 10.1167/iovs.07-1366.
- Yu A.-Y., Duan S.-F., Zhao Y.-E., Li X.-Y., Lu F., Wang J., Wang Q.-M. Correlation between corneal biomechanical properties, applanation tonometry and direct intracameral tonometry. *Brit J Ophthalmol.* 2012; 96(5):640-644.
- Pallikaris I.G., Kymionis G.D., Ginis H.S., Kounis G.A., Christodoulakis E., Tsilimbaris M.K. Ocular rigidity in patients with age-related macular degeneration. *Am J Ophthalmol.* 2006; 141(4):611-611. e617.
- Kymionis G.D., Diakonis V.F., Kounis G., Bouzoukis D., Charisis S., Ginis H., Yoo S., Tsilimbaris M., Pallikaris I.G. Ocular rigidity evaluation after photorefractive keratectomy: an experimental study. *J Refract Surg.* 2008; 24(2):173-177.

11. Dastiridou A.I., Ginis H.S., De Brouwere D., Tsilimbaris M.K., Pallikaris I.G. Ocular rigidity, ocular pulse amplitude, and pulsatile ocular blood flow: the effect of intraocular pressure. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2009; 50(12):5718-5722.
12. Kniestedt C., Nee M., Stamper R.L. Dynamic contour tonometry: a comparative study on human cadaver eyes. *Arch Ophthalmol.* 2004; 122(9):1287-1293. doi: 10.1001/archophth.122.9.1287.
13. Boehm A.G., Weber A., Pillunat L.E., Koch R., Spoerl E. Dynamic contour tonometry in comparison to intracameral IOP measurements. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2008; 49(6):2472-2477.
14. Feltgen N., Leifert D., Funk J. Correlation between central corneal thickness, applanation tonometry, and direct intracameral IOP readings. *Brit J Ophthalmol.* 2001; 85(1):85-87.
15. Eisenberg D.L., Sherman B.G., McKeown C.A., Schuman J.S. Tonometry in adults and children: A manometric evaluation of pneumatometry, applanation, and TonoPen in vitro and in vivo. *Ophthalmology.* 1998; 105(7):1173-1181.
16. Егоров Е.А., Васина М.В. Влияние толщины роговицы на уровень внутриглазного давления среди различных групп пациентов. *РМЖ Клиническая офтальмология.* 2006; (1):16-19.
17. Алексеев В.Н., Литвин И.Б. Влияние толщины роговицы на уровень внутриглазного давления и прогноз при первичной открытоугольной глаукоме. *РМЖ Клиническая офтальмология.* 2008; 9(4):130-133.
18. Аветисов С.Э., Бубнова И.А., Антонов А.А. Исследование влияния биомеханических свойств роговицы на показатели тонометрии. *Бюллетень СО РАМН.* 2009; 138(4):30-33.
19. Аветисов С.Э., Петров С.Ю., Бубнова И.А., Антонов А.А., Аветисов К.С. Влияние центральной толщины роговицы на результаты тонометрии (обзор литературы). *Вестник офтальмологии.* 2008; 124(5):1-7.
20. Аветисов С.Э., Бубнова И.А., Антонов А.А. К вопросу о нормальных значениях биомеханических параметров фиброзной оболочки глаза. *Национальный журнал глаукома.* 2012; 11(3):5-11.
21. Нестеров А.П., Вургафт М.Б. Калибровочные таблицы для эластотонометра Филатова-Кальфа. *Вестник офтальмологии.* 1972; 88(2):20-25.
22. Goldmann H., Schmidt T. Über applanationstonometrie. *Ophthalmologica.* 1957; 134(4):221-242.
23. Grolman B. A new tonometer system. *Optom Vis Sci.* 1972; 49(8):646-660.
24. Luce D.A. Determining in vivo biomechanical properties of the cornea with an ocular response analyzer. *J Cataract Refract Surg.* 2005; 31(1):156-162.
25. 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; 12:52. doi: 10.1186/1471-2415-12-52.
26. Маклаков А.Н. Еще по поводу офтальмотонометрии. *Хирургическая летопись.* 1893 (4):1-11.
27. Нестеров А.П., Вургафт М.Б. О калибровке эластотонометра Филатова-Кальфа. *Офтальмологический журнал.* 1975; 30(1):46-48.
28. Белоруссов В.К. Определение истинного внутриглазного давления методом эластотонометрии по Филатову-Кальфа. *Офтальмологический журнал.* 1966; 21(3):175-179.
29. Вагин Б.И. Калибровочные таблицы для оптико-механического тонометра. *Вестник офтальмологии.* 1977; 93(4):15-17.
30. Шерстнева Л.В. Значение показателя истинного внутриглазного давления в ранней диагностике глаукомы. *Вестник офтальмологии.* 1980; 96(6):18-20.
31. Riva I., Quaranta L., Russo A., Katsanos A., Rulli E., Floriani I. Dynamic contour tonometry and Goldmann applanation tonometry: correlation with intracameral assessment of intraocular pressure. *Eur J Ophthalmol.* 2012; 22(1):55-62.
32. Ceruti P., Morbio R., Marraffa M., Marchini G. Comparison of Goldmann applanation tonometry and dynamic contour tonometry in healthy and glaucomatous eyes. *Eye.* 2009; 23(2):262-269. doi: 10.1038/sj.eye.6703102.
33. Мельник Л.С. О нормах эластотонометрических кривых. *Офтальмологический журнал.* 1961; 16(4):221.
34. Нестеров А.П., Черкунов Б.Ф. Эластотонометрические исследования нормальных глаз. Сборник научных трудов кафедры глазных болезней Куйбышевского мединститута. Куйбышев: 1963; 97-99.
35. Белоруссов В.К. О нормах эластотонометрических кривых у лиц разных возрастных категорий. *Офтальмологический журнал.* 1964; 19(5):326-331.
11. Dastiridou A.I., Ginis H.S., De Brouwere D., Tsilimbaris M.K., Pallikaris I.G. Ocular rigidity, ocular pulse amplitude, and pulsatile ocular blood flow: the effect of intraocular pressure. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2009; 50(12):5718-5722.
12. Kniestedt C., Nee M., Stamper R.L. Dynamic contour tonometry: a comparative study on human cadaver eyes. *Arch Ophthalmol.* 2004; 122(9):1287-1293. doi: 10.1001/archophth.122.9.1287.
13. Boehm A.G., Weber A., Pillunat L.E., Koch R., Spoerl E. Dynamic contour tonometry in comparison to intracameral IOP measurements. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2008; 49(6):2472-2477.
14. Feltgen N., Leifert D., Funk J. Correlation between central corneal thickness, applanation tonometry, and direct intracameral IOP readings. *Brit J Ophthalmol.* 2001; 85(1):85-87.
15. Eisenberg D.L., Sherman B.G., McKeown C.A., Schuman J.S. Tonometry in adults and children: A manometric evaluation of pneumatometry, applanation, and TonoPen in vitro and in vivo. *Ophthalmology.* 1998; 105(7):1173-1181.
16. Egorov E.A., Vasina M.V. Corneal thickness influence on the intraocular pressure level in the different groups of patients. *RMJ Clinical Ophthalmology.* 2006; (1):16-19. (In Russ.).
17. Alekseev V.N., Litvin I.B. Influence of corneal thickness on IOP level and prognosis in POAG. *RMJ Clinical Ophthalmology.* 2008; 9(4):130-133. (In Russ.).
18. Avetisov S.E., Bubnova I.A., Antonov A.A. The study of the effect of the corneal biomechanical properties on the intraocular pressure measurement. *The Siberian Scientific Medical Journal.* 2009; 138(4):30-33. (In Russ.).
19. Avetisov S.E., Petrov S.Yu., Bubnova I.A., Antonov A.A., Avetisov K.S. Impact of the central thickness of the cornea on the results of tonometry (a review of literature). *Vestn oftalmol.* 2008; 124(5):1-7. (In Russ.).
20. Avetisov S.E., Bubnova I.A., Antonov A.A. Standard indices of the biomechanical properties of corneal-scleral capsule of the eye. *Natsional'nyi zhurnal glaukoma.* 2012; 11(3):5-11. (In Russ.).
21. Nesterov A.P., Vurgaft M.B. Calibration tables for the Filatov-Kalf elastotonometer. *Vestn oftalmol.* 1972; 88(2):20-25. (In Russ.).
22. Goldmann H., Schmidt T. Über applanationstonometrie. *Ophthalmologica.* 1957; 134(4):221-242.
23. Grolman B. A new tonometer system. *Optom Vis Sci.* 1972; 49(8):646-660.
24. Luce D.A. Determining in vivo biomechanical properties of the cornea with an ocular response analyzer. *J Cataract Refract Surg.* 2005; 31(1):156-162.
25. 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; 12:52. doi: 10.1186/1471-2415-12-52.
26. Maklakov A.N. More of ophthalmotonometry. *Khirurgicheskaya letopis'.* 1893 (4):1-11.
27. Nesterov A.P., Vurgaft M.B. Nesterov A.P., Vurgaft M.B. Of the Filatov-Kalf elastotonometer calibration. *Journal of Ophthalmology (Ukraine).* 1975; 30(1):46-48. (In Russ.).
28. Belorussov V.K. Definition of the actual intraocular pressure by the method of Filatov-Kalf elastotonometer. *Journal of Ophthalmology (Ukraine).* 1966; 21(3):175-179. (In Russ.).
29. Vagin B.I. Calibration charts for the opticomechanical tonometer. *Vestn oftalmol.* 1977; 93(4):15-17. (In Russ.).
30. Sherstneva L.V. Value of the measurement of true intraocular pressure in early diagnosis of glaucoma. *Vestn oftalmol.* 1980; 96(6):18-20. (In Russ.).
31. Riva I., Quaranta L., Russo A., Katsanos A., Rulli E., Floriani I. Dynamic contour tonometry and Goldmann applanation tonometry: correlation with intracameral assessment of intraocular pressure. *Eur J Ophthalmol.* 2012; 22(1):55-62.
32. Ceruti P., Morbio R., Marraffa M., Marchini G. Comparison of Goldmann applanation tonometry and dynamic contour tonometry in healthy and glaucomatous eyes. *Eye.* 2009; 23(2):262-269. doi: 10.1038/sj.eye.6703102.
33. Melnik L.S. On the norms of the elastotonometry curves. *Journal of Ophthalmology (Ukraine).* 1961;16(4):221.
34. Nesterov A.P., Cherkunov B.F. Elastotonometric examinations of the normal eyes. Collection of scientific articles of Kuybyshev Medical Institute. Kuybyshev, 1963. 97-99 pp. (In Russ.).
35. Belorussov V.K. On the normal elastotonometric curves of people of different age categories. *Journal of Ophthalmology (Ukraine).* 1964; 19(5):326-331. (In Russ.).

36. Панина Н.Б. О нормах внутриглазного давления. Глаукома и другие заболевания глаз. 1971;7-12.
37. Алексеев В.Н., Егоров Е.А., Мартынова Е.Б. О распределении уровней внутриглазного давления в нормальной популяции. *РМЖ Клиническая офтальмология*. 2001; 2(2):38-40.
38. De Venecia G., Davis M.D. Diurnal variation of intraocular pressure in the normal eye. *Arch Ophthalmol*. 1963;69:752-757.
39. Shiose Y. The aging effect on intraocular pressure in an apparently normal population. *Arch Ophthalmol*. 1984;102(6):883-887.
40. Shiose Y., Kawase Y. A new approach to stratified normal intraocular pressure in a general population. *Am J Ophthalmol*. 1986; 101(6):714-721.
41. Armaly M.F. On the distribution of applanation pressure: I. Statistical features and the effect of age, sex, and family history of glaucoma. *Arch Ophthalmol*. 1965; 73(1):11-18.
42. Leibowitz H.M., Krueger D., Maunder L., Milton R., Kini M., Kahn H., Nickerson R., Pool J., Colton T., Ganley J. The Framingham Eye Study monograph: An ophthalmological and epidemiological study of cataract, glaucoma, diabetic retinopathy, macular degeneration, and visual acuity in a general population of 2631 adults, 1973-1975. *Surv Ophthalmol*. 1980; 24(Suppl):335-610.
43. Costagliola C., Trapanese A., Pagano M. Intraocular pressure in a healthy population: a survey of 751 subjects. *Optom Vis Sci*. 1990; 67(3):204-206.
44. Klein B., Klein R., Linton K. Intraocular pressure in an American community. The Beaver Dam Eye Study. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 1992; 33(7):2224-2228.
45. Qureshi I.A., Xi X.R., Huang Y.B., Lu H.J., Wu X.D., Shiarkar E. Distribution of intraocular pressure among healthy Pakistani. *Chin J Physiol*. 1996; 39(3):183-188.
46. Hornova J. [Normal intraocular pressure values in the Czech population]. *Cesk Slov Oftalmol*. 1997; 53(2):88-93.
47. Emara B., Probst L.E., Tingey D.P., Kennedy D.W., Willms L.J., Machat J. Correlation of intraocular pressure and central corneal thickness in normal myopic eyes and after laser in situ keratomileusis. *J Cataract Refract Surg*. 1998; 24(10):1320-1325.
48. Mori K., Ando F., Nomura H., Sato Y., Shimokata H. Relationship between intraocular pressure and obesity in Japan. *Intern J Epidemiol*. 2000; 29(4):661-666. doi: 10.1093/ije/29.4.661.
49. Eysteinnsson T., Jonasson F., Sasaki H., Arnarsson A., Sverrisson T., Sasaki K., Stefansson E., Reykjavik Eye Study G. Central corneal thickness, radius of the corneal curvature and intraocular pressure in normal subjects using non-contact techniques: Reykjavik Eye Study. *Acta Ophthalmol Scand*. 2002; 80(1):11-15.
50. Lee J.S., Lee S.H., Oum B.S., Chung J.S., Cho B.M., Hong J.W. Relationship between intraocular pressure and systemic health parameters in a Korean population. *Clin Exper Ophthalmol*. 2002; 30(4):237-241.
51. Hashemi H., Khabazkhoob M., Emamian M.H., Shariati M., Yekta A., Fotouhi A. Distribution of intraocular pressure and its determinants in an Iranian adult population. *International J Ophthalmol*. 2016; 9(8):1207.
52. Oncel B., Dinc U.A., Gorgun E., Yalvac B.I. Diurnal variation of corneal biomechanics and intraocular pressure in normal subjects. *Eur J Ophthalmol*. 2009; 19(5):798-803.
53. Pepose J.S., Feigenbaum S.K., Qazi M.A., Sanderson J.P., Roberts C.J. Changes in corneal biomechanics and intraocular pressure following LASIK using static, dynamic, and noncontact tonometry. *Am J Ophthalmol*. 2007; 143(1):39-47. doi: 10.1016/j.ajo.2006.09.036.
54. Аветисов С.Э., Бубнова И.А., Антонов А.А. Клинико-экспериментальные аспекты изучения биомеханических свойств фиброзной оболочки глаза. *Вестник офтальмологии*. 2013; 129(5):83-91.
55. Ozcura F., Yildirim N., Sahin A., Colak E. Comparison of Goldmann applanation tonometry, rebound tonometry and dynamic contour tonometry in normal and glaucomatous eyes. *International J Ophthalmol*. 2015; 8(2):299-304. doi: 10.3980/j.issn.2222-3959.2015.02.15.
56. Pal D., Sengupta J. Comparison of Goldmann tonometry and dynamic contour tonometry in normal and descemet stripping endothelial keratoplasty eyes. *Asia Pac J Ophthalmol (Phila)*. 2013; 2(3):159-164. doi: 10.1097/APO.0b013e31828dfd81.
57. Realini T., Weinreb R.N., Hobbs G. Correlation of intraocular pressure measured with goldmann and dynamic contour tonometry in normal and glaucomatous eyes. *J Glaucoma*. 2009; 18(2):119-123. doi: 10.1097/IJG.0b013e31817d23c7.
36. Panina N.B. On the normal intraocular pressure. Glaucoma and other eye diseases. 1971;7-12. (In Russ.)
37. Alekseev V.N., Egorov E.A., Martynova E.B. On the intraocular pressure levels distribution in the normal population. *RMJ Clinical Ophthalmology*. 2001; 2(2):38-40. (In Russ.)
38. De Venecia G., Davis M.D. Diurnal variation of intraocular pressure in the normal eye. *Arch Ophthalmol*. 1963;69:752-757.
39. Shiose Y. The aging effect on intraocular pressure in an apparently normal population. *Arch Ophthalmol*. 1984;102(6):883-887.
40. Shiose Y., Kawase Y. A new approach to stratified normal intraocular pressure in a general population. *Am J Ophthalmol*. 1986; 101(6):714-721.
41. Armaly M.F. On the distribution of applanation pressure: I. Statistical features and the effect of age, sex, and family history of glaucoma. *Arch Ophthalmol*. 1965; 73(1):11-18.
42. Leibowitz H.M., Krueger D., Maunder L., Milton R., Kini M., Kahn H., Nickerson R., Pool J., Colton T., Ganley J. The Framingham Eye Study monograph: An ophthalmological and epidemiological study of cataract, glaucoma, diabetic retinopathy, macular degeneration, and visual acuity in a general population of 2631 adults, 1973-1975. *Surv Ophthalmol*. 1980; 24(Suppl):335-610.
43. Costagliola C., Trapanese A., Pagano M. Intraocular pressure in a healthy population: a survey of 751 subjects. *Optom Vis Sci*. 1990; 67(3):204-206.
44. Klein B., Klein R., Linton K. Intraocular pressure in an American community. The Beaver Dam Eye Study. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 1992; 33(7):2224-2228.
45. Qureshi I.A., Xi X.R., Huang Y.B., Lu H.J., Wu X.D., Shiarkar E. Distribution of intraocular pressure among healthy Pakistani. *Chin J Physiol*. 1996; 39(3):183-188.
46. Hornova J. [Normal intraocular pressure values in the Czech population]. *Cesk Slov Oftalmol*. 1997; 53(2):88-93.
47. Emara B., Probst L.E., Tingey D.P., Kennedy D.W., Willms L.J., Machat J. Correlation of intraocular pressure and central corneal thickness in normal myopic eyes and after laser in situ keratomileusis. *J Cataract Refract Surg*. 1998; 24(10):1320-1325.
48. Mori K., Ando F., Nomura H., Sato Y., Shimokata H. Relationship between intraocular pressure and obesity in Japan. *Intern J Epidemiol*. 2000; 29(4):661-666. doi: 10.1093/ije/29.4.661.
49. Eysteinnsson T., Jonasson F., Sasaki H., Arnarsson A., Sverrisson T., Sasaki K., Stefansson E., Reykjavik Eye Study G. Central corneal thickness, radius of the corneal curvature and intraocular pressure in normal subjects using non-contact techniques: Reykjavik Eye Study. *Acta Ophthalmol Scand*. 2002; 80(1):11-15.
50. Lee J.S., Lee S.H., Oum B.S., Chung J.S., Cho B.M., Hong J.W. Relationship between intraocular pressure and systemic health parameters in a Korean population. *Clin Exper Ophthalmol*. 2002; 30(4):237-241.
51. Hashemi H., Khabazkhoob M., Emamian M.H., Shariati M., Yekta A., Fotouhi A. Distribution of intraocular pressure and its determinants in an Iranian adult population. *International J Ophthalmol*. 2016; 9(8):1207.
52. Oncel B., Dinc U.A., Gorgun E., Yalvac B.I. Diurnal variation of corneal biomechanics and intraocular pressure in normal subjects. *Eur J Ophthalmol*. 2009; 19(5):798-803.
53. Pepose J.S., Feigenbaum S.K., Qazi M.A., Sanderson J.P., Roberts C.J. Changes in corneal biomechanics and intraocular pressure following LASIK using static, dynamic, and noncontact tonometry. *Am J Ophthalmol*. 2007; 143(1):39-47. doi: 10.1016/j.ajo.2006.09.036.
54. Avetisov S.E., Bubnova I.A., Antonov A.A. Clinical and experimental aspects of investigation of biomechanical properties of corneoscleral shell. *Vestn oftalmol*. 2013; 129(5):83-91. (In Russ.)
55. Ozcura F., Yildirim N., Sahin A., Colak E. Comparison of Goldmann applanation tonometry, rebound tonometry and dynamic contour tonometry in normal and glaucomatous eyes. *International J Ophthalmol*. 2015; 8(2):299-304. doi: 10.3980/j.issn.2222-3959.2015.02.15.
56. Pal D., Sengupta J. Comparison of Goldmann tonometry and dynamic contour tonometry in normal and descemet stripping endothelial keratoplasty eyes. *Asia Pac J Ophthalmol (Phila)*. 2013; 2(3):159-164. doi: 10.1097/APO.0b013e31828dfd81.
57. Realini T., Weinreb R.N., Hobbs G. Correlation of intraocular pressure measured with goldmann and dynamic contour tonometry in normal and glaucomatous eyes. *J Glaucoma*. 2009; 18(2):119-123. doi: 10.1097/IJG.0b013e31817d23c7.