

Возможности искусственного интеллекта в измерении оттисков внутриглазного давления по Маклакову

Дорофеев Д.А., врач-офтальмолог¹;
Визгалова Л.О., ординатор²;
Горобец А.В., студент³;
Канафин Е.В., ученик средней школы⁴;
Курочкин С.И., студент³;
Василенко Д.Ю., разработчик⁵;
Ефимова К.А., оператор ОКТ¹;
Цыганов А.З., студент²;
Козлова И.В., к.м.н., научный сотрудник отдела глаукомы⁶;
Карлова Е.В., д.м.н., заведующая отделением⁷.

¹МА УЗ «Городская клиническая больница № 2», 454080, Российская Федерация, Челябинск, пр. Ленина, 82;

²ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный медицинский университет» Минздрава РФ, 454092, Российская Федерация, Челябинск, ул. Воровского, 64;

³ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», 454080, Российская Федерация, Челябинск, проспект Ленина, 76;

⁴ГБОУ «Челябинский областной многопрофильный лицей-интернат для одаренных детей», 454014, Российская Федерация, Челябинск, ул. Ворошилова, 2;

⁵LTD Arlit, 60371, Израиль, Ор-Йехуда, Моше Авив б.

⁶ФГБНУ «Научно-исследовательский институт глазных болезней», 119021, Российская Федерация, Москва, ул. Россолимо, 11 А, Б;

⁷ГБУЗ «Самарская областная клиническая офтальмологическая больница им. Т.И. Ерошевского», 443068, Российская Федерация, Самара, ул. Ново-Садовая, 158.

Авторы не получали финансирование при проведении исследования и написании статьи.
Конфликт интересов: отсутствует.

Для цитирования: Дорофеев Д.А., Визгалова Л.О., Горобец А.В., Канафин Е.В., Курочкин С.И., Василенко Д.Ю., Ефимова К.А., Цыганов А.З., Козлова И.В., Карлова Е.В. Возможности искусственного интеллекта в измерении оттисков внутриглазного давления по Маклакову. *Национальный журнал глаукома*. 2020; 19(1):20-27.

Резюме

ЦЕЛЬ. Оценить точность измерения оттисков внутриглазного давления (ВГД) по Маклакову, выполненного врачами и искусственным интеллектом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Были подготовлены две пары тонограмм, полученные тонометром Маклакова грузом 10,0 г. Разметка тонограмм проводилась анонимно при помощи измерительной линейки проф. Б.Л. Поляка для 4-х тонометров Маклакова. Всего в работе приняло участие 57 офтальмологов. Были выбраны наиболее качественные отпечатки (n=40). Эти же отпечатки были

сфотографированы на камеру смартфона Xiaomi mi 6 40 раз с различным уровнем освещенности и различным углом поворота относительно нормали к фокальной плоскости линзы. Полученные фотографии в формате jpg были проанализированы алгоритмами <http://ai-tonometry.com>. и обрабатывались алгоритмом Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE) для выделения более четких границ, а после этого переводились в бинарные матрицы (матрицы, состоящие из «0» и «1»).

Для контактов:

Дорофеев Дмитрий Александрович, e-mail: dimmm.83@mail.ru

РЕЗУЛЬТАТЫ. Оттиск с максимальным количеством измерений 40 и коллегиально принятым достоверным тонометрическим уровнем 17 мм рт.ст. врачами был изменен в среднем диапазоне $16,48 \pm 2,7$ 16,0 (15,0; 17) мм рт.ст., а нейросетью $17,0 \pm 1,1$ 17,0 (16,0; 17,0) мм рт.ст. При этом диапазон измерений диаметра оттиска нейросетью практически в 3 раза меньше по сравнению с измерениями врачей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Мобильное приложение на основе искусственного интеллекта помогает качественно проводить

мониторинг ВГД и отбраковывать оттиски неудовлетворительного качества, что позволит снизить количество пациентов с прогрессированием глаукомы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: тонометрия по Маклакову, точность измерения внутриглазного давления, ошибки измерения внутриглазного давления, ВГД, офтальмотонометрия, искусственный интеллект, нейросеть, сверточные нейросети, глаукома, измерительная линейка Поляка, калибровочные таблицы А.П. Нестерова и М.Б. Вурдафта, аппланационная тонометрия.

ENGLISH

The possibilities of artificial intelligence use in the assessment of Maklakov intraocular pressure prints

DOROFEEV D.A., M.D.¹;

VIZGALOVA L.O., Resident²;

GOROBETS A.V., Student³;

KANAFIN E.V., High school student⁴;

KUROCHKIN S.I., Student³;

VASILENKO D.YU., Frontend developers⁵;

EFIMOVA K.A., OCT operator¹;

CIGANOV A.Z., Student²;

KOZLOVA I.V., Ph.D., Research Associate of Glaucoma Department⁶;

KARLOVA E.V., Ph.D., Head of Glaucoma Department⁷.

¹Chelyabinsk Public Clinical Hospital of No. 2, 198 Rossiyskaya st., Chelyabinsk, Russian Federation, 454092;

²The South Ural State Medical University of The Ministry of Health of the Russian Federation, 64 Vorovsky st., Chelyabinsk, Russian Federation, 454092;

³South Ural State University (National Research University), 76 Lenin Avenue, Chelyabinsk, Russian Federation, 454080;

⁴Chelyabinsk Regional Multipurpose Boarding School for Gifted Children, 2 Voroshilova st., Chelyabinsk, Russian Federation, 454014;

⁵LTD Aplit, Moshe Aviv, 6 Or-Yehuda, Israel, 60371;

⁶Scientific Research Institute of Eye Diseases, 11A, B Rossolimo st., Moscow, Russian Federation, 119021;

⁷Eroshevskiy Eye Hospital, 158 Novo-Sadovaya st., Samara, Russian Federation, 443068.

Conflicts of Interest and Source of Funding: none declared.

For citations: Dorofeev D.A., Vizgalova L.O., Gorobets A.V., Kanafin E.V., Kurochkin S.I., Vasilenko D.Yu., Efimova K.A., Ciganov A.Z., Kozlova I.V., Karlova E.V. The possibilities of artificial intelligence use in the assessment of Maklakov intraocular pressure prints. *Natsional'nyi zhurnal glaukoma*. 2020; 19(1):20-27.

Abstract

OBJECTIVE: To assess the accuracy of Maklakov intraocular pressure imprints measurement by doctors and artificial intelligence.

MATERIALS AND METHODS: Two pairs of tonograms were prepared, obtained by a Maklakov tonometer with a load of 10.0 g. The tonograms were labeled anonymously, using a measuring ruler devised by prof. B.L. Polyak for 4 Maklakov

tonometers. In total, 57 ophthalmologists took part in the work. A total of 40 prints were chosen based on their quality. The same prints were photographed by a Xiaomi mi smartphone camera 40 times with a different level of illumination and a different angle of rotation relative to the normal of the lens focal plane. Received photos in jpg format were analyzed by <http://ai-tonometry.com> algorithms and processed

by the Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE) algorithm to extract sharper boundaries, and then translated into binary matrices (matrices consisting of “0” and “1”).

RESULTS: An imprint with a maximum number of measurements of 40 and a collegially accepted reliable tonometric level of 17 mmHg was measured in the middle range of 16.48±2.7 16.0 (15.0; 17) mmHg by doctors, and 17.0±1.1 17.0 (16.0; 17.0) mmHg by the neural network. At the same time, the range of imprint diameter measurements by the neural network was almost three times smaller, than human measurements.

CONCLUSION: The artificial intelligence-based mobile application allows for a high-quality monitoring of intraocular pressure and rejects prints of unsatisfactory quality, which may potentially reduce the number of patients with glaucoma progression.

KEYWORDS: Maklakov tonometry, accuracy of intraocular pressure measurement, intraocular pressure measurement errors, IOP, ophthalmotonometry, artificial intelligence, neural network, convolutional neural network, glaucoma, Polyak measuring line, Nesterov and Vurgaft calibration tables, applanation tonometry.

Актуальность

Глаукома на сегодняшний день по-прежнему является неизлечимым заболеванием, так как остается неизвестной его этиология, а теории патогенеза многочисленны [1, 2]. Единственный достоверный способ сохранения зрительных функций — снижение внутриглазного давления (ВГД) до индивидуально физиологического уровня [3-5]. В медицинских учреждениях РФ наиболее распространенным способом измерения ВГД является метод аппланационной тонометрии, предложенный в 1884 г. русским учёным А.Н. Маклаковым [6].

При использовании аккуратной техники выполнения тонометрии по Маклакову данные исследования позволяют уловить разницу ВГД в обоих глазах от 2 мм рт.ст. и выше [7], что является важным диагностическим критерием при подозрении на глаукому. Несмотря на недостатки метода и формулы, которые признавал и сам Маклаков («игнорируется» толщина роговицы, ее упругость и слезная плёнка [8, 9]), метод остаётся наиболее распространенным и по сей день [10]. В настоящее время для интерпретации результатов «тонометрического» или «истинного» ВГД используются различные варианты линеек Б.Л. Поляка [12]. Качество и точность этих линеек играют важную роль в оценке результатов тонометрии по Маклакову. На основании научных исследований можно сделать вывод о разнородности присутствующих в свободном доступе тонометрических линеек. Еще одним препятствием для точной оценки ВГД является отсутствие стандартизации линеек, предоставляемых разными производителями, а также то, что масштабная калибровка линеек Б.Л. Поляка проводилась аж в 70-х годах двадцатого столетия [13]. Технологии искусственного интеллекта продолжают все более широко проникать в повседневную медицинскую практику, и анализ диаметра отпечатка, полученного при измерении ВГД по методу Маклакова, не исключение. Так, web-приложение <http://ai-tonometry.com> позволяет одновременно оценить несколько оттисков ВГД и рассчитать тонометрический уровень без использования измерительной линейки. Вышеупомянутое приложение основано на работе ансамбля сверточных нейро-

сетей и вспомогательных алгоритмов, предназначенных для нормализации и постобработки результатов. Первая нейросеть выделяет на фотографии тонометрические отпечатки, отмечая в пикселях координаты бокса, внутри которого находится отпечаток (далее «Детектор»). Вторая — рассчитывает отношение диаметра внутреннего круга отпечатка к диаметру внешнего (далее «Регрессор»).

Цель настоящей работы — оценить точность оценки врачами и искусственным интеллектом отпечатков, полученных при измерении ВГД по методу Маклакова.

Материалы и методы

На конференции в г. Москва проведена практическая работа. Были подготовлены две пары тонограмм, полученных при измерении ВГД по методу Маклакова грузом 10,0 г. Разметка тонограмм проводилась анонимно при помощи измерительной линейки проф. Б.Л. Поляка для 4-х тонометров Маклакова. Всего в работе приняло участие 57 офтальмологов. Каждый отпечаток ВГД оценивался отдельно, однако в связи с претензиями к качеству оттисков количество измерений каждого отпечатка разнилось, и в работе проанализированы данные наиболее качественного оттиска с максимальным количеством измерений (n=40). За эталон измерения была принята коллегиальная оценка отпечатка (линейкой для 10 г тонометра Маклакова) президиумом конференции в лице д.м.н. Е.В. Карловой, д.м.н. Л.Л. Арутюнян и к.м.н. А.А. Антонова. Тонometricкий уровень на анализируемой тонограмме составил 17 мм рт.ст. (рис. 1).

Каждый из этих отпечатков был сфотографирован на камеру смартфона Xiaomi mi 6 40 раз с различным уровнем освещенности и различным углом поворота относительно нормали к фокальной плоскости линзы. Полученные фотографии в формате jpg были проанализированы алгоритмами <http://ai-tonometry.com>. На Детектор подавались цветные фотографии, при этом в ходе испытаний нейросетью были обнаружены все 100% оттисков. Выделенные области обрезались и поступали в предобработку

алгоритмом Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE) для локализации более четких границ, а после этого переводились в бинарные матрицы (матрицы, состоящие из «0» и «1»). Полученные матрицы анализировались Регрессором, сверточной нейронной сетью с функцией активации сигмоида. Результатом работы Регрессора является отношение диаметра внутреннего круга к внешнему, которое впоследствии переводится в мм рт.ст. с помощью формулы (1):

$$P = 931,65 \times (r \times 10)^{-2,048} \quad (1)$$

где P — давление в мм рт.ст.;

r — отношение диаметров, которое было предсказано Регрессором.

Формула (1) была выведена путем аппроксимации значений, указанных на линейке Поляка, с целью получить непрерывное выражение. Точность аппроксимации составляет 98%.

Методы статистического анализа

Обработка полученных данных проводилась R Core Team (2016). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>. Приводимые параметры, имеющие нормальное распределение (нормальность распределения проверялась с помощью теста Шапиро - Уилка, гомогенность дисперсии — с помощью теста Бартлетта), представлены в формате $M \pm \sigma$, где M — среднее значение, σ — стандартное отклонение среднего значения. Параметры, имеющие распределение отличное от нормального, представлены в формате $Me (Q25%; Q75%)$, где Me — медиана, Q25%



Рис. 1. Оттиск тонометра Маклакова 10 г с линейкой проф. Б.Л. Поляка для 4-х тонометров Маклакова

Fig. 1. A tonogram, obtained by means of Maklakov tonometry with a load of 10.0 g with a measuring ruler devised by prof. B.L. Polyak for 4 Maklakov tonometers

и Q75% — квантили. При нормальном распределении параметров для сравнения 2 независимых групп или повторных внутригрупповых изменений использовался t-критерий Стьюдента. При отличном от нормального распределения параметров при сравнении нескольких выборок использовался критерий Уилкоксона. Критический уровень значимости при проверке статистических гипотез принимался равным $<0,05$.

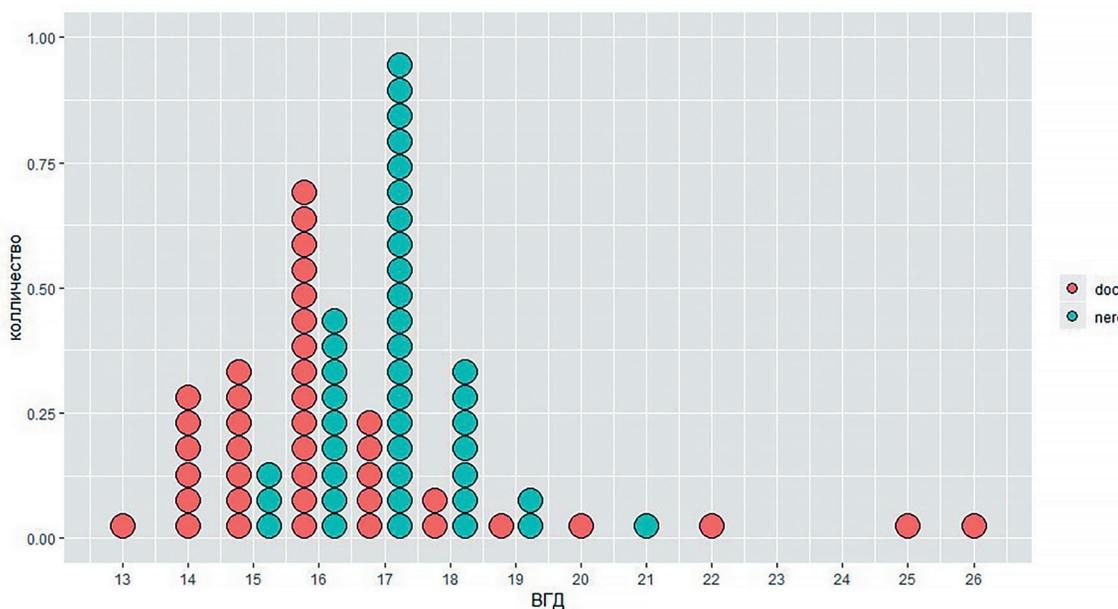


Рис. 2. График дот-плот для измерений врачей (красные точки) и искусственного интеллекта (голубые точки)

Fig. 2. Dotplot for measurements made by doctors (red dots) and the artificial intelligence (blue dots)

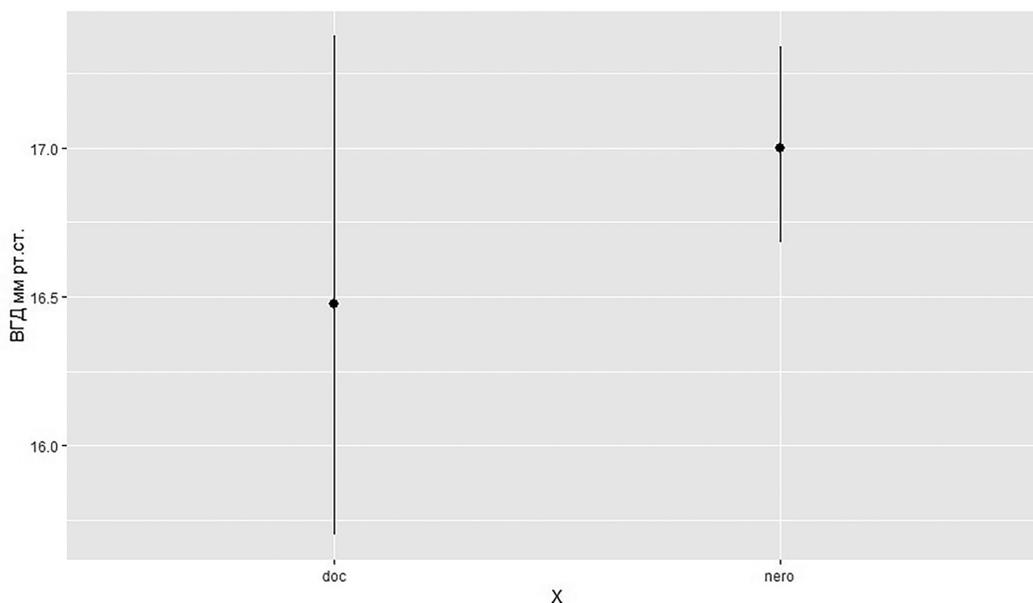


Рис. 3. График 95% доверительного интервала для измерений врачей (doc) и искусственного интеллекта (nero)
 Fig. 3. Graph of 95% confidence interval for measurements made by doctors (doc) and the artificial intelligence (nero)

Результаты и обсуждение

Оттиск с максимальным количеством измерений 40 и коллегиально принятым достоверным тонометрическим уровнем 17 мм рт.ст. врачами был измерен с вариационным рядом от 13 до 26 мм рт.ст. (рис. 2).

В то же время диапазон измерений нейросети составил от 15 до 21 мм рт.ст.

Среднее значение измерений врачей составило $16,48 \pm 2,7$ 16,0 (15,0; 17) мм рт.ст., при этом нейросеть определила тонометрический уровень $17,0 \pm 1,1$ 17,0 (16,0; 17,0) мм рт.ст. Величина 95% доверительных интервалов представлена на рис. 3.

Как видно, в среднем врачи занизили ВГД на 0,5 мм рт.ст., в отличие от нейросети, и при этом 95% доверительный интервал при измерении диаметра оттиска нейросетью практически в 3 раза меньше по сравнению с измерениями врачей.

Ограничения и обсуждение

Для определения диаметра отпечатка при создании нейросети мы выяснили, что, несмотря на проведение калибровки тонометров Маклаков (А.П. Нестеров и М.Б. Вурдафт [13]) еще в 1971 году, измерительные линейки не были изменены производителями приборов (рис. 4).

Так, например, по данным калибровочных таблиц диаметр оттиска 18,2 мм рт.ст. для тонометра Маклакова 10 г должен соответствовать 28,8 мм рт.ст. на линейке для тонометра 15 г, однако на измерительной линейке проф. Б.Л. Поляка для 4-х тонометров Маклакова такого соответствия не наблюдается, и мы видим разницу в 1,9 мм рт.ст.

Кроме того, А.Е. Вурдафт провел анализ точности измерительных линеек Б.Л. Поляка [12] и выявил разнородность современных измерительных линеек Б.Л. Поляка и неудовлетворительную соотносимость результатов, получаемых с помощью различных линеек.

Следует отметить, что А.Е. Вурдафт в своей статье о точности измерительных линеек [12] и А.С. Покровский в статье об уровнях ВГД у здоровых лиц [14] отмечают, что отсутствие десятых долей миллиметра в измерительных линейках Б.Л. Поляка является одной из базовых причин погрешностей метода тонометрии по Маклакову [12, 14].

А.Е. Вурдафт дополнительно отмечает плохую соотносимость результатов измерения между тремя измерительными линейками «истинного» ВГД для тонометров Маклакова, что затрудняет стандартизацию измерений [12].

В работе С.Ю. Казановой проанализированы измерения тонометрических отпечатков 78 врачами, при этом было выявлено значительное расхождение результатов измерения как в большую, так и в меньшую стороны. Варьирование полученных результатов между крайними значениями составило от 10 до 29 мм рт.ст. [15]. При такой «точности» завышение уровня ВГД при измерении оттиска приводит к неоправданному усилению лечения, снижая качество жизни пациента, увеличивает финансовую нагрузку на пациента и неизбежно вызывает снижение комплаенса [15]. В то же время занижение результатов измерения приводит к ложным выводам о стабилизации процесса и неизбежно влечет за собой прогрессирование глаукомного процесса [15].

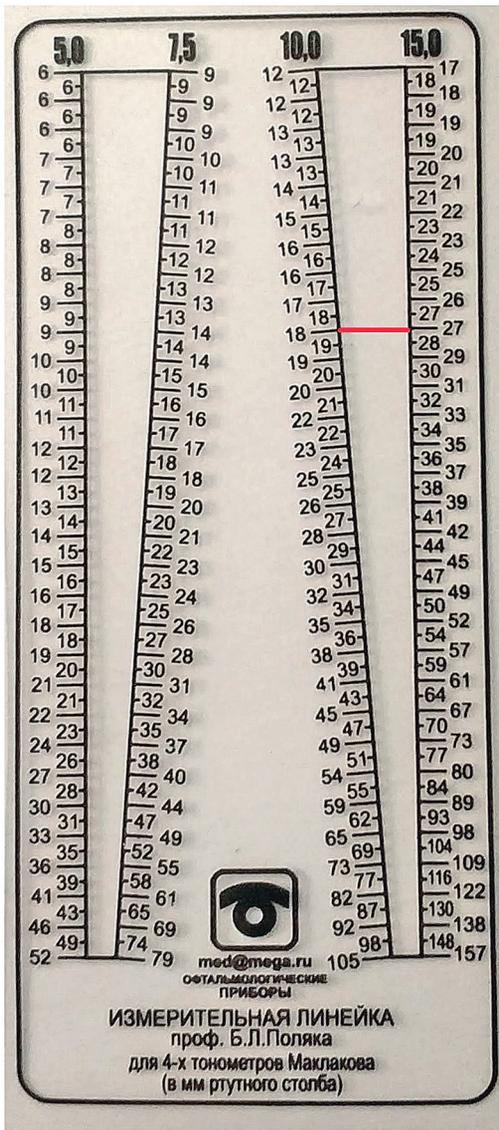


Таблица 1
Тониметрическое давление
(в мм рт. ст.)

D	Вес тонометра (в г)			
	5	7.5	10	15
3,0	71,7			
3,1	60,9			
3,2	62,8			
3,3	58,7			
3,4	54,6	81,4		
3,5	51,3	77,3		
3,6	48,0	73,2		
3,7	44,8	69,1		
3,8	42,4	65,2		
3,9	40,1	61,6		
4,0	38,2	58,2	75,2	
4,1	36,1	54,8	71,4	
4,2	34,3	51,6	67,6	101,9
4,3	32,3	48,5	64,4	96,9
4,4	30,4	45,6	61,2	92,0
4,5	28,6	43,0	58,2	87,5
4,6	27,2	40,4	55,5	83,1
4,7	25,9	38,6	52,9	79,3
4,8	24,6	36,7	50,4	75,4
4,9	23,4	34,8	48,0	72,4
5,0	22,3	32,9	45,6	69,3
5,1	21,3	31,2	43,5	66,4
5,2	20,4	29,6	41,5	63,6
5,3	19,5	28,1	39,6	61,0
5,4	18,7	26,8	37,8	58,5
5,5	17,9	25,8	36,0	56,2
5,6	17,1	24,8	34,2	54,0
5,7	16,4	23,9	32,6	52,0
5,8	15,8	23,0	31,0	50,0
5,9	15,0	22,2	29,6	48,2
6,0	14,3	21,4	28,3	46,4
6,1	13,5	20,7	27,4	44,7
6,2	12,8	20,0	26,5	43,1
6,3	12,3	19,3	25,7	41,5
6,4	11,8	18,6	24,9	39,9
6,5	11,5	17,9	24,1	38,4
6,6	11,2	17,3	23,4	36,9
6,7	10,9	16,7	22,7	35,7
6,8	10,6	16,1	22,1	34,3
6,9	10,3	15,5	21,5	33,2
7,0	10,0	14,9	20,9	32,2
7,1	9,6	14,4	20,2	31,3
7,2	9,2	14,0	19,5	30,5
7,3	8,7	13,6	18,8	29,7
7,4	8,3	13,2	18,2	28,9
7,5		12,8	17,6	28,2
7,6		12,4	16,9	27,4
7,7		11,9	16,4	26,6
7,8		11,5	15,9	25,8
7,9		10,9	15,3	25,0
8,0		10,4	14,8	24,2
8,1			14,3	23,4
8,2			13,8	22,6
8,3			13,3	21,8
8,4			12,9	21,0
8,5				20,2
8,6				19,4
8,7				18,6
8,8				17,9
8,9				17,3
9,0				16,9

Обозначение. Здесь и в табл. 2—5
D — диаметр тонометра (в мм).

Рис. 4. Измерительная линейка проф. Б.Л. Поляка для 4-х тонометров Маклакова и калибровочная таблица А.П. Нестерова и М.Б. Вургафта для 4-х тонометров Маклакова (1971 г.)

Fig. 4. A measuring ruler devised by prof. B.L. Polyak for 4 Maklakov tonometers and Nesterov and Vurgaft calibration tables (1971)

Т.Г. Каменских с соавт. в своей работе по созданию мобильного приложения для измерения оттосков ВГД выявили, что при распознавании снимков мобильным приложением погрешность составила $\pm 1,6$ мм рт.ст., встроенный в алгоритм метод селекции отпечатков, не имеющих формы круга, позволил повысить точность измерения ВГД в спорных случаях. Затраты времени на интерпретацию и мониторинг динамики результатов врачом составили в среднем $66 \pm 10,65$ с. При использовании смартфона с приложением — $42 \pm 8,15$ с [16]. Таким образом, использование приложения для измерения ВГД не только увеличивает воспроизводимость исследования, но и позволяет оптимизировать процесс измерения ВГД, уменьшая время на измерение оттосков.

При повторном измерении отпечатков точность измерения врача городского глаукомного кабинета города Челябинска Д.А. Дорофеева в среднем по двум парам оттосков от правого и левого глаза (200 глаз; 400 оттосков) составляет 0,2 мм рт.ст. ($p > 0,05$) в сторону завышения, что, вероятно, связано с подсознательным желанием благополучия пациента и, возможно, приводит к несколько меньшим результатам измерения в момент приема. При повторном же измерении, когда измерение обезличено и не может оказать влияние на дальнейшее ведение пациента, вероятно, происходит более точное измерение. Но тем не менее эта разница не является статистически значимой. Величины 95% доверительного интервала при первом и вто-

ром измерении одной и той же выборки оттисков составили 1,073 и 1,211 мм рт.ст. соответственно, а доверительный интервал нейросети практически в 2 раза меньше (0,652 мм рт.ст.).

Также было проведено сравнение измерения оттисков (130 глаз, 260 оттисков) ординатором второго года обучения кафедры глазных болезней ЮУГМУ. Выявлено также увеличение среднего уровня ВГД в выборке примерно на 0,5 мм рт.ст. ($p < 0,05$). В данном случае расхождения с результатами измерений во время приема можно объяснить двумя предположениями: во-первых, меньшим опытом работы, во-вторых, если предположить, что повторное измерение Д.А. Дорофеева было более точным, то получается, что завышение не такое и значительное. Однако при сравнении двух серий измерений получено статистически значимое отличие. Величины 95% доверительного интервала при первом (врач Д.А. Дорофеев) и втором (ординатор второго года Л.О. Визгалова) измерениях одной и той же выборки оттисков составили 1,710 и 1,740 мм рт.ст. соответственно (что соответствует доверительному интервалу сорока врачей 1,732 мм рт.ст.), а в этом случае доверительный интервал нейросети уже практически в 3 раза меньше (0,652 мм рт.ст.).

С учетом вышесказанного и увеличением в последние годы многоцентровых работ, выполняемых в РФ и странах СНГ (преимущественно силами исследовательской группы «Научный авангард» и Российского глаукомного общества [17–26]), применение технологий искусственного интеллекта,

позволяющего увеличить воспроизводимость и повторяемость результатов измерения ВГД по методу Маклакова, представляется перспективной возможностью для стандартизации получаемых данных.

Однако, несмотря на высокие результаты, предстоит дальнейшая работа по увеличению повторяемости и воспроизводимости работы искусственного интеллекта.

Заключение

Мобильное приложение на основе искусственного интеллекта позволяет с более высокой точностью и высокой воспроизводимостью измерить отпечатки, полученные при тонометрии по методу Маклакова. Так, при измерении врачами оттиска ВГД 17 мм рт.ст. был получен вариационный ряд от 13 до 26 мм рт.ст. В то же время диапазон измерений нейросети составил от 15 до 21 мм рт.ст. Среднее значение измерений врачей составило $16,48 \pm 2,7$ 16,0 (15,0; 17) мм рт.ст., и при этом нейросеть определила тонометрический уровень $17,0 \pm 1,1$ 17,0 (16,0; 17,0) мм рт.ст. Таким образом, использование технологий искусственного интеллекта, вероятно, увеличит качество мониторинга внутриглазного давления и потенциально может привести к снижению количества пациентов с прогрессированием глаукомы. А разработка механизмов контроля качества оттисков (находится в стадии разработки) позволит отбраковать отпечатки неудовлетворительного качества и результаты их измерений рассматривать как сомнительные.

Литература

1. Казанцева С.Ю. Ошибки измерения внутриглазного давления при тонометрии по Маклакову. *Глаукома Журнал НИИ ГБ РАМН*. 2013; 4:72–81.
2. Макашова Н.В., Чжан Гофан, Васильева А.Е. Методы тонометрии и роль различных проб в ранней диагностике глаукомы (часть 1). *Национальный журнал глаукома*. 2014; 13(3):88–94.
3. Егоров Е.А., Еричев В.П., Куроедов А.В., Петров С.Ю и др. Показатели офальмотонометрии в здоровой популяции. *Национальный журнал глаукома*. 2018; 17(2):91–98.
4. Авдеев Р.В., Александров А.С., Бакунина Н.А. и др. Прогнозирование продолжительности сроков заболевания и возраста пациентов с разными стадиями первичной открытоугольной глаукомы. *Национальный журнал глаукома*. 2014; 13(2):60–69.
5. Астахов Ю.С., Соколов В.О., Морозова Н.В. и др. Оценка гипотензивной терапии с использованием суточного мониторинга внутриглазного давления. *Офтальмологические ведомости*. 2015; 8(3):51–55.
6. Мачехин В.А. Истинное внутриглазное давление по данным пневмотонометрии и по данным аппланационной тонометрии по Маклакову. *Вестник Оренбургского государственного университета*. 2013; 4:170–174.
7. Ермакова А.В., Страхов В.В., Алексеев В.В. Сравнительный анализ величины и асимметрии тонометрических параметров парных глаз в норме. *Офтальмологические ведомости*. 2011; 4(3):4–10.
8. Моисеева И.Н., Штейн А.А. Влияние пространственной неоднородности роговицы на деформационные свойства глазного яблока и результаты аппланационной тонометрии по Маклакову. *Биофизика*. 2017; 62(6):1193–1203.

References

1. Kazanceva S.Y. Errors in intraocular pressure measurements when performing Maklakov tonometry. *Glaukoma Zhurnal NII GB RAMN*. 2013; 4:72–81. (In Russ.).
2. Makashova N.V., Zhang Gofan, Vassilieva A.E. Tonometry methods and the role of different samples in the early diagnosis of glaucoma (part 1). *Natsional'nyi zhurnal glaukoma*. 2014; 13(3):88–94. (In Russ.).
3. Egorov E.A., Yerichev V.P., Kuroedov A.V., Petrov S.Y. et al. Tonometric intraocular pressure reference values in healthy population. *Natsional'nyi zhurnal glaukoma*. 2018; 17(2):91–98. (In Russ.).
4. Avdeev R.V., Aleksandrov A.S., Bakunina N.A. et al. Prediction of disease duration and age of patients with different primary open-angle glaucoma changes. *Natsional'nyi zhurnal glaukoma*. 2014; 13(2):60–69. (In Russ.).
5. Astakhov Y.S., Sokolov V.O., Morozova N.V. et al. IOP-lowering therapy evaluation using 24-hour IOP monitoring. *Oftal'mologicheskie vedomosti*. 2015; 8(3):51–55. (In Russ.).
6. Machehin V.A. True intraocular pressure according to the data obtained with pneumotonometry and applanation tonometry by Maklakoff. *Vestnik Orenburskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2013; 4:170–174. (In Russ.).
7. Ermakova A.V., Strakhov V.V., Alekseev V.V. Comparative analysis of magnitude and asymmetry of tonometric parameters of paired eyes in health. *Oftal'mologicheskie vedomosti*. 2011; 4(3):4–10. (In Russ.).
8. Moiseeva I.N., Shtein A.A. Effect of spatial inhomogeneity of the cornea on the deformation properties of the eyeball and the results of Maklakoff applanation tonometry. *Biofizika*. 2017; 62(6):1193–1203. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/s0006350917060173>

9. Нугманова А.Р., Азнабаев Б.М., Загидуллина А.Ш. и др. Тонметрия у пациентов с первичной открытоугольной глаукомой и индивидуальных морфометрических показателей глаза и биомеханических свойств с учетом корнеосклеральной оболочки. *Практическая медицина*. 2018; 9:130–135.
10. Аветисов С.Э., Бубнова И.А., Антонов А.А. Исследование влияния биомеханических свойств роговицы на показатели тонметрии. *Сибирский научный медицинский журнал*. 2009; 29(4):30–33.
11. Аветисов С.Э., Бубнова И.А., Петров С.Ю. и др. Значение фактора резистентности роговицы в трактовке результатов тонметрии. *Национальный журнал глаукома*. 2012; 1:12–15.
12. Вурдафт А.Е. О точности измерительных линеек Б.Л. Поляка. *Национальный журнал глаукома*. 2017; 16(4):11–22.
13. Нестеров А.П., Вурдафт М.Б. Калибровочные таблицы для эластонометра Филатова-Кальфа. *Вестник офтальмологии*. 1972; 88(2):20–25.
14. Покровский А.С. Распределение внутриглазного давления у здоровых лиц. *Офтальмологические ведомости*. 2012; (2):83–86.
15. Казанова С.Ю. Ошибки измерения внутриглазного давления при тонметрии по Маклакову. *Национальный журнал глаукома*. 2013; 4:72–81.
16. Каменских Т.Г., Моисеев Р.В., Крючков Ю.А. Создание мобильного приложения для смартфонов под управлением операционных систем Android и iOS с целью оптимизации интерпретации результатов диагностики уровня внутриглазного давления больных глаукомой. *Бюллетень медицинских интернет-конференций*. 2016; 6(6):1251.
17. Куроедов А.В., Абышева Л.Д., Александров А.С., Бакунина Н.А. и др. Тактика ведения пациентов с первичной открытоугольной глаукомой на практике: варианты медикаментозного, лазерного и хирургического лечения. *Медико-биологические проблемы жизнедеятельности*. 2016; 15(1):170–185.
18. Куроедов А.В., Абышева Л.Д., Авдеев Р.В., Александров А.С. и др. Медико-экономическое многоцентровое исследование эффективности и стоимости местной гипотензивной терапии для пациентов с первичной открытоугольной глаукомой в странах СНГ. *Офтальмология Восточная Европа*. 2015; 3(26):35–51.
19. Куроедов А.В., Абышева Л.Д., Авдеев Р.В., Александров А.С. и др. Уровни внутриглазного давления при различном местном гипотензивном лечении при первичной открытоугольной глаукоме (многоцентровое исследование). *Офтальмология Восточная Европа*. 2016; 28(1):27–42.
20. Онуфрийчук О.Н., Авдеев Р.В., Александров А.С., Басинский А.С. и др. Морфофункциональные изменения макулярной области сетчатки при «сухой» форме возрастной макулодистрофии (обзор). *РМЖ. Клиническая офтальмология*. 2013; 14(3):123–130.
21. Абышева Л.Д., Авдеев Р.В., Александров А.С., Арапов М.У. и др. Влияние местной гипотензивной терапии глаукомы на развитие и прогрессирование синдрома «сухого глаза». *РМЖ Клиническая офтальмология*. 2017; 17(2):74–82.
22. Авдеев Р.В., Александров А.С., Басинский А.С., Блюм Е.А. и др. Оценка клинично-инструментальных данных исследования органа зрения у больных первичной открытоугольной глаукомой и макулодистрофией. *Медицинский вестник Башкортостана*. 2014; 9(2):24–28.
23. Авдеев Р.В., Бакунина Н.А., Басинский А.С., Брежнев А.Ю. и др. Менеджмент прогрессирования глаукомы. *Национальный журнал глаукома*. 2019; 18(1):45–58.
24. Авдеев Р.В., Александров А.С., Бакунина Н.А., Белая Д.А. и др. Сопоставление режимов лечения больных первичной открытоугольной глаукомой с характеристиками прогрессирования заболевания. Часть 2. Эффективность инициальных режимов гипотензивного лечения. *Национальный журнал глаукома*. 2018; 17(2):65–83.
25. Авдеев Р.В., Александров А.С., Бакунина Н.А., Белая Д.А. и др. Сопоставление режимов лечения больных первичной открытоугольной глаукомой с характеристиками прогрессирования заболевания. Часть 1. Состояние показателей офтальмотонуса. *Национальный журнал глаукома*. 2018; 17(1):14–28.
26. Городничий В.В., Дорофеев Д.А., Завадский П.Ч., Зверева О.Г. 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.
9. Nugmanova A.R., Aznabaev B.M., Zagidullina A.Sh. et al. Tonometry of patients with primary open-angle glaucoma taking into account the individual morphometric eye parameters and biomechanical properties of corneoscleral shell. *Prakticheskaya meditsina*. 2018; 9:130–135. (In Russ.). <https://doi.org/10.32000/2072-1757-2018-9-130-135>
10. Avetisov S.E., Bubnova I.A., Antonov A.A. The study of the effect of the corneal biomechanical properties on the intraocular pressure measurement. *Sibirskii nauchnyi meditsinskii zhurnal*. 2009; 29(4):30–33. (In Russ.).
11. Avetisov S.E., Bubnova I.A., Petrov S.Yu. et al. The value of the corneal resistance factor in a tonometry results treatment. *Natsional'nyi zhurnal glaukoma*. 2012; 1:12–15. (In Russ.).
12. Vurdaft A.E. On the precision of Polyak measuring scales in Maklakov tonometry. *Natsional'nyi zhurnal glaukoma*. 2017; 16(4):11–22. (In Russ.).
13. Nesterov A.P., Vurdaft M.B. Calibration tables for the Filatov-Kalf elastotonometer. *Vestnik oftal'mologii*. 1972; 88(2):20–25. (In Russ.).
14. Pokrovsky A.S. Distribution of intraocular pressure in healthy individ. *Oftal'mologicheskie vedomosti*. 2012; (2):83–86. (In Russ.).
15. Casanova S.Y. Errors in intraocular pressure measurements when performing Maklakov tonometry. *Natsional'nyi zhurnal glaukoma*. 2013; 4:72–81. (In Russ.).
16. Kamenskix T.G., Moiseev R.V., Kryuchkov Yu.A. Creating a mobile smartphone app running Android and iOS operating systems to optimize interpretation of the results of diagnosis of intraocular pressure patients glaucoma. *Bulletin of Medical Internet Conferences*. 2016; 6(6):1251. (In Russ.).
17. Kuroedov A.V., Abysheva L.D., Aleksandrov A.S., Bakunina N.A. et al. Management of primary open-angle glaucoma in practice: variants of medical, laser and surgical treatment. *Mediko-biologicheskie problemy zhiznedeyatel'nosti*. 2016; 15(1):170–185. (In Russ.).
18. Kuroedov A.V., Abysheva L.D., Avdeev R.V., Aleksandrov A.S. et al. Medico-economic multicenter study of local hypotensive therapy efficacy and cost for patients with primary open-angle glaucoma in CIS. *Oftal'mologiya Vostochnaya Evropa*. 2015; 3(26):35–51. (In Russ.).
19. Kuroedov A.V., Abysheva L.D., Avdeev R.V., Aleksandrov A.S. et al. Intraocular pressure level in various local antihypertensive therapy in primary open-angle glaucoma (multicenter study). *Oftal'mologiya Vostochnaya Evropa*. 2016; 28(1):27–42. (In Russ.).
20. Onufriyчук O.N., Avdeev R.V., Aleksandrov A.S., Basinsky A.S. et al. Morphofunctional retinal changes in patients with non-neovascular age-related macular degeneration (literature review). *RMZh. Klinicheskaya oftal'mologiya*. 2013; 14(3):123–130. (In Russ.).
21. Abysheva L.D., Avdeev R.V., Aleksandrov A.S., Arapiev M.U. et al. Influence of local hypotensive glaucoma therapy on the development and progression of dry eye syndrome. *RMZh Klinicheskaya oftal'mologiya*. 2017; 17(2):74–82. (In Russ.).
22. Avdeev R.V., Aleksandrov A.S., Basinsky A.S., Blum E.A. et al. Evaluation of clinical and instrumental data of eyes examination in patients with primary open-angle glaucoma and macular degeneration. *Meditsinskii vestnik Bashkortostana*. 2014; 9(2):24–28. (In Russ.).
23. Avdeev R.V., Bakunina N.A., Basinsky A.S., Brezhnev A.Y. et al. Management of glaucoma progression. *Natsional'nyi zhurnal glaukoma*. 2019; 18(1):45–58. (In Russ.). <https://doi.org/10.25700/NJG.2019.01.07>
24. Avdeev R.V., Aleksandrov A.S., Bakunina N.A., Belaya D.A. et al. Comparison of treatment regimens for patients with primary open-angle glaucoma with the characteristics of disease progression. Part 2. The efficacy of initial antihypertensive treatment regimes. *Natsional'nyi zhurnal glaukoma*. 2018; 17(2):65–83. (In Russ.). <https://doi.org/10.25700/NJG.2018.02.07>
25. Avdeev R.V., Aleksandrov A.S., Bakunina N.A., Belaya D.A. et al. Comparison of treatment regimens for patients with primary open-angle glaucoma with signs of disease progression. Part 1. IOP levels. *Natsional'nyi zhurnal glaukoma*. 2018; 17(1):14–28. (In Russ.).
26. Gorodnichiy V.V., Dorofeev D.A., Zavadsky P.C., Zvereva O.G. et al. Risk factors, pathogenic factors in progression of glaucoma by results of multicenter study of russian glaucoma society. *Mediko-biologicheskie problemy zhiznedeyatel'nosti*. 2012; 8(2):57–69. (In Russ.).

Поступила / Received / 23.12.2019