

Возможности вакуум-компрессионной пробы в оценке кератотопографических индексов в диагностике глаукомы у лиц молодого возраста

Анисимова С.Ю., д.м.н., профессор, врач-офтальмолог, генеральный директор¹;
<https://orcid.org/0000-0003-0562-5440>

Арутюнян Л.Л., д.м.н., профессор кафедры офтальмологии², заведующая диагностическим отделением¹;
<https://orcid.org/0000-0002-9356-6526>

Анисимов С.И., д.м.н., профессор кафедры глазных болезней³, научный директор¹;
<https://orcid.org/0000-0003-1922-4939>

Братчук А.А., врач-офтальмолог¹, соискатель кафедры офтальмологии²;
<https://orcid.org/0009-0004-2037-7494>

Маммадова С.Ю., врач-офтальмолог¹, аспирант кафедры офтальмологии².
<https://orcid.org/0009-0006-3702-696X>

¹ООО Глазной центр «Восток–Прозрение», 123557, Российская Федерация, Москва, ул. П. Осипенко, 10, к. 1;

²ФГБОУ ДПО РМАНПО Минздрава РФ, 125993, Российская Федерация, Москва, ул. Баррикадная, 2/1, стр. 1;

³ФГБОУ ВО «Российский университет медицины» Минздрава России, 127006, Российская Федерация, Москва, ул. Долгоруковская, 4.

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

Конфликт интересов: отсутствует.

Для цитирования: Анисимова С.Ю., Арутюнян Л.Л., Анисимов С.И. и соавт. Возможности вакуум-компрессионной пробы в оценке кератотопографических индексов в диагностике глаукомы у лиц молодого возраста. *Национальный журнал глаукома.* 2025; 24(3):34-42.

Резюме

ЦЕЛЬ. Оценить эффективность новой нагрузочной кератотопографической пробы как способа объективного определения уровня офтальмотонуса в комплексной диагностике глаукомы, сочетающейся с кератэктазией, у пациентов молодого возраста.

МЕТОДЫ. На базе Глазного центра «Восток–Прозрение» были обследованы 15 пациентов с глаукомой и подозрением на глаукому. Средний возраст составил 33,9±8,02 года. Всем пациентам было выполнено стандартное офтальмологическое обследование и дополнительные методы, включая вакуум-компрессионную пробу с регистрацией кератотопографических индексов до и во время кратковременного индуцированного повышения внутриглазного давления (ВГД).

РЕЗУЛЬТАТЫ. У пациентов с глаукомой, сочетающейся с кератэктазией, при вакуум-компрессионной нагрузке в результате индуцированного повышения ВГД выявлены

биомеханические и кератотопографические изменения: снижение корнеального гистерезиса, занижение показателя ВГД, увеличение центральной толщины роговицы и ее кривизны, увеличение индексов элевации роговицы по передней и задней поверхностям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. При низких значениях корнеального гистерезиса или колебаниях уровня ВГД всем пациентам следует выполнять кератотопографию с целью выявления кератэктазии, которая может занижать результаты тонометрии. Нагрузочная проба с регистрацией кератотопографических данных в момент индуцированного повышения ВГД может способствовать раннему выявлению глаукомы, сочетающейся с кератэктазией, у молодых пациентов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: глаукома, глаукома лиц молодого возраста, кератоконус, вакуум-компрессионная проба, биомеханика фиброзной оболочки.

Для контактов:

Братчук Анна Алексеевна, e-mail: anutkasurkova2010@yandex.ru

ORIGINAL ARTICLE

Potential of vacuum-compression test in evaluation of corneal topographic indices for glaucoma diagnosis in young adults

ANISIMOVA S.YU., Dr. Sci. (Med.), Professor, ophthalmologist, Director¹;
<https://orcid.org/0000-0003-0562-5440>

ARUTYUNYAN L.L., Dr. Sci. (Med.), Professor at the Academic Department of Ophthalmology²,
 Head of the Diagnostics Department¹; <https://orcid.org/0000-0002-9356-6526>

ANISIMOV S.I., Dr. Sci. (Med.), Professor at the Academic Department of Eye Diseases³, Scientific Director¹;
<https://orcid.org/0000-0003-1922-4939>

BRATCHUK A.A., ophthalmologist¹, candidate student²; <https://orcid.org/0009-0004-2037-7494>

MAMMADOVA S.YU., postgraduate student², ophthalmologist¹; <https://orcid.org/0009-0006-3702-696X>

¹OOO Glaznoy Centr Vostok-Prozrenie, 10 Bld. 1 Poliny Osipenko St., Moscow, Russian Federation, 123007;

²Russian Medical Academy of Continuous Professional Education, 2/1 Barricadnaya St., Moscow, Russian Federation, 125993;

³Russian University of Medicine, 4 Dolgorukovskaya St., Moscow, Russian Federation, 127006.

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

Conflicts of Interest: none declared.

For citations: Anisimova S.Yu., Arutyunyan L.L., Anisimov S.I. et al. Potential of vacuum-compression test in evaluation of corneal topographic indices for glaucoma diagnosis in young adults. *Natsional'nyi zhurnal glaukoma*. 2025; 24(3):34-42.

Abstract

PURPOSE. To evaluate the effectiveness of a novel loading corneal topographic test as a method for objectively determining intraocular pressure levels in the comprehensive diagnostics of glaucoma in young patients with corneal ectasia.

METHODS. Fifteen patients with glaucoma and suspected glaucoma were examined at the Vostok-Prozrenie Eye Center. The average age was 33.9±8.02 years. All patients underwent standard ophthalmological examination and additional methods, including a vacuum-compression test (VCT) with corneal topographic indices recording before and during a short-term induced increase in IOP.

RESULTS. In patients with glaucoma combined with corneal ectasia, the vacuum-compression load with induced IOP

elevation revealed biomechanical and topographic changes: decreased corneal hysteresis, decreased IOP values, increased central corneal thickness and curvature, elevated anterior and posterior corneal surface elevation indices.

CONCLUSION. In patients with low corneal hysteresis or fluctuating IOP levels, all patients should undergo corneal topography to detect corneal ectasia, which may lead to underestimation of tonometry results. A stress test with recording of corneal topography during induced IOP elevation can facilitate early detection of glaucoma combined with corneal ectasia in young patients.

KEYWORDS: glaucoma, young adults with glaucoma, keratoconus, vacuum-compression test, biomechanics of fibrous tunic.

Глаукома — сложное и многофакторное глазное заболевание, являющееся второй по значимости причиной необратимой потери зрения во всем мире [1, 2]. На ранних стадиях глаукома зачастую протекает бессимптомно, что создает осложнения своевременную диагностику и лечение. Тенденция к росту числа молодых пациентов — в возрасте 18–45 лет — с подозрением на глаукому или установленным диагнозом глаукомы определяет актуальность поиска новых эффективных методов ранней диагностики данного заболевания.

Традиционно внимание ученых сосредоточено на заднем сегменте глаза, включая зрительный нерв и сетчатку. Однако в последнее время наблюдается растущий интерес к роговице как потенциальной ткани-мишени для ранней диагностики глаукомы [3]. Понимание того, как роговица реагирует на изменения внутриглазного давления (ВГД), может способствовать лучшему объяснению ее роли в развитии и прогрессировании глаукомы. Многочисленные исследования показали, что морфометрические параметры роговицы и ее биомеханические

свойства могут существенно влиять на достоверность результатов измерения ВГД [3–5]. Так, затруднения при верификации истинного уровня офтальмотонуса вызывает наличие у пациентов недиагностированной кератоэктазии в субклинической или развернутой стадиях патологического процесса, которая занижает уровень ВГД [6–10].

Наиболее часто встречающимся эктатическим заболеванием роговицы является кератоконус. Это прогрессирующее заболевание роговицы, характеризующееся ее центральным и парацентральным истончением и выпячиванием [11, 12]. Кератоконус считают заболеванием молодых людей, чаще всего он диагностируется во 2-м и 3-м десятилетиях жизни [12]. Учитывая отсутствие врачебной настороженности в отношении развития глаукомы в молодом возрасте, «нормальный» уровень ВГД и снижение показателей биомеханики глаза, в частности, корнеального гистерезиса (КГ) при кератоконусе, глаукома остается незамеченной [13].

Ключевым фактором риска прогрессирования таких заболеваний, как кератоконус и глаукома, у лиц молодого возраста, является истончение центральной толщины роговицы (ЦТР) [14, 15]. В рамках метаанализа, охватившего более 20 000 участников из различных популяций Европы и Азии, были выявлены 16 новых локусов, ассоциированных с ЦТР на уровне всего генома. Например, локус FNDC3B был ассоциирован с высоким риском возникновения кератоконуса и первичной открытоугольной глаукомой [16].

Учитывая, что роговица, склера, перипапиллярная соединительная ткань и решетчатая пластинка в глазу человека состоят из компонентов внеклеточного матрикса, кодируемых одними и теми же генами, можно предположить, что их биомеханические характеристики могут быть схожими [16]. Это подтверждает исследование группы ученых из университета Калифорнии, которые проанализировали характеристики напряжений и деформаций в срезах из разных областей глазного яблока человека [4]. Однако роговица, в отличие от склеры, обладает более высокими показателями эластичности и может выступать своего рода амортизатором для суточных колебаний ВГД. Johnson C.S. et al. показали вариабельность эластичности роговицы, например, в глаукомных глазах роговица обладает меньшей растяжимостью [5]. Такие изменения регистрируются при оценке биомеханического статуса фиброзной оболочки пациентов с глаукомой, в частности, это касается КГ.

Под гистерезисом понимается способность соединительных тканей глаза демпфировать изменения давления, как раз за счет таких регуляторных свойств фиброзной оболочки глаза, как уровень ригидности и эластичности, то есть способность к флуктуации [13]. Глазное яблоко с более тонкой роговицей и низким КГ становится менее эластичным

и более чувствительным к колебаниям ВГД, что приводит к быстрому прогрессированию глаукомы [14, 17].

В 2015 году Goel S. et al., а в 2019 году Utyama J. et al. опубликовали серию случаев, в которой была отмечена связь между глаукомой и кератоконусом [18, 19]. Хотя эта связь до конца не изучена, известно, что оба процесса связаны с изменениями в биомеханике глаза. Одна из гипотез, объясняющих развитие глаукомы у пациентов с эктатическими заболеваниями, заключается в том, что нарушение биомеханических свойств корнео-склеральной оболочки (обусловленное изменениями ее метаболизма и микроструктуры) может приводить к снижению поддержки зрительного нерва на уровне решетчатой пластинки, что повышает его восприимчивость к повреждению при глаукоме [6]. Заниженные результаты, а также колебания уровня ВГД при тонометрии могут возникать из-за нерегулярности роговицы — различий в её толщине и кривизне у пациентов с кератоконусом. Чтобы уменьшить эту погрешность, некоторые авторы предлагают биомеханическую и топографическую оценку роговицы с помощью двунаправленной аппланации и регистрации кератотопограмм [5, 6, 9, 20].

Одним из важных методов ранней диагностики глаукомы являются нагрузочные пробы. Они дают возможность провоцировать кратковременное увеличение ВГД, что, в свою очередь, способствует выявлению симптомов, которые могут оставаться замаскированными при стандартных обследованиях [21].

В настоящее время в литературе насчитывается более 40 различных нагрузочных проб, предназначенных для ранней диагностики глаукомы и оценки течения уже имеющегося состояния [22–23]. При проведении таких проб применяли следующие виды контроля: визометрический, тонометрический, периметрический, адаптометрический, ретинометрический, биомеханический, электрофизиологический [1, 21–24, 26, 27]. Однако до настоящего времени еще никто не исследовал изменения кератотопографических индексов при кратковременном индуцированном повышении ВГД в комплексной диагностике глаукомы.

Это подчеркивает важность комплексного подхода к изучению заболеваний глаз, что может привести к разработке более эффективных методов их диагностики и профилактики. Таким образом, научные работы, исследующие связь между кератоэктазиями и глаукомой, а также использование кератотопографии для оценки состояния роговицы, открывают новые горизонты в ранней диагностике глаукомы у пациентов молодого возраста.

Цель — оценить эффективность новой нагрузочной кератотопографической пробы как способа объективного определения уровня офтальмотонуса в комплексной диагностике глаукомы, сочетающейся с кератоэктазией у пациентов молодого возраста.

Материалы и методы

На базе ГЦ «Восток–Прозрение» обследовали 15 пациентов (28 глаз) в возрасте 21–47 лет ($33,9 \pm 8,02$ лет). Среди них у 7 глаукома установлена ранее, у 8 подозрение на глаукому. В ходе обследования и выполнения нагрузочной пробы у 5 испытуемых был обнаружен кератоконус в субклинической стадии, у 3 испытуемых — кератоконус 1–2 стадии, ранее не диагностированный.

Всем пациентам определяли роговично-компенсированное ВГД (ВГДрк) на пневмотонометре Reichert (Reichert, США), оценку проводили по результатам 3-кратного измерения ВГДрк. С помощью ORA (Ocular Response Analyzer, ORA, Reichert, США) определяли показатели биомеханических свойств роговицы: ВГДрк, ВГД по Гольдману (ВГДг), КГ и фактор резистентности роговицы (ФРР).

Состояние полей зрения оценивали на автоматическом проекционном компьютерном периметре AP-3000 (Tomey, Япония). Использовали стандартную пороговую программу Glaucoma, рекомендуемую для диагностики и мониторинга глаукомы.

Пациентам проводили оптическую когерентную томографию (ОКТ) диска зрительного нерва на приборе Ortopol Revo 60 OCT (Ortopol technology, Польша) в режимах DISK+MACULA 3D. При ОКТ анализировали толщину нервных волокон в нижнем, верхнем, назальном и темпоральном секторах и толщину ганглиозного комплекса в макулярной зоне.

Состояние роговицы оценивали с помощью кератотопографа SIRIUS+ (Италия). Для кратковременного повышения ВГД проводили вакуум-компрессионную пробу (ВКП). Нагрузку вакуумом осуществляли с помощью чашечки-присоски блока управления вакуум-компрессионного теста (СКТБ офтальмологического приборостроения «Оптимед», Россия; *рис. 1*). Перед пробой однократно закапывали местный анестетик, затем чашечку-присоску помещали в наружном отделе склеры в 2 мм от лимба. На *рис. 2* представлена кератоскопия с положением чашечки-присоски в момент выполнения нагрузочной пробы. Величина создаваемого давления разрежения в чашечке-присоске контролируется исполнителем по положению стрелки на отсчетной шкале индикатора блока управления. Уровень вакуума увеличивали до 80 мм рт.ст., что соответствует повышению офтальмотонуса на 8–10 мм рт.ст. от исходного уровня. Корнеотопограмму фиксировали до и во время ВКП. Продолжительность пробы в среднем составляла не более 3 минут на каждый глаз.

Оценивали следующие кератотопографические индексы: ЦТР, распределение значимых точек (NPS, Notable Points Spread), минимальную толщину



Рис. 1. Индикатор и блок управления ВКП.

Fig. 1. Indicator and control unit of the VCT system.

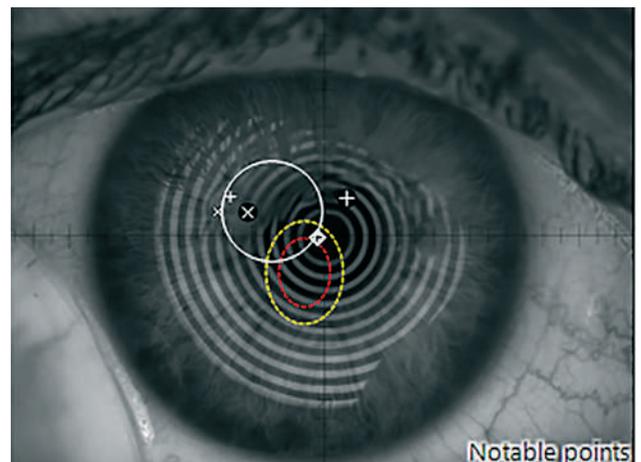


Рис. 2. Кератоскопия в момент выполнения топографического исследования с индуцированным подъемом ВГД.

Fig. 2. Keratotomy during topographic examination with induced IOP elevation.

роговицы (Thk_{min}), максимальное значение кривизны роговицы по передней поверхности (Kf_{max}), индекс элевации по задней и передней поверхностям роговицы, характерные для кератоконуса (соответственно, El^b и El^f).

Результаты

Средняя ЦТР составила $525,5 \pm 37,36$ мкм.

Данные кератотопографических индексов до кратковременного индуцированного повышения ВГД и во время ВКП у пациентов приведены в табл. 1 и 2. При выполнении кератотопографического исследования в состоянии покоя у 4 пациентов с установленным диагнозом глаукома и у 6 пациентов с подозрением на глаукому нам удалось выявить изменения индексов, характерные для кератоконуса. У всех пациентов кератоконус диагностирован впервые.

При индуцированном повышении ВГД в ходе выполнения пробы показатели, характерные для субклинического кератоконуса, были выявлены еще у 2 человек с диагнозом глаукомы и у 4 с подозрением на глаукому. У пациентов без кератоконуса с глаукомой или подозрением на глаукому и в состоянии покоя, и при нагрузке все индексы укладывались в пределы референсных значений, при этом ЦТР был ниже у пациентов с глаукомой.

Среди пациентов, у которых глаукома или подозрение на глаукому сочетались с кератоконусом, при повышении ВГД увеличивалась ЦТР, кривизна роговицы, а также значительно увеличивались El^b и El^f .

Таблица 1. Кератотопографические индексы пациентов до ВКП.
Значимые изменения выделены жирным.

Table 1. Corneal topographic indices before VCT test. Significant changes are shown in bold.

| Нозология Condition | Число глаз Number of eyes | Исходные показатели / Baseline indices | | | | | |
|---|---------------------------------|--|--------------------|-------------------|------------------|------------------|-----------------|
| | | ЦТР / CCT | Thk _{min} | Kf _{max} | NPS | El ^f | El ^b |
| Глаукома / Glaucoma | 10 | 505,5±22,0 | 501,4±22,24 | 44,7±1,15 | 1,3±0,4 | 0,2±0,3 | 0 |
| Глаукома в сочетании с кератоконусом Glaucoma and keratoconus | 4 | 536,2±11,4 | 532,5±11,5 | 43,5±0,7 | 1,14±0,24 | 0,3±0,3 | 0,06±0,1 |
| Подозрение на глаукому Suspected glaucoma | 8 | 553,8±51,7 | 549±51,9 | 45,35±1,1 | 1,49±0,3 | 0 | 0 |
| Подозрение на глаукому в сочетании с кератоконусом Suspected glaucoma and keratoconus | 6 | 516,9±19,9 | 510±24,83 | 44,19±1,32 | 1,13±0,7 | 0,87±1,23 | 0,54±0,9 |

Таблица 2. Кератотопографические индексы пациентов во время ВКП.
Значимые изменения выделены жирным.

Table 2. Corneal topographic indices during VCT. Significant changes are shown in bold.

| Нозология Condition | Число глаз Number of eyes | Показатели во время ВКП / Indices during VCT | | | | | |
|---|---------------------------------|--|--------------------|-------------------|-----------------|------------------|------------------|
| | | ЦТР / CCT | Thk _{min} | Kf _{max} | NPS | El ^f | El ^b |
| Глаукома / Glaucoma | 8 | 506,6±26,39 | 502,3±26,9 | 45,65±1,4 | 1,26±0,4 | 0,1±0,2 | 0 |
| Глаукома в сочетании с кератоконусом Glaucoma and keratoconus | 6 | 537,7±13,4 | 530,5±16,05 | 43,5±0,8 | 0,8±0,31 | 0,96±1,1 | 0,77±0,91 |
| Подозрение на глаукому Suspected glaucoma | 4 | 555,12±48,9 | 552,25±49,0 | 45,2±1,1 | 1,31±0,3 | 0 | 0 |
| Подозрение на глаукому в сочетании с кератоконусом Suspected glaucoma and keratoconus | 10 | 524±26,2 | 511,13±26,4 | 45,1±1,6 | 1,36±0,5 | 3,97±5,78 | 2,22±1,87 |

Клинический случай

Пациентка К, 38 лет, обратилась в клинику в связи с жалобами на ухудшение зрения, субъективно левый глаз видит хуже правого. Ранее при измерении ВГД на плановых осмотрах значения всегда были в пределах 16–17 мм рт.ст. При обследовании корригированная острота зрения 1,0 на оба глаза. ЦТР OD 549 мкм, OS 527 мкм; обращает

на себя внимание значительная разница между параметрами более 20 мкм. При 3-кратном измерении офтальмотонуса с помощью ОРА цифры ВГД колебались на обоих глазах от 17 до 24 мм рт.ст., при этом полученные значения были не симметричными. При оценке биомеханических параметров (рис. 3) на левом глазу ВГД незначительно ниже, однако и показатели КГ низкие.

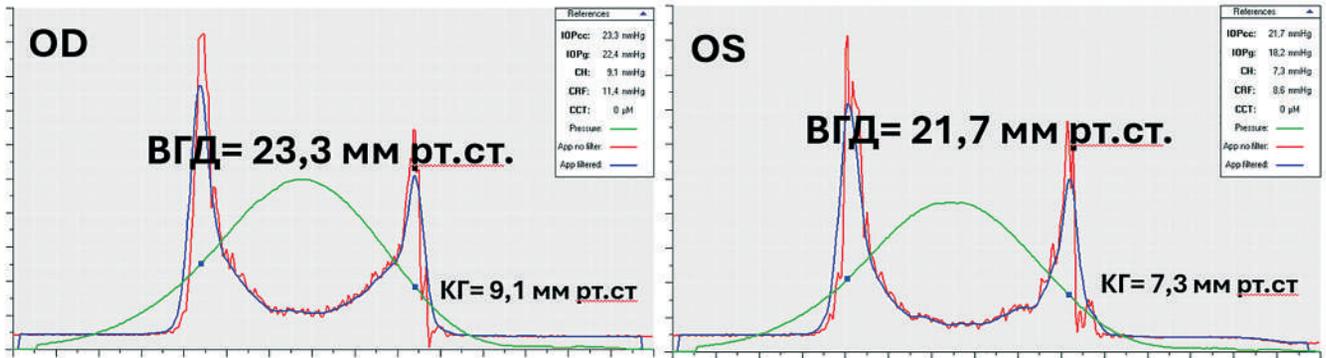


Рис. 3. Данные ОРА, корнеограмма.

Fig. 3. ORA data, corneogram.

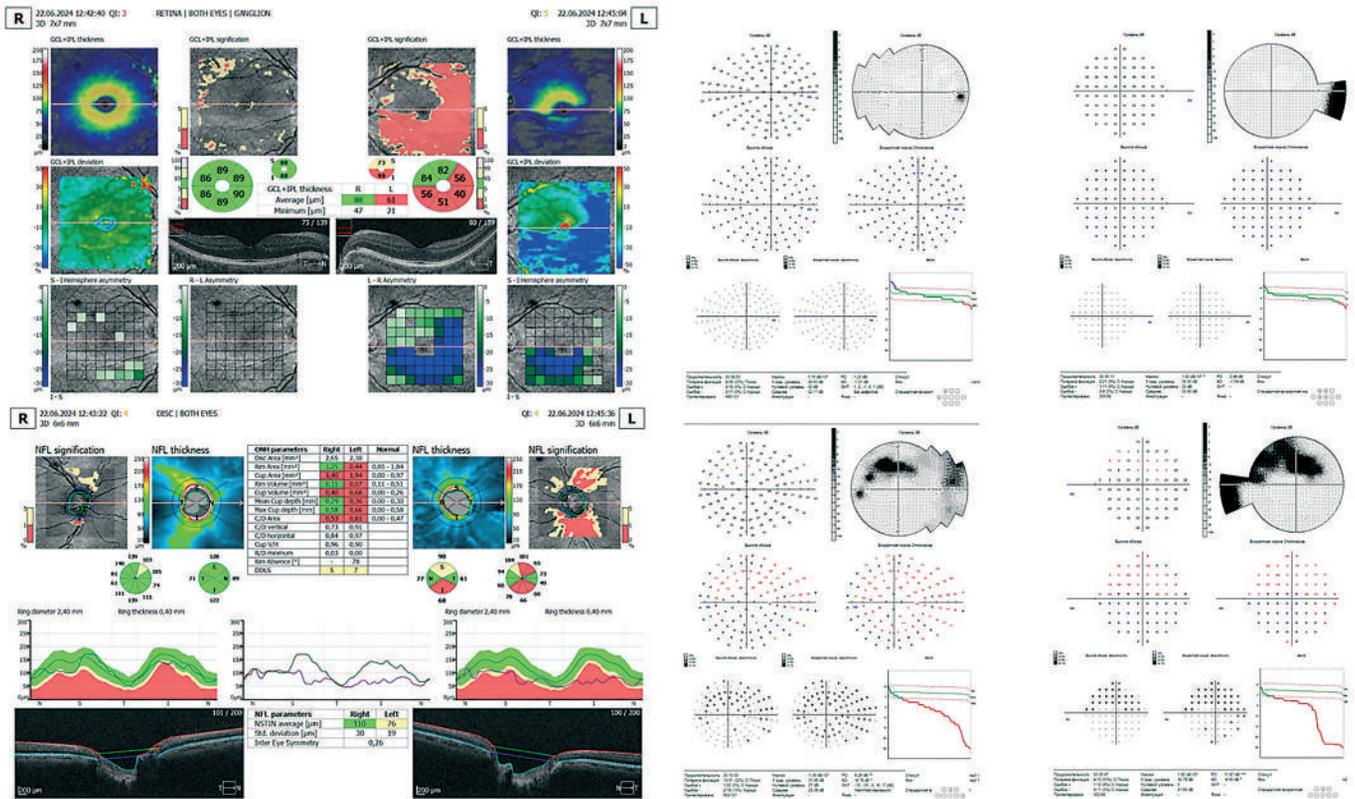


Рис. 4. Структурно-функциональное состояние глаз.

Fig. 4. Structural and functional status of the eyes.

OS

Кератотопография до ВКП

Corneal topography before VCT

ВКП
During VCT

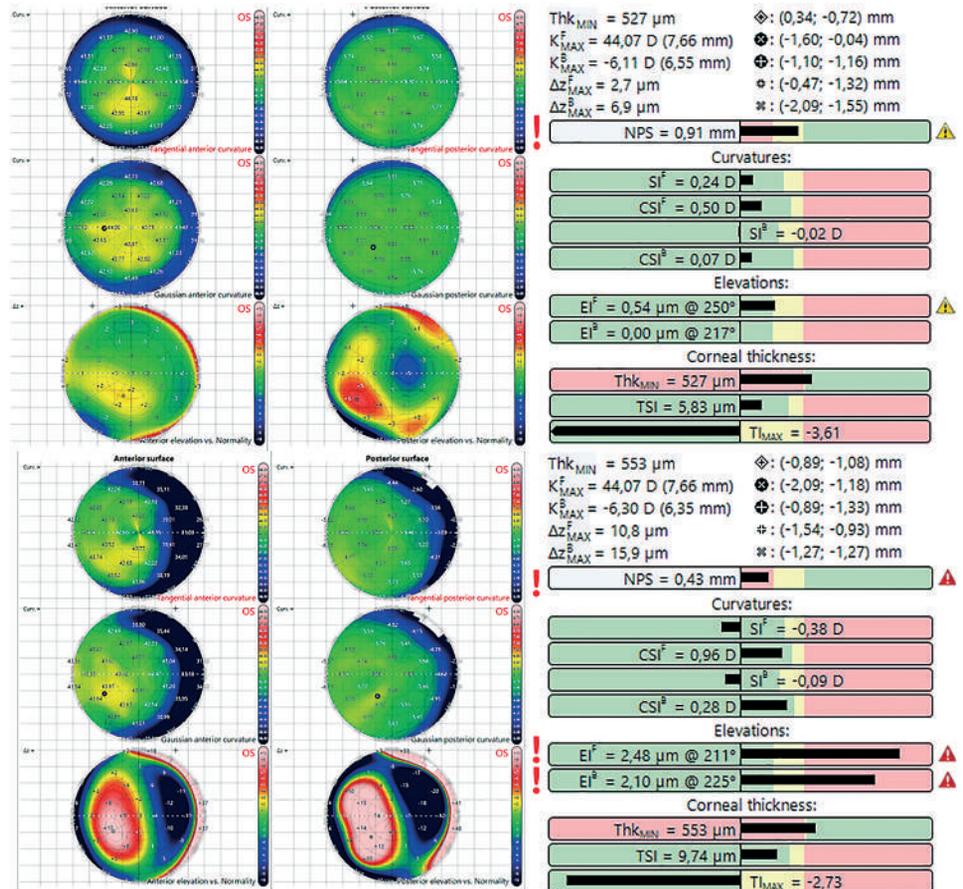


Рис. 5. Изменения топографических индексов до и во время ВКП.

Fig. 5. Changes in topographic indices before and during VCT.

При оценке структурно-функциональных параметров (рис. 4) на OS были выявлены глубокое повреждение ганглиозного комплекса, снижение толщины слоя нервных волокон диска зрительного нерва преимущественно в нижнем секторе, а также грубые изменения поля зрения — скотома в парацентральной области.

При кератотопографическом исследовании OS (рис. 5) даже в состоянии покоя индекс NPS снижен, а также отмечается снижение индекса эктазии по передней поверхности роговицы (EI^F). В момент индуцированного повышения ВГД значения кератотопографических индексов, патогномоничных для кератоконуса, снижаются и входят в красную зону (EI^B и EI^F).

Обсуждение

На базе глазного центра в течение 15 лет используются различные тесты с использованием ВКП, в том числе вычисление кератотензотопограмм и оценка морфометрических данных зрительного нерва с помощью ОКТ [24–27]. По результатам проведенного исследования в качестве критерия оценки мы стали учитывать изменения роговицы

в ответ на кратковременное повышение офтальмотонуса посредством регистрации изменений кератотопографических индексов до и во время нагрузки, а также оценили ее значимость при ранней диагностике глаукомы лиц молодого возраста.

У пациентов с нерегулярной роговицей с кератоконусом в субклинической или начальной стадии зафиксировано занижение значения ВГД, что, в свою очередь, затрудняет своевременную диагностику глаукомы. Мы предполагаем, что в молодом возрасте в связи со стойкими компенсаторными механизмами организма, подразумевающими под собой хорошую гидродинамику, качественный макро- и микроэлементный состав склеральной оболочки с высоким уровнем метаболической активности и т.д., уровень ВГД при нерегулярной роговице длительное время может оставаться в пределах «нормальных» значений. Однако с течением времени происходят изменения биомеханических свойств корнеосклеральной оболочки и во время осмотров становится возможно зарегистрировать колебания ВГД и снижение КГ, что при комплексной обследовании будет соответствовать ранним стадиям глаукомы. Вследствие дальнейшего ремоделирования соединительной ткани,

связанного непосредственно с глаукомой и прогрессирующим кератоконусом, уровень ВГД растет и такие пациенты, имея зачастую продвинутой стадии глаукомы, попадают в поле зрения офтальмологов. Приведенный клинический случай говорит о необходимости информирования врачей о возможном сочетании глаукомы с кератоконусом, который длительное время маскирует истинный уровень офтальмотонуса. Именно поэтому у всех пациентов с кератоконусом следует осматривать глазное дно с целью выявления начальных признаков глаукомы, а у молодых пациентов с подозрением на глаукому или с установленной глаукомой выполнять кератотопографию.

Заключение

Учитывая сложность своевременной диагностики и особенности клинического течения глаукомы у лиц молодого возраста, следует считать целесообразным выполнение комплексной диагностики

Литература

1. Национальное руководство по глаукоме для практикующих врачей. Под ред. Егорова Е.А., Еричева В.П. М: ГЭОТАР-Медиа; 2019.
2. Weinreb R.N., Aung T., Medeiros F.A. The pathophysiology and treatment of glaucoma: a review. *JAMA* 2014; 311(18):1901-1911. <https://doi.org/10.1001/jama.2014.3192>.
3. Molero-Senosiain M, Morales-Fernandez L, Saenz-Frances F, Perucho-Gonzalez L, Garcia-Bella J, Garcia Feijoo J, Martinez-de-la-Casa JM. Corneal Properties in Primary Open-angle Glaucoma Assessed Through Scheimpflug Corneal Topography and Densitometry. *J Glaucoma* 2021; 30(5):444-450. <https://doi.org/10.1097/IJG.0000000000001770>.
4. Woo S.L., Kobayashi A.S., Schlegel W.A., Lawrence C. Nonlinear material properties of intact cornea and sclera. *Exp Eye Res* 1972; 14(1) 29-39. [https://doi.org/10.1016/0014-4835\(72\)90139-x](https://doi.org/10.1016/0014-4835(72)90139-x).
5. Johnson C.S., Mian S.I., Moroi S., et al. Role of corneal elasticity in damping of intraocular pressure. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2007; 48(6):2540-2544. <https://doi.org/10.1167/iovs.06-0719>.
6. Cohen E.J. Keratoconus and normal-tension glaucoma: a study of the possible association with abnormal biomechanical properties as measured by corneal hysteresis (An AOS Thesis). *Trans Am Ophthalmol Soc* 2009; 107:282-299. <https://doi.org/10.1097/ICO.0b013e3181ca363c>.
7. Khalil A.K. The Changing Face of the Cornea in a Case of Juvenile Glaucoma and Subclinical Keratoconus. *Klin Monbl Augenheilkd* 2024; 241(11):1249-1255. <https://doi.org/10.1055/a-1819-1412>.
8. Goel S, Ganger A, Gupta V. Bilateral juvenile onset primary open-angle glaucoma among keratoconus patients. *J Glaucoma* 2015; 24(4):e25-27. <https://doi.org/10.1097/IJG.0000000000000024>.
9. Senthilkumar, Vijayalakshmi A.; Krishna, Shiva M.; Das, Manoranjan1; Sangoi, Komal Parin1. Bilateral Juvenile Open-Angle Glaucoma with Keratoconus: A Rare Association and Literature Review. *TNOA Journal of Ophthalmic Science and Research* 2019; 57(4):p 311-315. https://doi.org/10.4103/tjosr.tjosr_90_19
10. Peyman, A., Sepahvand, F., Pourazizi, M. et al. Corneal biomechanics in normal and subclinical keratoconus eyes. *BMC Ophthalmol* 2023; 23(1):459. <https://doi.org/10.1186/s12886-023-03215-6>

с исследованием биомеханических свойств роговицы у всех пациентов с подозрением на глаукому. При низких значениях КГ или колебаниях ВГД при измерении аппланационными методами тонометрии следует выполнять кератотопографию с целью выявления возможного эктатического поражения роговицы, в частности, кератоконуса. Исходя из полученных данных, собственная модификация нагрузочной пробы с регистрацией кератотопографии в момент индуцированного повышения ВГД может способствовать раннему выявлению глаукомы у лиц молодого возраста.

Участие авторов:

Концепция и дизайн исследования: Анисимова С.Ю., Анисимов С.И.

Сбор и обработка материала: Братчук А.А., Маммадова С.Ю.

Статистическая обработка: Арутюнян Л.Л., Братчук А.А.

Написание статьи: Анисимова С.Ю., Арутюнян Л.Л., Анисимов С.И., Братчук А.А., Маммадова С.Ю.

Редактирование: Анисимова С.Ю., Арутюнян Л.Л.

References

1. *Natsional'noe rukovodstvo po glaukome dlya praktikuyuschikh vrachei* [National Glaucoma Guidelines for Practitioners]. Eds. Egorov E.A., Eriчев V.P. Moscow, GEOTAR-Media Publ., 2019.
2. Weinreb R.N., Aung T., Medeiros F.A. The pathophysiology and treatment of glaucoma: a review. *JAMA* 2014; 311(18):1901-1911. <https://doi.org/10.1001/jama.2014.3192>.
3. Molero-Senosiain M, Morales-Fernandez L, Saenz-Frances F, Perucho-Gonzalez L, Garcia-Bella J, Garcia Feijoo J, Martinez-de-la-Casa JM. Corneal Properties in Primary Open-angle Glaucoma Assessed Through Scheimpflug Corneal Topography and Densitometry. *J Glaucoma* 2021; 30(5):444-450. <https://doi.org/10.1097/IJG.0000000000001770>.
4. Woo S.L., Kobayashi A.S., Schlegel W.A., Lawrence C. Nonlinear material properties of intact cornea and sclera. *Exp Eye Res* 1972; 14(1) 29-39. [https://doi.org/10.1016/0014-4835\(72\)90139-x](https://doi.org/10.1016/0014-4835(72)90139-x).
5. Johnson C.S., Mian S.I., Moroi S., et al. Role of corneal elasticity in damping of intraocular pressure. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2007; 48(6):2540-2544. <https://doi.org/10.1167/iovs.06-0719>.
6. Cohen E.J. Keratoconus and normal-tension glaucoma: a study of the possible association with abnormal biomechanical properties as measured by corneal hysteresis (An AOS Thesis). *Trans Am Ophthalmol Soc* 2009; 107:282-299. <https://doi.org/10.1097/ICO.0b013e3181ca363c>.
7. Khalil A.K. The Changing Face of the Cornea in a Case of Juvenile Glaucoma and Subclinical Keratoconus. *Klin Monbl Augenheilkd* 2024; 241(11):1249-1255. <https://doi.org/10.1055/a-1819-1412>.
8. Goel S, Ganger A, Gupta V. Bilateral juvenile onset primary open-angle glaucoma among keratoconus patients. *J Glaucoma* 2015; 24(4):e25-27. <https://doi.org/10.1097/IJG.0000000000000024>.
9. Senthilkumar, Vijayalakshmi A.; Krishna, Shiva M.; Das, Manoranjan1; Sangoi, Komal Parin1. Bilateral Juvenile Open-Angle Glaucoma with Keratoconus: A Rare Association and Literature Review. *TNOA Journal of Ophthalmic Science and Research* 2019; 57(4):p 311-315. https://doi.org/10.4103/tjosr.tjosr_90_19
10. Peyman, A., Sepahvand, F., Pourazizi, M. et al. Corneal biomechanics in normal and subclinical keratoconus eyes. *BMC Ophthalmol* 2023; 23(1):459. <https://doi.org/10.1186/s12886-023-03215-6>

11. Аверич В.В. Современные методы диагностики и мониторинга кератоконуса. *The EYE GLAZ* 2023; 25(4):322-330. <https://doi.org/10.33791/2222-4408-2023-4-322-330>.
12. Krachmer J.H., Feder R.S., Belin M.W. Keratoconus and related non-inflammatory corneal thinning disorders. *Surv Ophthalmol* 1984; 28(4):293-322.
13. Dupps WJ. Hysteresis: new mechanospeak for the ophthalmologist. *J Cataract Refract Surg* 2007; 31:156-162. <https://doi.org/10.1016/j.jcrs.2007.07.008>.
14. 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):130-132.
15. Иомдина Е.Н., Бауэр С.М., Котляр К.Е. Биомеханика глаза: теоретические аспекты и клинические приложения. М: Реальное время 2015; 208.
16. Lu Y, Vitart V, Burdon KP, Khor CC, Bykhovskaya Y, et al. Genome-wide association analyses identify multiple loci associated with central corneal thickness and keratoconus. *Nat Genet* 2013; 45(2):155-163. <https://doi.org/10.1038/ng.2506>.
17. Арутюнян Л.Л. Роль биомеханических свойств глаза в определении целевого давления. *Глаукома* 2007; 3:60-65.
18. Goel S, Ganger A, Gupta V. Bilateral juvenile onset primary open-angle glaucoma among keratoconus patients. *J Glaucoma* 2015; 24:e25-27. <https://doi.org/10.1097/IJG.0000000000000024>.
19. Utyama J, Martins LA, Barboza GN, Matheus RJ, Pereira CS. Juvenile primary open-angle glaucoma and keratoconus. *eOftalmo* 2019; 5:33-38.
20. Katiyar S, Tong J, Pensyl D, Sullivan-Mee M. Corneal Biomechanical Changes Caused by Acute Elevation of IOP in Eyes with and without Glaucoma. *Optom Vis Sci* 2021; 98(4):367-373. <https://doi.org/10.1097/OPX.0000000000001668>.
21. Мяконькая О.С., Саркисян А.С., Селезнев А.В. и др. Нагрузочные и разгрузочные пробы в современной глаукоматологии: их возможности и информативность. *РМЖ Клиническая офтальмология* 2021; 21(3):153-158. <https://doi.org/10.32364/2311-7729-2021-21-3-153-158>.
22. Волков В.В., Симасова И.Л., Тихоновская И.А. Оценка эффективности новой компрессионно-периметрической пробы в ранней диагностике глаукомы. *Офтальмология* 2020; 17(2):229-237. <https://doi.org/10.18008/1816-5095-2020-2-229-237>.
23. Волков В.В., Сухинина Л.Б., Тер-Андриасов Э.Л. Компрессионно-периметрическая проба в экспрессдиагностике глаукомы и пре-глаукомы. Глаукома: Сб. науч. тр. Алма-Ата 1980; Т. 5: 43-52.
24. Анисимов С.И., Анисимова С.Ю., Смотров Е.А., Завгородняя Т.С., Золоторевский К.А. Кератотензотопография – новые диагностические возможности изучения биомеханических свойств роговицы. *Офтальмология* 2011; 8(4):13-17.
25. Анисимов С.И., Анисимова С.Ю., Арутюнян Л.Л., Насташук А.Д., Братчук А.А. Изменение топографических показателей при вакуум-компрессионной пробе. *Современные технологии в офтальмологии* 2024; 1(4(56)):63. <https://doi.org/10.25276/2312-4911-2024-4-63>.
26. Анисимов С.И., Анисимова С.Ю., Арутюнян Л.Л., Чигованина Н.П., Любимова Т.С. Изменение биомеханических свойств глаза и параметров диска зрительного нерва в условиях дозированного подъема внутриглазного давления. Федоровские чтения: сб. тез. X Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, под ред. Б.Э. Малюгина. М: Офтальмология 2012; 87.
27. Анисимов С.И., Анисимова С.Ю., Л.Л. Арутюнян, Чигованина Н.П. Изменение биомеханических свойств глаза и морфометрических параметров диска зрительного нерва в условиях дозированной вакуум-компрессионной нагрузки. *Глаукома* 2013; 2:30-37.
11. Averich V.V. Modern methods of diagnosis and monitoring of keratoconus. *The EYE GLAZ* 2023; 25(4):322-330. <https://doi.org/10.33791/2222-4408-2023-4-322-330>.
12. Krachmer J.H., Feder R.S., Belin M.W. Keratoconus and related non-inflammatory corneal thinning disorders. *Surv Ophthalmol* 1984; 28(4):293-322.
13. Dupps WJ. Hysteresis: new mechanospeak for the ophthalmologist. *J Cataract Refract Surg* 2007; 31:156-162. <https://doi.org/10.1016/j.jcrs.2007.07.008>.
14. Alekseev V.N., Litvin I.B. Influence of corneal thickness on the level of intraocular pressure and prognosis in primary open-angle glaucoma. *RMJ Clinical Ophthalmology* 2008; 9(4):130-132.
15. The Iomdina EN, Bauer SM, Kotliar KE. Biomechanika glaza: teoreticheskie aspekty i klinicheskie prilozheniya [Biomechanics of the eye: theoretical aspects and clinical applications]. Moscow, Realnoe Vremya Publ., 2015. 208 p.
16. Lu Y, Vitart V, Burdon KP, Khor CC, Bykhovskaya Y, et al. Genome-wide association analyses identify multiple loci associated with central corneal thickness and keratoconus. *Nat Genet* 2013; 45(2):155-163. <https://doi.org/10.1038/ng.2506>.
17. Arutyunyan L. L. The role of biomechanical properties of the eye in determining target pressure. *Glaucoma* 2007; 3:60-65.
18. Goel S, Ganger A, Gupta V. Bilateral juvenile onset primary open-angle glaucoma among keratoconus patients. *J Glaucoma* 2015; 24:e25-27. <https://doi.org/10.1097/IJG.0000000000000024>.
19. Utyama J, Martins LA, Barboza GN, Matheus RJ, Pereira CS. Juvenile primary open-angle glaucoma and keratoconus. *eOftalmo* 2019; 5:33-38.
20. Katiyar S, Tong J, Pensyl D, Sullivan-Mee M. Corneal Biomechanical Changes Caused by Acute Elevation of IOP in Eyes with and without Glaucoma. *Optom Vis Sci* 2021; 98(4):367-373. <https://doi.org/10.1097/OPX.0000000000001668>.
21. Myakonkaya O.S., Sarkisyan AS, Seleznev AV. et al. State-of-the-art of loading and unloading tests for glaucoma: potentialities and informative value. *RMJ Clinical Ophthalmology* 2021; 21(3):153-158. <https://doi.org/1032364/2311-7729-2021-21-3-153-158>.
22. Volkov V.V., Simakova I.L., Tikhonovskaya I.A. Evaluation of the New Compression-Perimeter Test Effectiveness in the Early Diagnosis of Glaucoma. *Ophthalmology in Russia* 2020; 17(2):229-237. <https://doi.org/10.18008/1816-5095-2020-2-229-237>.
23. Volkov V.V., Sukhinina L.B., Ter-Andriasyan E.L. Compression-perimetric test in express diagnostics of glaucoma and preglaucoma. *Glaucoma: Collection of scientific papers. Alma-Ata, 1980. Vol. 5, pp. 43-52.*
24. Anisimov S.I., Anisimova S.Yu., Smotrich E.A., Zavgorodnyaya T.S., Zolotarevsky K.A. Keratotensotopography – new diagnostic possibilities for studying biomechanical properties of the cornea. *Ophthalmology in Russia* 2011; 8(4):13-17.
25. Anisimov S.I., Anisimova S.Yu., Arutyunyan L.L., Nastashchuk A.D., Bratshchuk A.A. Changes in topographic indicators during vacuum compression test. *Modern technologies in ophthalmology* 2024; 1(4(56)):63. <https://doi.org/10.25276/2312-4911-2024-4-63>.
26. Anisimov S.I., Anisimova S.Yu., Arutyunyan L.L., Chigovanina N.P., Lyubimova T.S. Changes in the biomechanical properties of the eye and parameters of the optic nerve head under conditions of a dosed increase in intraocular pressure. *Fyodorov readings: collection of abstracts of the 10th All-Russian scientific and practical conference with international participation, edited by B.E. Maluygin. Moscow, Oftalmologiya, 2012. P. 87.*
27. Anisimov S.I., Anisimova S.Yu., L.L. Arutyunyan, Chigovanina N.P. Changes in biomechanical properties of the eye and morphometric parameters of the optic nerve head under conditions of dosed vacuum-compression load. *Glaucoma* 2013; 2:30-37.