



<https://doi.org/10.21516/2072-0076-2022-15-2-supplement-49-56>

Метод измерения внутриглазного давления с использованием технологий искусственного интеллекта и аппланационной тонометрии с фиксированной силой

Д.А. Дорофеев¹, А.А. Антонов², Д.Ю. Василенко³, А.В. Горобец^{4, 5}, К.А. Ефимова¹, Е.В. Канафин⁵, Е.В. Карлова⁶, Е.В. Кирилик¹, И.В. Козлова², Е.Р. Орлова⁷, А.З. Цыганов⁸ ✉

¹ МАУЗ «Городская клиническая больница № 2», поликлиника № 1, ул. Российская, д. 200, Челябинск, 454090, Россия

² ФГБНУ «Научно-исследовательский институт глазных болезней», ул. Россолимо, д. 11а, б, Москва, 119021, Россия

³ LTD Aplit, Моше Авив, д. 6, Ор-Йехуда, 60371, Израиль

⁴ МУДО «Центр дополнительного образования» Каслинского муниципального района, ул. Стадионная, д. 87, Касли, Челябинская обл., 456835, Россия

⁵ ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ), Институт естественных и точных наук, пр. Ленина, д. 76, Челябинск, 454080, Россия

⁶ ГБУЗ «Самарская областная клиническая офтальмологическая больница им. Т.И. Ерошевского», ул. Ново-Садовая, д. 158, Самара, 443068, Россия

⁷ ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет», ул. Братьев Кашириных, д. 129, Челябинск, 454001, Россия

⁸ ФГАУ НМИЦ «МНТК «Микрохирургия глаза» им. акад. С.Н. Федорова» Минздрава России, Бескудниковский бульвар, д. 59а, Москва, 127486, Россия

Цель — сравнительная оценка точности измерения офтальмотонуса с использованием технологий искусственного интеллекта и аппланационной тонометрии с фиксированной силой. **Материал и методы.** Исследование включало 290 пациентов (576 глаз), которым была проведена тонометрия по Маклакову с фиксированной силой — весом тонометра 5, 10 и 15 г с использованием модифицированной методики эластотониметрии и последующим анализом качества отпечатков и измерений их диаметра с помощью трех независимых экспертов-офтальмологов. Для проверки повторяемости и воспроизводимости измерений отпечатки были загружены в нейронную сеть. **Результаты.** Сравнение диаметров отпечатков тонометра Маклакова, определенных с помощью искусственного интеллекта на основе нейронной сети, с данными измерения трех экспертов показало, что нейронная сеть недооценивает результаты измерений в среднем на 0,27 (–3,81; 4,35) мм рт. ст. В то же время коэффициент внутриклассовой корреляции для всех отпечатков составил 98,3%. Точность измерения диаметра отпечатков нейронной сетью различается для тонометров разного веса: для тонометра 5 г различие составило 0,06 (–3,38; 3,49) мм рт. ст., для тонометров 10 г и 15 г — –0,14 (–3,8; 3,51) и 0,95 (–3,84; 5,74) мм рт. ст. соответственно. **Заключение.** Показана высокая точность и воспроизводимость измерений нейронной сетью, превосходящая воспроизводимость измерений, выполненных человеком.

Ключевые слова: глаукома; аппланационная тонометрия; внутриглазное давление; офтальмотонометрия; искусственный интеллект; тонометрия с фиксированной силой

Конфликт интересов: отсутствует.

Прозрачность финансовой деятельности: никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Для цитирования: Дорофеев Д.А., Антонов А.А., Василенко Д.Ю., Горобец А.В., Ефимова К.А., Канафин Е.В., Карлова Е.В., Кирилик Е.В., Козлова И.В., Орлова Е.Р., Цыганов А.З. Метод измерения внутриглазного давления с использованием технологий искусственного интеллекта и аппланационной тонометрии с фиксированной силой. Российский офтальмологический журнал. 2022; 15 (2) (Приложение): 49-56. <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2022-15-2-supplement-49-56>

A method for measuring intraocular pressure using artificial intelligence technology and fixed-force applanation tonometry

Dmitry A. Dorofeev¹, Alexey A. Antonov², Denis Yu. Vasilenko³, Alexander V. Gorobets^{4, 5}, Ksenia A. Efimova¹, Evgeny V. Kanafin⁵, Elena V. Karlova⁶, Elena V. Kirilik¹, Irina V. Kozlova², Elizaveta R. Orlova⁷, Artem Z. Tsyganov⁸ ✉

¹ City Clinical Hospital No. 2, Clinic No. 1, 200 Rossiyskaya St., Chelyabinsk, 454090, Russia

² Research Institute of Eye Diseases, 11A, B, Rossolimo St., Moscow, 119021, Russia

³ LTD Aplit, Moshe Aviv, 6 Or-Yehuda, 60371, Israel

⁴ Center of additional Education, 87, Stadionnaya St, Kasli, Chelyabinsk Region, 456835, Russia

⁵ South Ural State University (National Research University), 76, Lenin Avenue, Chelyabinsk, 454080, Russia

⁶ Eroshevsky Regional Clinical Eye Hospital, 158, Novo-Sadovaya St., Samara, 443068, Russia

⁷ Chelyabinsk State University, 129, Brat'yev Kashirinykh St., Chelyabinsk, 454001, Russia

⁸ S.N. Fedorov Eye Microsurgery Complex, 59a, Beskudnikovsky Boulevard, Moscow, 127486, Russia
zokogama@yandex.ru

Purpose. To estimate the accuracy of IOP measurement using artificial intelligence (AI) technologies and applanation tonometry with fixed strength. **Material and methods.** 290 patients (576 eyes) underwent applanation tonometry according to Maklakov with tonometer weights of 5, 10, and 15 g using a modified elastotonometry technique followed by an analysis of impression quality and diameter measurements by three independent ophthalmologist experts. The prints were then fed into a neural network to check the repeatability and reproducibility of the measurements. **Results.** The comparison of the diameters of the Maklakov tonometer prints determined by AI based on the neural network with the measurements data provided by three experts showed that neural network underestimates the measurement results by an average of 0.27 (–3.81; 4.35) mm Hg. At the same time, the intraclass correlation coefficient for all prints was 98.3%. The accuracy of diameter measurements of prints by neural network differs for tonometers of different weights, e.g. for a 5 g tonometer the difference was 0.06 (–3.38; 3.49) mm Hg, for 10 g and 15 g tonometers was 0.14 (–3.8; 3.51) and 0.95 (–3.84; 5.74) mm Hg, respectively. **Conclusion.** High accuracy and reproducibility of the measurements by the neural network, was shown to surpass the reproducibility of human-implemented measurements.

Keywords: glaucoma; applanation tonometry; intraocular pressure; ophthalmotonometry; artificial intelligence; fixed force tonometry

Conflict of interests: there is no conflict of interests.

Financial disclosure: No author has a financial or property interest in any material or method mentioned.

For citation: Dorofeev D.A., Antonov A.A., Vasilenko D.Yu., Gorobets A.V., Efimova K.A., Kanafin E.V., Karlova E.V., Kirilik E.V., Kozlova I.V., Orlova E.R., Tsyganov A.Z. A method for measuring intraocular pressure using artificial intelligence technology and fixed-force applanation tonometry. Russian ophthalmological journal. 2022; 15 (2) (supplement): 49–56 (In Russian). <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2022-15-2-supplement-49-56>

По данным ВОЗ, в настоящее время в мире насчитывается около 2 млрд человек, страдающих теми или иными нарушениями зрения. Однако во многих странах офтальмологическая помощь не всегда доступна в полном объеме, особенно в отдаленных районах с низкими экономическими возможностями [1]. Для стандартного офтальмологического обследования требуется немало дорогостоящего оборудования, что затрудняет оказание высокотехнологичной помощи населению [2]. На помощь современному офтальмологу нередко приходят получающие все большее распространение смартфоны, для которых разработан и внедрен в практику ряд программ и приложений, позволяющих выполнять некоторые диагностические процедуры, например проверку остроты зрения [3, 4]. Наряду с этим существуют также специальные насадки для получения изображений глазного яблока [5, 6]. Проведенный метаанализ выявил соответствие между изображениями глазного дна, полученными с помощью смартфона, и изображениями фундус-камеры, являющимися золотым стандартом при оценке диабетической ретинопатии [7–9], соотношения Э/Д [10, 11] и ретинопатии недоношенных [12].

Офтальмотонометрия — важный метод диагностики в офтальмологии [13]. Повышенное внутриглазное давление (ВГД), являясь одним из основных факторов риска развития глаукомы [14, 15], при отсутствии лечения может достаточно быстро привести к необратимой потере зрения [16–20]. Методик измерения ВГД, используемых в современной офтальмологической практике, достаточно много. Все они имеют право на существование. Однако простой способ оценки уровня ВГД на базе смартфона еще не разработан.

Метод измерения ВГД, основанный на аппланации глазной поверхности грузиком фиксированной массы, был впервые предложен А.Н. Маклаковым в 1883 г. [21]. В дальнейшем эта методика была модифицирована Познером и Халбергом в 1960-х и 1970-х гг. [22, 23]. Вследствие контакта поверхности грузика фиксированной массы с поверхностью глаза формируется площадка аппланации округлой формы, диаметр которой можно измерить и, используя соотношение Имберта — Фика между давлением, силой и площадью соприкосновения, по имеющимся измерительным линейкам оценить уровень офтальмотонуса [21]. Казалось бы, все просто. Однако даже в современном, высокотехно-

логичном мире существуют определенные сложности с измерением диаметра оттисков, полученных при тонометрии по Маклакову, начиная с трудностей, связанных с соблюдением масштаба печати при изготовлении измерительных линеек [24] и заканчивая человеческим фактором [25].

Нами разработан telegram-bot (https://t.me/ai_tonometry_bot), который позволяет измерить диаметр полученных оттисков, нивелируя погрешности измерительных линеек и влияние человеческого фактора. В этом исследовании мы сравнили результаты измерений, выполненных с помощью созданного приложения, с результатами измерений, выполненных с помощью измерительных линеек тремя независимыми экспертами, результаты которых приняты за эталон.

ЦЕЛЬ исследования — оценить точность измерения офальмотонуса с использованием технологий искусственного интеллекта и аппланационной тонометрии с фиксированной силой.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В работе использованы результаты аппланационной тонометрии, разработанной Маклаковым в 1883 г. [21], предусматривающей использование фиксированной силы — веса тонометра 5, 10 и 15 г по модифицированной методике эластотонометрии [26], проведенной 290 пациентам на 576 глазах (у 4 пациентов исследуемый глаз был единственным). Измерения проводили каждым тонометром дважды. Таким образом, в протоколе обследования каждого пациента содержалось либо 6, либо 12 тонометрических оттисков в зависимости от количества исследуемых глаз. Далее протоколы исследований были отсканированы (1200 dpi) и распечатаны в цвете в трех экземплярах. Каждый набор эластотонограмм содержал 3456 тонометрических оттисков.

В анализе качества оттисков и их измерении приняли участие три независимых эксперта-офтальмолога: Елена Владимировна Карлова (город Самара, Россия), Ирина Владимировна Козлова (город Москва, Россия) и Дмитрий Александрович Дорофеев (город Челябинск, Россия). Один из экспертов провел измерение оттисков дважды: первый раз на оригинальных тонограммах, а второй — на отсканированных и распечатанных. Это позволило судить о повторяемости измерений человеком, а также предположить, что сканирование и распечатка на цветном принтере не привели к искажению изображений.

При анализе качества оттисков эксперты ранжировали их по четырем категориям: первая — отпечаток не вызывает сомнений при измерении; вторая — отпечаток сомнительный, но измерить диаметр возможно; третья — измерить диаметр отпечатка можно, но лучше провести повторную аппланацию; четвертая — отпечаток не подлежит измерению, требуется повторная аппланация.

Для проверки повторяемости и воспроизводимости измерений нейросети все изображения эластотонограмм были сфотографированы и загружены в нейросеть для измерения диаметра оттисков и оценки качества оттисков. Всего проанализировано 13 824 отпечатка, полученных при измерении ВГД методом Маклакова. Для чистоты эксперимента в анализе не использовали оригиналы оттисков, врачи измеряли офальмотонус по одинаковым распечатанным копиям. Воспроизводимость измерений оттисков рассчитывалась для каждого исследователя по сравнению со средним результатом трех врачей.

Для анализа измерений нейросети использовали три набора фотографий, сделанных на разные мобильные устройства. Воспроизводимость измерений оттисков нейросетью

рассчитывалась для каждого набора фотографий по средним измерениям трех наборов фотографий. Точность измерения оттисков нейросетью измерялась путем сравнения со средним измерением трех офтальмологов, что нами было принято за эталон.

Статистический анализ был выполнен с использованием языка программирования Python 3 и подключаемых библиотек numpy, statsmodels, pingouin (<https://pypi.org/>). Для сравнения измерений использовались графики Бланда — Альтмана с 95%-ным доверительным интервалом пределов согласия. Рассчитаны коэффициенты внутриклассовой корреляции (ICC2, k-эксперты выбираются случайным образом, затем каждый отпечаток оценивается одним и тем же набором k-экспертов) повторных измерений и коэффициент вариации CV. Для попарных сравнений применялся t-критерий Стьюдента. Статистическая значимость была определена на уровне $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнение измерений, проведенных экспертами. На первом этапе нами было принято решение исключить из наблюдений данные офальмотонуса, классифицируемые как высокий уровень офальмотонуса по классификации А.П. Нестерова и А.Я. Бунина [27] (для тонометра Маклакова 5 г — более 27 мм рт. ст., для тонометра Маклакова 10 г — более 32 мм рт. ст. и для тонометра Маклакова 15 г — более 37 мм рт. ст.). Такое решение было принято по двум причинам. Во-первых — это относительные трудности в получении качественного отпечатка при маленькой площади контакта с роговицей: даже малейшая погрешность в методике аппланации приводит к значительному искажению действительного уровня офальмотонуса. Эта же проблема касается и измерения диаметра отпечатка, малейшее смещение линейки будет приводить к большей погрешности. А во-вторых, с клинической точки зрения уровень офальмотонуса при таком его повышении вряд ли будет измерен настолько неверно, что исследователь примет такое выраженное повышение офальмотонуса за нормальные значения. Таким образом, для анализа согласованности измерений использовался 861 отпечаток для тонометра Маклакова 5 г, 847 отпечатков — для тонометра Маклакова 10 г и 773 отпечатка — для тонометра Маклакова 15 г.

Повторное измерение оттисков, выведенных на печать на цветном принтере, вероятно, не приводит к значимому искажению результатов, так как среднее отклонение измерений для тонометра Маклакова 5 г составило -0,01 (-5,23; 5,22) мм рт. ст., для грузов 10 и 15 г составило соответственно 0,26 (-5,28; 5,79) и 0,23 (-5,63; 6,08) мм рт. ст. (рис. 1).

Таким образом, коэффициент повторяемости для одного эксперта составил для тонометра Маклакова (5 г): CV = 4,86%; CV (абсолютное значение) = 0,92 мм рт. ст., для тонометра весом 10 г: CV = 4,08%; CV (абсолютное значение) = 0,97 мм рт. ст., а для тонометра 15 г: CV = 3,67%; CV (абсолютное значение) = 1,05 мм рт. ст., при этом стоит отметить, что в исследованиях коэффициента повторяемости при разработке искусственного интеллекта на основе тонометра Гольдмана повторяемость составила 3,8 и 3,9 мм рт. ст. для измерений искусственным интеллектом и человеком [28], но не стоит забывать, что в нашем исследовании мы говорим только о повторяемости измерения отпечатка, в то время как в исследовании Т. Spaide и соавт. [28] идет речь о повторяемости всего метода.

Далее для уточнения воспроизводимости измерений каждого эксперта вычисляли среднее значение измерения для каждого отпечатка. После чего данные каждого эксперта

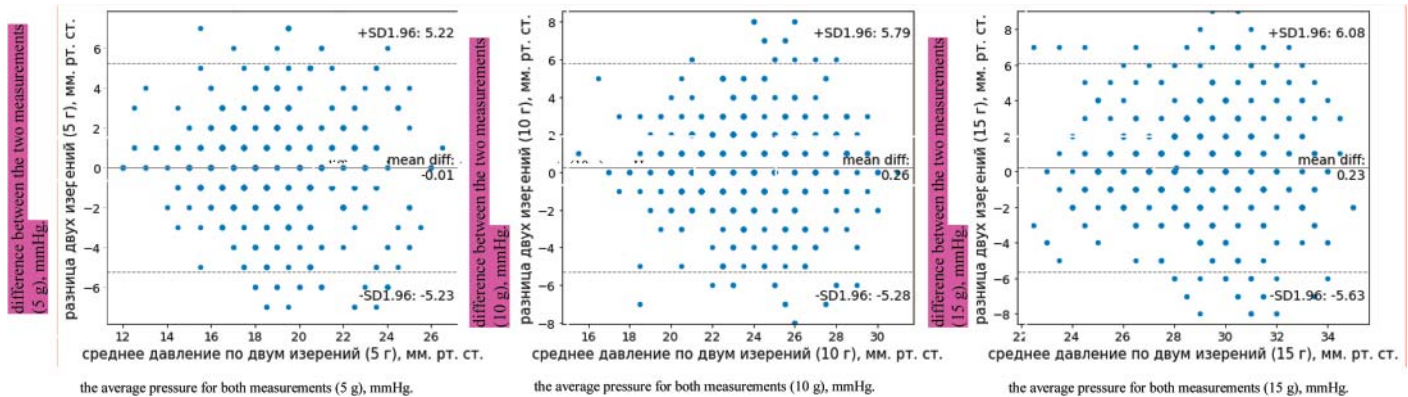


Рис. 1. График Бланда — Алтмана повторного измерения офтальмотонуса одним врачом
Fig. 1. Bland — Altman plot of repeated measurement of IOP by one doctor

сравнивали с этим значением. Так, для тонометра 5 г отличия в измерениях экспертов составили 0,81 (2,34; 3,97), 0,03 (-2,1; 2,15) и -0,84 (-3,28; 1,6) мм рт. ст. Схожая картина наблюдается по тонометрам 10 и 15 г. Так, отклонение от среднего измерения отпечатков составило 1,43 (1,59; 4,46), -1,06 (-3,24; 1,12) и -0,37 (-2,8; 2,05) мм рт. ст. для тонометра 10 г, а для тонометра 15 г составило 1,77 (-1,72; 5,26), -1,5 (-4,29; 1,29) и -0,27 (-3,05; 2,52) мм рт. ст. (рис. 2). Таким образом, можно утверждать об относительно стабильном результате измерений диаметров отпечатков экспертами, в среднем отклонение измерений составляет 0,9 мм рт. ст. и 95% в диапазоне (2,71; -2,71) мм рт. ст.

Коэффициент воспроизводимости для трех экспертов составил для тонометра Маклакова (5 г): CV = 6,17%; CV (абсолютное значение) = 1,22 мм рт. ст., для тонометра весом 10 г: CV = 5,52%; CV (абсолютное значение) = 1,48 мм рт. ст., а для тонометра 15 г: CV = 6,06%; CV (абсолютное значение) = 1,84 мм рт. ст.

Сравнение измерений, проведенных искусственным интеллектом. Для оценки воспроизводимости результатов измерений, полученных https://t.me/ai_tonometry_bot, были проанализированы три набора фотографий, каждый из которых включал 2481 отпечаток. Для отпечатков, полученных тонометром Маклакова 5 г, среднее отклонение от среднего значения составило 0,37 (-3,25; 3,25) мм рт. ст., а для отпечатков 10 и 15 г — 0,36 (-3,59; 3,59) и 0,61 (-3,96; 3,96) мм рт. ст. соответственно (рис. 3).

Коэффициент воспроизводимости для алгоритмов https://t.me/ai_tonometry_bot составил для тонометра Маклакова 5 г: CV = 6,17%; CV (абсолютное значение) = 1,22 мм рт. ст., для тонометра весом 10 г: CV = 5,25%; CV (абсолютное значение) = 1,32 мм рт. ст., а для тонометра 15 г: CV = 5,23%; CV (абсолютное значение) = 1,54 мм рт. ст.

Таким образом, воспроизводимости измерений отпечатков человеком и https://t.me/ai_tonometry_bot сопоставимы для тонометра Маклакова весом 5 г ($t = -0,027567$; $p = 0,978$), а для тонометров весом 10 и 15 г https://t.me/ai_tonometry_bot демонстрирует хоть и незначительные (менее 1 мм рт. ст.) в абсолютных величинах, но более воспроизводимые результаты (для тонометра 10 г: $t = 3,4867$; $p = 0,0005142$; для тонометра 15 г: $t = 4,1285$; $p = 4,049e-05$).

Сравнение измерений, проведенных искусственным интеллектом, с измерениями экспертов. В этом исследовании мы сравнили измерения диаметра отпечатков тонометра Маклакова с помощью искусственного интеллекта на базе https://t.me/ai_tonometry_bot с измерениями трех экспертов. Мы обнаружили, что https://t.me/ai_tonometry_bot занижает изме-

рение по сравнению с тремя экспертами на 0,27 (-3,81; 4,35) мм рт. ст. При этом внутриклассовый коэффициент корреляции для всех отпечатков составил 98,3%. Точность измерений диаметра отпечатков https://t.me/ai_tonometry_bot для тонометров разных весов отличается: так, для тонометра 5 г точность составила -0,06 (-3,38; 3,49) мм рт. ст., для тонометров 10 и 15 г: 0,14 (-3,8; 3,51) и 0,95 (-3,84; 5,74) мм рт. ст. (рис. 4).

Согласно требованиям американского национального стандарта ANSI Z80.10, устанавливающего требования к новым тонометрам, не более 5% парных измерений могут отличаться более чем на ± 5 мм рт. ст. По сравнению с измерениями экспертов уровень офтальмотонуса нашего 2481 отпечатка лишь в 2,8% находился за пределами этого диапазона. Среднее смещение и 95%-ный предел согласия для https://t.me/ai_tonometry_bot по сравнению с измерениями экспертов хорошо согласуются с сообщенным средним смещением и 95%-ным пределом согласия для других широко используемых тонометров [29]. В большом метаанализе, сравнивающем различные тонометры с тонометром Гольдмана, J. Cook и соавт. сообщили о среднем смещении +0,9 мм рт. ст. и 95%-ном пределе согласия: от -4,3 до 6,1 мм рт. ст. — для тонометра Icare ic 100 (Icare Finland Oy, Финляндия) и среднем смещении -0,2 мм рт. ст. и пределами согласия от -6,2 до 5,8 мм рт. ст. для Тono-Pen XL (Reichert Technologies, США) по сравнению с тонометром Гольдмана, 52% измерений Icare и 48% измерений Тono-Pen были в пределах 2,0 мм рт. ст. от измерения тонометром Гольдмана [29]. В рамках нашего исследования 70,5% измерений ВГД были в пределах 2,0 мм рт. ст. Исследования, сравнивающие пневмотонометр с тонометром Гольдмана, часто сообщают о еще более высоком среднем отклонении — до 5,5 (1,5; 10,0) мм рт. ст. [30, 31].

Таким образом, можно говорить о более сбалансированных и более воспроизводимых результатах измерения диаметров отпечатков тонометров Маклакова при помощи искусственного интеллекта.

Ограничения исследования. Основным ограничением исследования нужно признать копирование отпечатков измерений. Несмотря на высокое качество сканирования (1200 dpi) и высокое качество печати на цветном принтере, гарантировать полную передачу изображения невозможно, однако сравнение повторного измерения копий и оригиналов не привело к значимому смещению результатов.

Небольшое количество экспертов, задействованных в измерении отпечатков, позволяет предположить наличие смещения результатов измерений, так как один из трех экспертов занижал измерения примерно на 2 мм рт. ст. Однако измерения именно этого эксперта были проведены дважды, и его

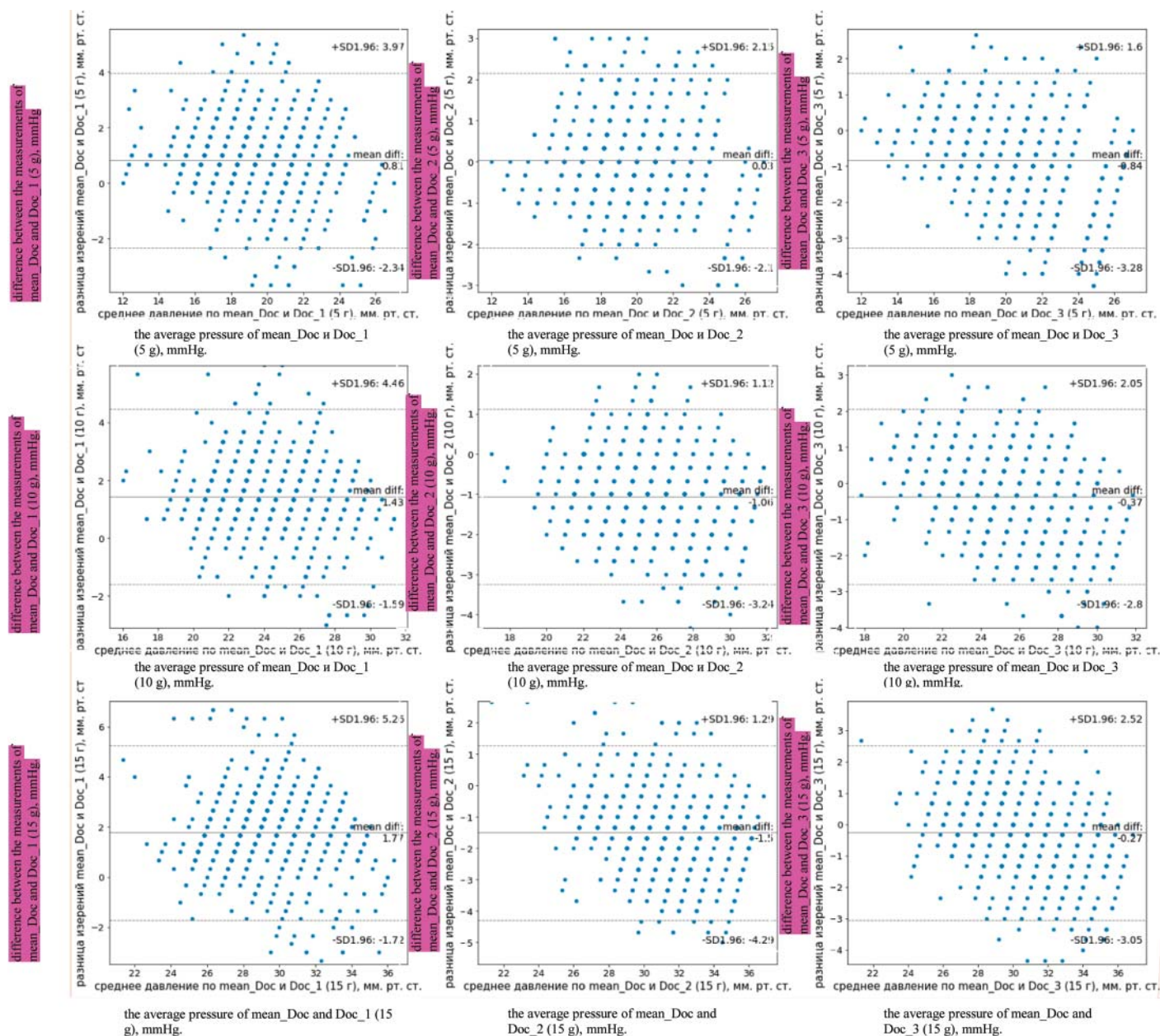


Рис. 2. График Бланда — Альтмана для тонометров Маклакова 5, 10 и 15 г, сравнение каждого эксперта со средним значением измерения отиска

Fig. 2. Bland — Altman plot for 5g, 10g and 15g Maklakov tonometers, the comparison of each expert with the average value of the print measurement

результаты оказались воспроизводимыми, а среднее отклонение не превысило 0,25 мм рт. ст. Более того, при пиксельном измерении диаметра отпечатков (что позволяет измерить диаметр с точностью до 1 пикселя, или 0,0658 мм) в нашем предыдущем исследовании показано, что именно этот эксперт проводит измерение точнее двух других экспертов. Таким образом, занижение измерений диаметра отпечатков по сравнению с тремя экспертами на 0,27 (-3,81; 4,35) мм рт. ст. не обязательно обусловлено погрешностями работы https://t.me/ai_tonometry_bot, возможно, что эти расхождения получены за счет смещения, обусловленного флюктуациями измерений экспертов.

Кроме того, в идеале следовало бы проводить консенсусное измерение отпечатков, однако их большое количество и географическая разобщенность экспертов не позволили провести такое измерение.

В нашем исследовании не стоит говорить о точности, повторяемости и воспроизводимости метода Маклакова, так как мы анализировали лишь процесс измерения отиска, а процесс аппланации производили однократно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Измерение диаметров отпечатков тонометров Маклакова при помощи искусственного интеллекта https://t.me/ai_tonometry_bot позволяет добиться точности измерений 0,27 (-3,81; 4,35) мм рт. ст. с коэффициентом внутриклассовой корреляции 98,3%. При этом коэффициенты вариации для измерений человеком и https://t.me/ai_tonometry_bot составили 6,05 и 5,55% соответственно ($t = 4,17$; $p = 0,00004$). Таким образом, можно уверенно говорить о высокой точности и воспроизводимости измерений https://t.me/ai_tonometry_bot, превосходящей воспроизводимость человека.

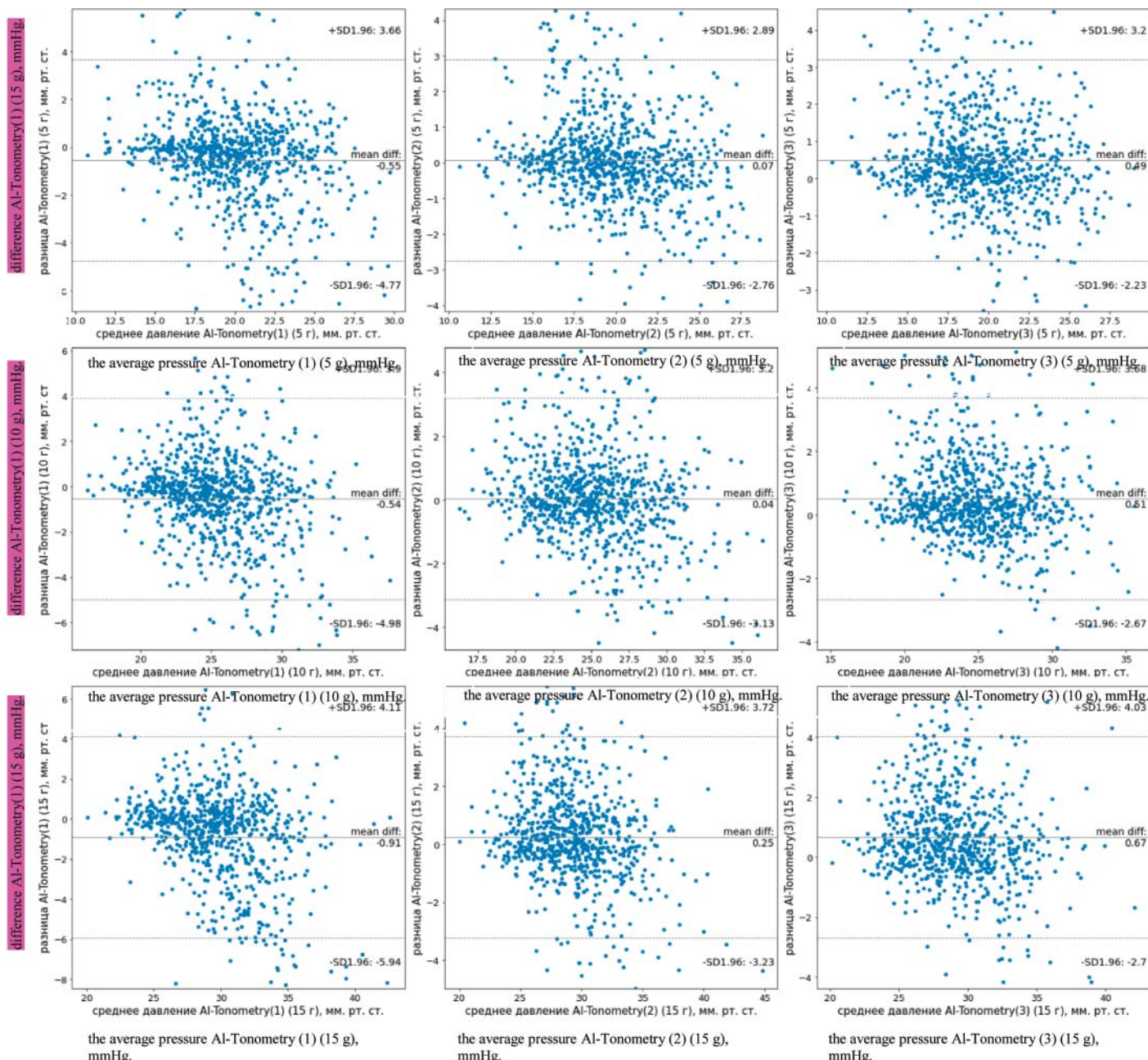


Рис. 3. График Бланда — Альтмана для тонометров Маклакова 5, 10 и 15 г, сравнение измерений каждого эксперта со средним значением измерения оттосков при помощи https://t.me/ai_tonometry_bot

Fig. 3. Bland — Altman plot for 5 g, 10 g and 15 g Maklakov tonometers, the comparison of each expert with the average value of the print measurement using https://t.me/ai_tonometry_bot

Литература/References

1. Resnikoff S., Felch W., Gauthier T.M., Spivey B. The number of ophthalmologists in practice and training worldwide: A growing gap despite more than 200 000 practitioners. *Br. J. Ophthalmol.* 2012; 96 (6): 783–7. doi:10.1136/bjophthalmol-2011-301378
2. Wu Y., Luttrell I., Feng S., et al. Development and validation of a machine learning, smartphone-based tonometer. *Br. J. Ophthalmol.* 2020; 104 (10): 1394–8. doi:10.1136/bjophthalmol-2019-315446
3. Pathipati A.S., Wood E.H., Lam C.K., Sales C.S., Moshfeghi D.M. Visual acuity measured with a smartphone app is more accurate than Snellen testing by emergency department providers. *Graefes Arch. Clin. Exp. Ophthalmol.* 2016; 254 (6): 1175–80. doi:10.1007/s00417-016-3291-4
4. Bastawrous A., Rono H.K., Livingstone I.A.T., et al. Development and validation of a smartphone-based visual acuity test (peek acuity) for clinical practice and Community-Based Fieldwork. *JAMA Ophthalmol.* 2015; 133 (8): 930–7. doi:10.1001/jamaophthalmol.2015.1468
5. Ludwig C.A., Murthy S.I., Pappuru R.R., et al. A novel smartphone ophthalmic imaging adapter: User feasibility studies in Hyderabad, India. *Indian J. Ophthalmol.* 2016; 64 (3): 191–200. doi:10.4103/0301-4738.181742
6. Ludwig C.A., Newsom M.R., Jais A., et al. Training time and quality of smartphone-based anterior segment screening in rural India. *Clin. Ophthalmol.* 2017; 11: 1301–7. doi:10.2147/OPHTH.S134656
7. Vilela M.A., Valença F.M., Barreto P.K., Amaral C.E., Pellanda L.C. Agreement between retinal images obtained via smartphones and images obtained with retinal cameras or fundoscopic exams — Systematic review and meta-analysis. *Clin. Ophthalmol.* 2018; 12: 2581–9. doi:10.2147/OPHTH.S182022
8. Rajalakshmi R., Arulmalar S., Usha M., et al. Validation of smartphone based retinal photography for diabetic retinopathy screening. *PLoS One.* 2015; 10 (9): e0138285. doi:10.1371/journal.pone.0138285
9. Russo A., Morescalchi F., Costagliola C., Delcassi L., Semeraro F. Comparison of smartphone ophthalmoscopy with slit-lamp biomicroscopy for grading diabetic

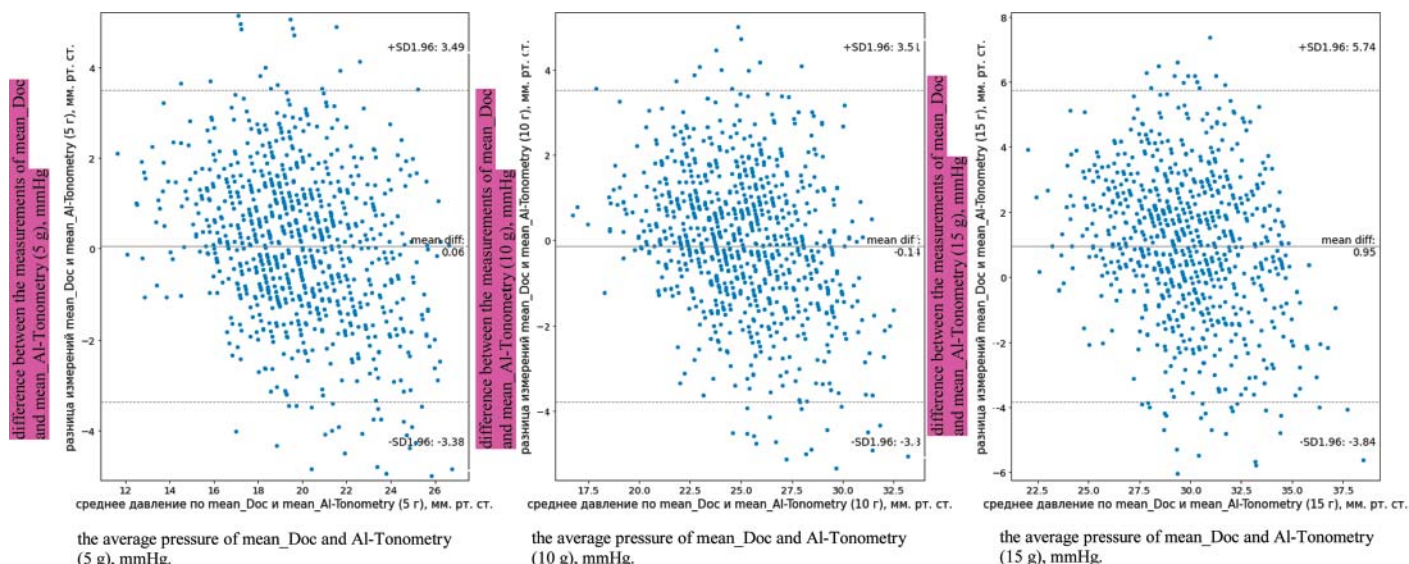


Рис. 4. График Бланда — Альтмана для тонометров Маклакова 5, 10 и 15 г, сравнение средних измерений экспертами со средними измерениями https://t.me/ai_tonometry_bot
Fig. 4. Bland — Altman plot for 5 g, 10 g and 15 g Maklakov tonometers, the comparison of average expert measurements with the average values using https://t.me/ai_tonometry_bot

- retinopathy. Am. J. Ophthalmol. 2015; 159 (2): 360–4. e1. doi:10.1016/j.ajo.2014.11.008
10. Russo A., Mapham W., Turano R., et al. Comparison of smartphone ophthalmoscopy with slit-lamp biomicroscopy for grading vertical cup-to-disc ratio. J. Glaucoma. 2016; 25 (9): e777–81. doi:10.1097/IJG.0000000000000499
 11. Bastawrous A., Giardini M.E., Bolster N.M., et al. Clinical validation of a smartphone-based adapter for optic disc imaging in Kenya. JAMA Ophthalmol. 2016; 134 (2): 151–8. doi:10.1001/jamaophthalmol.2015.4625
 12. Goyal A., Gopalakrishnan M., Anantharaman G., et al. Smartphone guided wide-field imaging for retinopathy of prematurity in neonatal intensive care unit - A Smart ROP (SRP) initiative. Indian J. Ophthalmol. 2019; 67 (6): 840–5. doi:10.4103/ijo.IJO_1177_18
 13. Антонов А.А., Карлова Е.В., Брежнев А.Ю., Дорофеев Д.А. Современное состояние офтальмотонометрии. Вестник офтальмологии. 2020; 136 (6): 100–7. [Antonov A.A., Karlova E.V., Brezhnev A.Y., Dorofeev D.A. Current state of ophthalmic tonometry. Vestnik oftal'mologii. 2020; 136 (6): 100–7 (in Russian)]. doi:10.17116/oftalma2020136061100
 14. Гордничий В.В., Дорофеев Д.А., Завадский П.Ч. и др. Факторы риска, патогенные факторы развития и прогрессирования глаукомы по результатам многоцентрового исследования Российского глаукомного общества. Медико-биологические проблемы жизнедеятельности 2012; 8 (2): 57–69. [Gordnichiy V.V., Dorofeev D.A., Zavadsky P.C., et al. Risk factors, pathogenic factors in progression of glaucoma by results of multicenter study of Russian glaucoma society. Medical and Biological Problems of Life Activity. 2012; 8 (2): 57–69 (in Russian)]. http://eyenews.club/files/r_70_50/new-266_selection.pdf
 15. Авдеев Р.В., Александров А.С., Басинский А.С. и др. Клинико-эпидемиологическое исследование факторов риска развития и прогрессирования глаукомы. Российский офтальмологический журнал. 2013; 6 (3): 4–11. [Avdeev R.V., Alexandrov A.S., Basinsky A.S., et al. Clinical and epidemiological study of risk factors of glaucoma development and progression. Russian ophthalmological journal, 2013; 6 (3): 4–11 (in Russian)]. <https://elibrary.ru/item.asp?id=19415263>
 16. Дорофеев Д.А., Кирилик Е.В., Климова А.В., Соловьева О.Б. Влияние ретинопротекторной терапии на показатели оптической когерентной томографии с функцией ангиографии (пилотное исследование). Вестник офтальмологии. 2021; 137 (1): 60–7. [Dorofeev D.A., Kirilik E.V., Klimova A.V., Solovieva O.B. Effect of retinal protective therapy on optical coherence tomography angiography (pilot study). Vestnik oftalmologii. 2021; 137 (1): 60–7 (in Russian)]. doi:10.17116/oftalma202113701160
 17. Гусаревич А.А., Завадский П.Ч., Куроедов А.В. и др. Актуальность выбора монотерапии аналогами простагландинов/простаமிдов на старте лечения впервые выявленной глаукомы (результаты многоцентрового исследования). Национальный журнал глаукома. 2020; 19 (3): 43–57. [Gusarevich A.A., Zavadski P.C., Kuroyedov A.V., et al. The correct choice of monotherapy with prostaglandins analogues/prostamides at the start of treatment for newly diagnosed glaucoma (as results of a multicenter study). National Journal glaucoma. 2020; 19 (3): 43–57 (in Russian)]. doi:10.25700/NJG.2020.03.05
 18. Страхов В.В., Егоров Е.А., Еричев В.П. и др. Влияние длительной ретинопротекторной терапии на прогрессирование глаукомы по данным структурно-функциональных исследований. Вестник офтальмологии. 2020; 136 (5): 58–66. [Strakhov V.V., Egorov E.A., Eriчев V.P., et al. The influence of long-term retinal protective therapy on glaucoma progression according to structural and functional tests. Vestnik oftal'mologii. 2020; 136 (5): 58–66 (in Russian)]. doi:10.17116/oftalma202013605158
 19. Дорофеев Д.А., Крыжановская А.В., Цыганов А.З. Эффективность гипотензивной бесконсервантной терапии фиксированной комбинацией биматопроста и тимолола (промежуточные результаты). Вестник офтальмологии. 2020; 136 (2): 73–80. [Dorofeev D.A., Kryzhanovskaya A.V., Tsyganov A.Z. Effectiveness of antihypertensive conservative-free therapy with fixed combination of bimatoprost and timolol (intermediate results). Vestnik oftal'mologii. 2020; 136 (2): 73–80 (in Russian)]. doi:10.17116/oftalma202013602173
 20. Авдеев Р.В., Бакунина Н.А., Басинский А.С. и др. Менеджмент прогрессирования глаукомы. Национальный журнал глаукома. 2019; 18 (1): 45–58. [Avdeev R.V., Bakunina N.A., Basinsky A.S., et al. Management of glaucoma progression. National journal glaucoma. 2019; 18 (1): 45–58 (in Russian)]. doi:10.25700/NJG.2019.01.07
 21. Маклаков Н.А. Еще по поводу офтальмотонометрии. Хирургическая летопись. 1893; 4: 1–11. [Maklakov N.A. More on ophthalmotonometry. Surgical Annals. 1893; (4): 1–11 (in Russian)].
 22. Wind C.A., Kaufman H.E. Clinical evaluation of the Halberg hand applanation tonometer. Ann Ophthalmol. 1972; 4 (8): 631–41.
 23. Posner A. The applanometer, a modified Maklakov applanation tonometer. Eye Ear Nose Throat Mon. 1965; 4: 77–80.
 24. Вурдафт А.Е. О точности измерительных линеек Б.Л. Поляка. Национальный журнал глаукома. 2017; 16 (4): 11–22. [Vurdaft A.E. On the precision of Polyak measuring scales in Maklakov tonometry. National journal glaucoma. 2017; 16 (4): 11–22 (in Russian)].
 25. Дорофеев Д.А., Визгалова Л.О., Горобец А.В. и др. Возможности искусственного интеллекта в измерении отсчетов внутриглазного давления по Маклакову. Национальный журнал глаукома. 2020; 19 (1): 20–7. [Dorofeev D.A., Vizgalova L.O., Gorobets A.V., et al. The possibilities of artificial intelligence use in the assessment of Maklakov intraocular pressure prints. Natsional'nyi zhurnal glaukoma. 2020; 19 (1): 20–7 (in Russian)]. doi:10.25700/NJG.2020.01.03
 26. Аветисов С.Э., Бубнова И.А., Антонов А.А. Еще раз о диагностических возможностях эластотонометрии. Вестник офтальмологии. 2008; 124 (5): 19–22. [Avetisov S.E., Bubnova I.A., Antonov A.A. Once more about the diagnostic capacities of elastic tonometry. Vestnik oftal'mologii. 2008; 124 (5): 19–21 (in Russian)]. <https://elibrary.ru/item.asp?id=11632985>
 27. Нестеров А.П., Бунин А.Я. О новой классификации первичной глаукомы. Вестник офтальмологии. 1977; 5: 38–42. [Nesterov A.P., Bunin A.Ya. New

- classification of primary glaucoma. Vestnik ophthal'mologii. 1977; 5: 38–42 (in Russian)]. <https://elibrary.ru/contents.asp?id=34562365>
28. Spaide T., Wu Y., Yanagihara R.T., et al. Using deep learning to automate goldmann applanation tonometry readings. Ophthalmology. 2020; 127 (11): 1498–506. doi:10.1016/j.ophtha.2020.04.033
 29. Cook J.A., Botello A.P., Elders A., et al. Systematic review of the agreement of tonometers with goldmann applanation tonometry. Ophthalmology. 2012; 119 (8): 1552–7. doi:10.1016/j.ophtha.2012.02.030
 30. Barkana Y., Gutfreund S. Measurement of the difference in intraocular pressure between the sitting and lying body positions in healthy subjects: Direct comparison of the Icare Pro with the Goldmann applanation tonometer, Pneumatometer and Tonopen XL. Clin. Exp. Ophthalmol. 2014; 42 (7): 608–14. doi:10.1111/ceo.12272
 31. Barkana Y. Postural change in intraocular pressure: A comparison of measurement with a Goldmann Tonometer, Tonopen XL, Pneumatometer, and HA-2. J. Glaucoma. 2014; 23 (1): e 23–8. doi:10.1097/IJG.0b013e3182a0762f

Поступила: 02.02.2022. Переработана: 06.02.2022. Принята к печати: 11.02.2022
Originally received: 02.02.2022. Final revision: 06.02.2022. Accepted: 11.02.2022

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ/INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

МАУЗ «Городская клиническая больница № 2», поликлиника № 1, ул. Российская, д. 200, Челябинск, 454090, Россия

Дмитрий Александрович Дорофеев — врач-офтальмолог, ORCID 0000-0003-3352-8170

Ксения Алексеевна Ефимова — оператор ОКТ, ORCID 0000-0001-6492-7743

Елена Викторовна Кирилик — врач-офтальмолог, ORCID 0000-0002-0189-9586

ФГБНУ «Научно-исследовательский институт глазных болезней», ул. Россолимо, д. 11а, б, Москва, 119021, Россия

Алексей Анатольевич Антонов — канд. мед. наук, ведущий научный сотрудник отдела глаукомы, ORCID 0000-0002-5171-8261

Ирина Владимировна Козлова — канд. мед. наук, научный сотрудник отдела глаукомы

LTD Aplit, Моше Авив, д. 6, Ор-Йехуда, 60371, Израиль

Денис Юрьевич Василенко — фронтенд-разработчик

¹ МУДО «Центр дополнительного образования» Каслинского муниципального района, ул. Стадионная, д. 87, Касли, Челябинская обл., 456835, Россия

² ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ), Институт естественных и точных наук, пр. Ленина, д. 76, Челябинск, 454080, Россия

Александр Вячеславович Горобец — студент^{1, 2}, ORCID 0000-0001-9864-9833

Евгений Вадимович Канафин — студент², ORCID 0000-0001-5354-4843

ГБУЗ «Самарская областная клиническая офтальмологическая больница им. Т.И. Ерошевского», ул. Ново-Садовая, д. 158, Самара, 443068, Россия

Елена Владимировна Карлова — д-р мед. наук, заместитель главного врача, ORCID 0000-0003-4929-8832

ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет», биологический факультет, ул. Братьев Кашириных, д. 129, Челябинск, 454001, Россия

Елизавета Романовна Орлова — врач-офтальмолог, ORCID 0000-0001-9568-1715

ФГАУ НМИЦ «МНТК "Микрохирургия глаза" им. акад. С.Н. Федорова» Минздрава России, Бескудниковский бульвар, д. 59а, Москва, 127486, Россия

Артем Захарович Цыганов — клинический ординатор, ORCID 0000-0003-2959-4319

Для контактов: Артем Захарович Цыганов,
zokogama@yandex.ru

City Clinical Hospital No. 2, Clinic № 1, 200, Rossiiskaya St., Chelyabinsk, 454090, Russia

Dmitry A. Dorofeev — ophthalmologist, ORCID 0000-0003-3352-8170

Ksenia A. Efimova — OCT operator, ORCID 0000-0001-6492-7743

Elena V. Kirilik — ophthalmologist, ORCID 0000-0002-0189-9586

Scientific Research Institute of Eye Diseases, 11 A, B, Rossolimo st., Moscow, 119021, Russia

Alexey A. Antonov — Cand. of Med. Sci., leading researcher, glaucoma department, ORCID 0000-0002-5171-8261

Irina V. Kozlova — Cand. of Med. Sci., researcher, glaucoma department LTD Aplit, Moshe Aviv, 6 Or-Yehuda, 60371, Israel

Denis Yu. Vasilenko — frontend developer

¹ Center of additional Education, 87, Stadionnaya St, Kasli, Chelyabinsk Region, 456835, Russia

² South Ural State University (National Research University), 76, Lenin Avenue, Chelyabinsk, 454080, Russia

Alexander V. Gorobets — student^{1, 2}, ORCID 0000-0001-9864-9833

Evgenij V. Kanafin — student², ORCID 0000-0001-5354-4843

Eroshevskiy Eye Hospital, 158, Novo-Sadovaya st., Samara, 443068, Russia

Elena V. Karlova — Dr. of Med. Sci., deputy chief doctor, ORCID 0000-0003-4929-8832

Chelyabinsk State University, 129, Bratiev Kashirinykh St., Chelyabinsk, 454001, Russia

Elizaveta R. Orlova — ophthalmologist, ORCID 0000-0001-9568-1715

S.N. Fedorov Eye Microsurgery Complex, 59a, Beskudnikovsky Boulevard, Moscow, 127486, Russia

Artem Z. Tsyganov — clinical resident, ORCID 0000-0003-2959-4319

Contact information: Artem Z. Tsyganov,
zokogama@yandex.ru