

УДК: 617.7-079+084

Касимов Э.М., Бабаева Б.Р., Биландарли Л.Ш.

ОФТАЛЬМОЛОГИЯ И ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ: РЕАЛИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ
(ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)

Национальный Центр Офтальмологии имени акад. Зарифы Алиевой, Баку, AZ 1114, улица Джавадхана, 32/15

РЕЗЮМЕ

Литературный обзор посвящен использованию искусственного интеллекта (ИИ) и его алгоритмов в современной медицине. Подробно освещено применение ИИ в медицинской информатике, статистике и библиографии. Рассмотрены преимущества использования глубокого обучения в мероприятиях раннего выявления офтальмопатологии, скринингах и телемедицине. Представлены различные примеры диагностики, лечения и систематизации глаукомы, диабетической ретинопатии, ретинопатии недоношенных, возрастной макулодистрофии, катаракты на основе ИИ, а также применения его в различных медицинских приборах и программном обеспечении.

Ключевые слова: Искусственный Интеллект, офтальмопатология, диагностика, профилактика

Qasimov E.M., Babayeva B.R., Biləndərli L.Ş.

OFTALMOLOGİYA VƏ SÜNİ İNTELLEKT: REALLIQ VƏ PERSPEKTİVLƏR
(ƏDƏBİYYAT İCMALI)

XÜLASƏ

Ədəbiyyat icmalı süni intellektin (Sİ) və onun alqoritmlərinin müasir tibbdə istifadəsinə həsr olunub. Tibbi informatika, statistika və bibliografiyada Sİ-in tətbiqi ətraflı şəkildə təsvir olunur. Oftalmopatologiyanın erkən aşkarlanmasında, skrininglərdə və teletibbdə tətbiqinin dərinədən öyrənilməsinin üstünlükləri nəzərdən keçirilir.

Qlaukoma, diabetik retinopatiya, vaxtından əvvəl doğulmuşların retinopatiyası, yaşa bağlı makulyar degenerasiya, kataraktanın Sİ-ə əsaslanan diaqnostikası, müalicəsi və sistemləşdirilməsinin, həmçinin müxtəlif tibbi cihazlarda və program təminatında tətbiqi ilə bağlı nümunələr təqdim olunur.

Açar sözlər: Süni İntellekt, oftalmopatologiya, diaqnostika, profilaktika

Kasimov E.M., Babayeva B.R., Biləndərli L.Sh.

OPHTHALMOLOGY AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE: REALITY AND PROSPECTS
(LITERATURE REVIEW)

SUMMARY

The literature review is dedicated to the use of artificial intelligence (AI) and its algorithms in modern medicine. The application of AI in medical informatics, statistics and bibliography is covered in detail. The advantages of using Deep Learning in early detection of ophthalmopathology, screenings

and telemedicine are considered. Various examples of diagnosis, treatment and systematization of glaucoma, diabetic retinopathy, retinopathy of prematurity, age-related macular degeneration, Cataract based on AI are presented, as well as its application in various medical devices and software.

Key words: Artificial Intelligence, deep learning, ophthalmopathology, diagnostics, prevention

Участие искусственного интеллекта (ИИ) в жизни современного общества уже не представляется такой же фантастической прерогативой, как было всего лишь несколько десятков лет назад. Пространство, отвоеванное Искусственным разумом у разума человеческого, становится все шире и, порой, достигает пугающих размеров. Возможности, которые предоставляет ИИ – необозримы. Все это вызывает неоднозначную реакцию в обществе и порождает массу протестов. В данной статье мы попытаемся проследить и проанализировать использование ИИ в современной медицине, и, что особенно важно для нас – в современной офтальмологии.

Понятие «Искусственный Интеллект» впервые появилось в информационном поле 9 августа 1956 года на семинаре в Дартмут колледже (Dartmouth College, Hanover, USA,) организованном американскими учеными Джоном Мак-Карти (John McCarthy), Марвином Мински (Marvin Minsky), Натаниэлем Рочестером (Nathaniel Rochester) и Клодом Шенноном (Claude Elwood Shannon) [1].

Первой интеллектуальной системой считается программа «Логик-Теоретик» (Logic Theorist), предназначенная для доказательства теорем и исчисления высказываний и созданная американскими учеными Аланом Ньювелом (Allen Newell), Гербертом Саймоном (Herbert A. Simon) и Клиффом Шая (Cliff Shaw) [2].

Выдающийся вклад в создание теории ИИ внес гениальный британский ученый Алан Тьюринг (Alan Turing), по праву считающийся отцом ИИ. Концепция использования компьютерных систем для имитации разумного поведения и критического мышления была описана Аланом Тьюрингом в 1950 г. в книге «Компьютеры и интеллект» [3]. В его честь названа самая престижная в мире награда в области информатики – премия Тьюринга (The ACM A.M.Turing Award), ежегодно вручаемая Ассоциацией Вычислительной Техники (Association for Computing Machinery) за выдающийся научно-технический вклад в области информатики и ИИ. Лауреатами премии Тьюринга, являющейся аналогом Нобелевской премии, в разные года были Тим Бернерс-Ли (Sir Timothy John Berners-Lee) за изобретение Всемирной паутины, первого веб-браузера и основополагающих протоколов и алгоритмов, повлиявших на распространение Интернета (2016), Йошуа Бенджио (Yoshua Bengio), Джеффри Хинтон (Geoffrey

Hinton) и Ян Лекун (Yann LeCun) за концептуальные и инженерные прорывы, сделавшие глубинные нейросети краеугольным компонентом в вычислительной технике (2018), Эд Катмулл (Ed Catmull) и Пэт Ханрахан (Patrick Hanrahan) за фундаментальный вклад в развитие 3D графики и революционное влияние на компьютерную графику в кинематографе и других приложениях (2019).

Основной задачей создания ИИ являлись повышение эффективности и производительности труда за счет автоматизации процессов и задач, ранее выполняемых людьми, а также для обработки и интерпретации больших объемов данных. Технологии, используемые ИИ многочисленны, однако их можно разделить на 3 основные группы, произрастающие одна из другой, и, так или иначе, конвергирующие в процессе «искусственного мышления». К ним относятся:

1. Машинное обучение (Machine Learning, ML)
2. Глубокое обучение (Deep Learning, DL)
3. Свёрточные нейронные сети (Convolutional Neural Networks, CNN) [4].

Машинное обучение (МО) – это систематизация определенных признаков для конфигурации шаблонов, которые можно использовать для анализа исследуемой ситуации. Это один из классов методов ИИ, используемых для анализа сложных данных и нахождения паттернов и взаимосвязей без их явного программирования. Термин и метод были впервые использованы Артуром Самуэлем (Arthur L. Samuel) в 1959 году в его труде, посвященном совершенствованию способности компьютера играть в шашки без перебора вариантов. Алгоритмы машинного обучения анализируют признаки данных на входе и через ряд повторяющихся операций, производят линейные и нелинейные предиктивные модели, определяющие сигналы, классифицирующие паттерны и прогнозирующие исходы. Машинное обучение работает на основе математики и статистики.

Глубокое обучение (ГО) – совокупность методов машинного обучения, основанных на обучении представлениям и имитирующим архитектуру биологических нейронных сетей. Многослойность, используемая в Artificial Neural Network (ANN) – искусственной нейронной сети (ИНС), дает возможности последующего обуче-

ния и принятия самостоятельных решений аналогично работе человеческого мозга. Глубокое обучение работает на основе сочетания математики и статистики с архитектурой нейронной сети и позволяет компьютерам решать более сложные задачи [5, 6].

Свёрточные нейронные сети (СНС) – часть технологий глубокого обучения и один из лучших алгоритмов для распознавания и классификации изображений. СНС – принципиально многослойные, нацеленные на эффективное распознавание образов и использующие функциональные особенности зрительной коры, были впервые предложены Яном Лекуном в 1988 году. Идея заключается в чередовании сверточных и субдискретизирующих слоев и использовании специфических фильтров. Нейросеть – это увеличение чувствительности и приближенности к человеческому мышлению, усовершенствованный многослойный вариант глубокого обучения, который имитирует взаимосвязанные нейроны человеческого мозга для анализа входного изображения и распознавания закономерностей. Le-NET, AlexNet, VGG, GoogLeNet и ResNet – некоторые из самых известных алгоритмов сверточной нейронной сети.

Внедрение технологий ИИ в медицине началось значительно позже, чем в других областях науки. Важной вехой на этом пути можно считать создание PubMed – бесплатной поисковой системы по биомедицинским исследованиям, созданной Национальным центром биотехнологической информации США (National Center for Biotechnology Information, NCBI) в 1996 г. [7]. PubMed объединил базы данных MEDLINE, PreMEDLINE, OldMEDLINE, National Library of Medicine и PubMed Central, а в последнее время предоставил доступ к новой базе данных “Images”. Портал оказал фундаментальное влияние на развитие медицины и естественных наук, предоставляя исследователем во всем мире свободный доступ к необходимой профессиональной информации, поддерживая тем самым принципы доказательной медицины и открытой науки [8].

Систематизация и управление столь внушительными объемами информации, безусловно, подразумевает использование ИИ. Роль PubMed в развитии современной медицины и биологии трудно переоценить: по состоянию на май 2023 года количество учетных записей в базе данных

составляло более 35 миллионов, при этом ежегодно оно увеличивается приблизительно на 1 млн. PubMed предоставляет бесплатный доступ к 4800 индексированным журналам по медицинским тематикам.

Best Match – не единственная функция PubMed, использующая алгоритмы ИИ, к ним относятся Single Citation Matcher и Batch Citation Matcher. Манипулирование запросами, устранение неоднозначности имени автора и автоматическое индексирование статей – являются дополнительными примерами того, как PubMed использует ИИ для улучшения результатов поиска.

Текущее реальное применение ИИ в практической медицине включает диагностику заболеваний, сортировку, стратификацию и прогнозирование риска, принятие клинических решений, персонализированное лечение, разработку и перепрофилирование целевых медикаментов, а также редактирование генов [9].

Офтальмология, будучи медицинской специальностью, диагностический сегмент которой в большой мере основан на изображениях и их интерпретациях, возможно, имеет самые широкие возможности для применения ИИ.

Так, одной из первых ласточек в данном направлении стала Программа консультаций по глаукоме на базе CASNET (Complex Adaptive Systems and NETWORKS – сложные адаптивные системы и сети), созданная в 1976 году и продемонстрировавшая возможность применения ИИ, связанного с машинным обучением, в клинической практике [10].

Алгоритмы глубокого обучения в офтальмологии разработаны с упором на обучение на основе заболевания, при котором врач присваивает конкретные известные характеристики заболевания на изображении, чтобы машина могла его распознать и изучить, а выходные данные можно проверить по идентификаторам заболевания, распознаваемым экспертом-наблюдателем [11].

Наиболее многообещающие инструменты ИИ в настоящее время используются в ретинологии, в частности для лечения диабетической ретинопатии (ДР), возрастной макулодистрофии (ВМД), ретинопатии недоношенных (РН) [12]. Существуют модели ИИ, применимые к глаукоме, катаракте, кератоконусу и другим заболеваниям

переднего сегмента, а также к окулопластической хирургии. Есть публикации о применении ИИ в ультразвуковом исследовании.

Применение ИИ высокоэффективно при анализе результатов обследования больших групп населения. Данные обрабатываются с максимальной точностью и минимальными трудозатратами. Столь современный подход к обработке данных делает их максимально достоверными и информативными.

Одним из самых перспективных направлений в применении ИИ в современной офтальмологии являются исследования различных патологий сетчатки.

За последние два десятилетия распространенность сахарного диабета в мире выросла в 3 раза. Раннее выявление и своевременное лечение ДР может снизить слепоту по этой причине на 95% [13].

Всемирная Организация Здравоохранения (ВОЗ) предлагает программы скрининга ДР, позволяющие изучать и анализировать клинко-эпидемиологические данные [14]. Однако, проведение таких крупномасштабных скрининговых программ подразумевает привлечение больших интеллектуальных, материальных и финансовых ресурсов, что трудно реализовать во многих странах с низким и средним уровнем дохода [15]. По этой причине, изучение подхода, позволяющего снизить затраты и значительно повысить эффективность и достоверность таких программ, должно стать первоочередной задачей [16-20].

Использование глубокого обучения в ходе многочисленных исследований позволило разработать интеллектуальные системы, обнаруживающие доклинические и начальные клинические стадии ДР по изображениям глазного дна [21]. Gulshan и соавторы разработали систему глубокого обучения, используя 128 175 изображений глазного дна и оценили систему в двух внешних наборах данных с 11 711 изображениями глазного дна. Их система достигла больше AUC (Area Under Curve/c-statistics) 0,99 при скрининге ДР [22].

Ting D.S.W. и соавторы сообщили о системе глубокого обучения с AUC 0,936, чувствительностью 90,5% и специфичностью 91,6% при выявлении референтной ДР, а также AUC 0,958,

чувствительностью 100% и специфичностью 91,1% – при распознавании угрожающей зрению ДР [23].

Tang F. и соавторы создали систему глубокого обучения для обнаружения референтной и угрожающей зрению ДР на изображениях глазного дна со сверхширокоугольным полем зрения. AUC этой системы 0,9 [24].

Крайне важным представляется выявление ДР на ранней стадии с целью задержать ее прогрессирование. Dai L. и соавторы сообщают о системе GO DeepDR, разработанной на основе 466 247 изображений глазного дна. Она обладает высокой производительностью при обнаружении ранних и поздних стадий ДР [25].

Так, IDx-DR (Digital Diagnostics, Corville, IA, USA) был первым одобренным FDA (Управление по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов США) автономным устройством ИИ в медицине, предназначенным для обнаружения ДР и диабетического макулярного отека [26].

Появившийся впоследствии EyeArt (Eyenuk, Woodland Hills, Ca, USA) – это одобренный FDA автономный ИИ для обнаружения легкой формы ДР [27, 28].

Поскольку ВМД в последнее время становится одной из серьезнейших проблем современного здравоохранения в силу высокой инвалидизации больных, применение ИИ для профилактики ВМД представляет особенный интерес. По прогнозам, число пациентов с ВМД в 2040 году достигнет 288 миллионов [29, 30]. Следовательно, скрининги населения, направленные на выявление пациентов с ВМД и своевременное обеспечение соответствующих медицинских мероприятий, могут значительно уменьшить потерю зрения у пациентов.

Широкомасштабная доступность изображений оптической когерентной томографии (ОКТ), относительная согласованность сканирований ОКТ и сложные структурные детали визуализации делают их идеальным материалом для изучения путем глубокого обучения при заболеваниях макулы [31]. Начиная с автоматической классификации ВМД с использованием двухмерных изображений ОКТ, переходя к сегментации анатомических границ сетчатки и, наконец, объединяя возможности сегментации и классификации для выявления стандартных поражений сетчат-

ки. Глубокое обучение уже активно используется для сортировки пациентов с патологией макулы (хориоидальная неоваскуляризация, макулярный отек, друзы, географическая атрофия, эпиретинальная мембрана, витреомакулярная тракция, макулярная дыра, центральная серозная хориоретинопатия) [32, 33].

Peng Y. и соавторы сконструировали и протестировали систему на основе глубокого обучения DeepSeeNet, использующую 59 302 изображения глазного дна. Система показала хорошие результаты при обнаружении крупных друз, пигментации и поздней стадии ВМД [34].

Искусственный интеллект также потенциально способен прогнозировать прогрессирование ВМД, помогая пациентам с высоким риском как можно раньше начать профилактическую помощь, а также установить интервал наблюдения за пациентом уже при предварительном осмотре.

У пациентов с диагнозом «влажная ВМД» одного глаза Yim J. и соавторы внедрили систему ИИ для прогнозирования конверсии во влажную ВМД на втором глазу [35].

Поскольку на развитие ВМД могут влиять как генетические факторы, так и факторы окружающей среды, Yan Q. и соавторы разработали подход ИИ с модифицированной глубокой СНС, используя 52 генетических варианта, связанных с ВМД и 31 262 изображения глазного дна. Их результаты показали, что подход, основанный как на изображениях глазного дна, так и на генотипах, может предсказать позднее прогрессирование ВМД с AUC 0,85, тогда как подход, основанный только на изображениях глазного дна, достиг AUC 0,81 [36].

Imaging and Informatics in Retinopathy of Premature (i-ROP) может присвоить объективную шкалу тяжести для мониторинга ретинопатии недоношенных, прогресса и регресса заболевания и реакции на лечение с течением времени. По сравнению с экспертами алгоритм глубокого обучения демонстрирует чувствительность в 100% и специфичность 94%. [37, 38, 39].

Одним из самых тяжелых заболеваний глаза – глаукомой – страдают более 70 миллионов человек в мире, и эта цифра имеет тенденцию к экспонентному росту. Высокий процент инвалидизации и слепоты при глаукоме объясняется малой симптоматикой и поздним выявлением. Искусственный интеллект может проложить путь

к ранней диагностике заболевания путем экономически эффективных программ скрининга глаукомы в автоматическом режиме. Ran A.R. и соавторы обучили и протестировали трехмерную систему ГО, используя изображения двухмерных поперечных сканирований ОКТ. Эта система имела производительность, сравнимую с производительностью двух специалистов по глаукоме с опытом работы более 10 лет [40]. Fu H. с соавторами разработали систему ГО, используя 4135 ОКТ-изображений переднего сегмента для автоматического обнаружения закрытия угла. AUC системы составляет 0,96, чувствительность – 0,90, специфичность – 0,92 [41]. Эти результаты показывают, что ГО может анализировать более широкий диапазон деталей ОКТ-изображений переднего сегмента, чем качественные характеристики, определяемые врачами.

Искусственный интеллект также можно использовать для прогнозирования прогрессирования глаукомы. Yousefi S. и соавторы сообщили о методе машинного обучения для выявления прогрессирования глаукомы на основе полей зрения. Было обнаружено, что анализ МО выявил прогрессирование заболевания раньше (3,5 года), чем другие методы [42].

Алгоритмы глубокого обучения способны идентифицировать изменения диска зрительного нерва при глаукоме и распознавать повреждение слоя нервных волокон, а также выявлять ранние изменения в поле зрения [43, 44]. Все это позволяет обнаруживать прогрессирование заболевания раньше в сравнении с традиционными стратегиями. В современных версиях таких приборов, как периметры и анализаторы поля зрения, Гейдельбергская ретинотомиография (HRT), ОКТ, эндотелиальная биомикроскопия, используются различные техники ИИ [45, 46, 47].

Доступен также инструмент, который использует данные внутриглазного давления (ВГД) и периметрии для прогнозирования траекторий клинических сценариев при различных уровнях целевого ВГД. Будущие возможности включают идентификацию диска зрительного нерва (ДЗН) и распознавание его последовательных структурных изменений с течением времени [48, 49].

Goh с соавторами изучили применение ИИ для скрининга катаракты с использованием офтальмологических изображений (фундус-фотографии или изображения с щелевой лампы) и автоматизации подбора наиболее подходящей ИОЛ [50].

Keenan T.D.L. и соавторы создали DeepLensNet для обнаружения и количественной оценки ядерного склероза по изображениям щелевой лампы под углом 45°, а также помутнения кортикального слоя и задней субкапсулярной катаракты по изображениям ретроиллюминации. Оценка нуклеарного склероза рассматривалась по шкале 0,9-7,1. Оценка помутнений кортикального слоя и задней субкапсулярной катаракты в % [51]. Результаты показывают, что эта система может выполнять автоматизированную и количественную классификацию тяжести катаракты с высокой точностью, что потенциально может повысить доступность оценки катаракты во всем мире. Tham Y.C. и соавторы создали систему для автоматического обнаружения визуально значимой катаракты [52]. Одним из преимуществ этой системы является то, что она может проверять катаракту с помощью одного метода визуализации, в отличие от традиционного метода, который требует наличия изображений с помощью щелевой лампы и ретроиллюминации наряду с измерением наилучшей скорректированной остроты зрения. Другим достоинством является то, что эту систему можно легко интегрировать в существующие системы ИИ на основе изображений глазного дна, что позволяет одновременно проводить скрининг других заболеваний заднего сегмента.

Помимо скрининга катаракты, ИИ может также предлагать в режиме реального времени рекомендации по факоэмульсификации катаракты. Nespolo R.G. и соавторы изобрели платформу, позволяющую получать кадры из видео-источника, определять местоположение зрачка, определять выполняемую фазу операции и предоставлять хирургу визуальную обратную связь в режиме реального времени. Результаты показали, что платформа достигла AUC 0,996, 0,972, 0,997 и 0,880 для капсулорексиса, факоэмульсификации, удаления коры и распознавания фазы покоя соответственно, со средней скоростью обработки 97 кадров/сек. [53].

Данные Scheimpflug-камеры используются для обнаружения кератоконуса или выявления его доклинической стадии, а также для оценки

и прогнозирования результатов рефракционной хирургии [54, 55] Алгоритмы ИИ используются в корнеальных топографах и томографах, а также в ОКТ переднего отрезка (Anterior segment OCT). Такие технологии как Kerato-Detect и Ectasia Status Index (ESI) были разработаны для выявления раннего кератоконуса и скрининга пациентов до рефракционных операций [56-64].

Использование технологий ИИ в офтальмологии является областью активных исследований и внедрений. Многие известные ученые и исследователи работают над разработкой и применением различных ИИ-технологий для диагностики, лечения и анализа данных в офтальмологии. В этой связи хотелось бы привести в пример нескольких ученых-энтузиастов, которые активно работают в этом направлении:

- Даниэл Рубин (Daniel Rubin) – профессор биомедицинской информатики в Университете Стэнфорда. Специализируется на применении машинного обучения и ИИ для анализа медицинских изображений, включая снимки глаза.
- Майкл Абрамофф (Michael Abramoff) профессор офтальмологии в Университете Айовы. Известен своими исследованиями и разработкой системы ИИ для автоматической диагностики и мониторинга заболеваний глаз, таких как диабетическая ретинопатия.
- Кейт Саудерс (Kate Saunders) – старший научный сотрудник в компании Google Research. Занимается разработкой ИИ для обработки и анализа офтальмологических данных с целью улучшения диагностики и лечения глазных заболеваний.
- Дьюань Фу (Duanhuan Fu) – профессор биомедицинской инженерии в Университете Хьюстона. Занимается исследованием и разработкой новых методов ИИ для диагностики глазных заболеваний и определения генетических мутаций при офтальмопатологии.

Это лишь несколько примеров ученых, которые активно внедряют ИИ в области офтальмологии. Существует множество других исследователей, работающих в этой области, их коллективные

усилия помогают создавать новые технологии и подходы, способствующие охране зрения и улучшению здоровья населения.

В этих целях ИИ активно внедряется в практическую деятельность многих офтальмологических клиник по всему миру. Ниже приведены некоторые из них:

1. Moorfields Eye Hospital (Великобритания) является одной из ведущих офтальмологических клиник в мире и активно использует ИИ в своей работе. Они разрабатывают и применяют алгоритмы ИИ для диагностики и лечения различных глазных заболеваний.
2. Vascom Palmer Eye Institute (США) расположен в Майами (Флорида), также активно применяет ИИ в своей клинической практике. Они используют ИИ для анализа медицинских изображений глаза и помощи в диагностике и лечении различных заболеваний.
3. Singapore National Eye Centre (Сингапур) является одним из ведущих офтальмологических центров в Азии и применяет

ИИ в своей клинической практике. Они используют ИИ для диагностики и лечения глазных заболеваний, а также для управления базами данных пациентов.

4. LV Prasad Eye Institute (Индия) в Хайдарабаде также активно использует ИИ в своей работе. Они разрабатывают алгоритмы ИИ для диагностики и лечения различных глазных заболеваний, особенно в области ретинологии и глаукомы.

Обобщая все вышесказанное, становится ясным, что использование ИИ в офтальмологии позволит улучшить качество диагностики и лечения, провести базовый скрининг большого количества пациентов с эффективным использованием ресурсов и обеспечить медицинскую помощь новой, рецессивной группе пациентов, а также вовремя проводить обследования и профилактику в группах риска.

Таким образом, современная медицинская практика – это сочетание традиционной доказательной и высокотехнологичной персонализированной офтальмологии, где ИИ обеспечивает максимальную эффективность и точность.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Andersen, S.L. John McCarthy: father of AI // *Intelligent Systems, IEEE*, – 2002. 17(5), – p.84-85. DOI:10.1109/MIS.2002.1039837
2. Gugerty, L. Newell and Simon's Logic Theorist Historical Background and Impact on Cognitive Modeling // *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, – 2006. 50(9), – p.880-884. DOI:10.1177/154193120605000904/ISSN 2169-5067
3. Turing, A.M. Computing machinery and intelligence // *Mind*, – 1950. 236, – p.433-460.
4. Santosh, G.H. Artificial intelligence in ophthalmology – Machines think! // *Indian J Ophthalmol*, – 2022. 70(4), – p.1075-1079.
5. Esteva, A. A guide to deep learning in healthcare / A.Esteva, A.Robicquet, B.Ramsundar [et al.] // *Nat. Med.*, – 2019. 25, – p.24-29.
6. LeCun, Y. Deep learning / Y.LeCun, Y.Bengio, G.Hinton // *Nature*, – 2015. 521, – p.436-444.
7. Benson, D. Vice President Launches PubMed, Lauds Free MEDLINE Access / D.Benson, B.Rapp // *NCBI News*, – 1997. – p.1-8.
8. Canese, K. PubMed: the bibliographic database / K.Canese, S.Weis // *The NCBI handbook*, – 2013. – p.1.
9. Basu, K. Artificial intelligence: How is it changing medical sciences and its future? / K.Basu, R.Sinha, A.Ong [et al.] // *Indian J Dermatol*, – 2020. 65, – p.365-370.
10. Weiss, S. Glaucoma consultation by computer / S.Weiss, C.A.Kulikowski, A.Safir // *Comput Biol Med.*, – 1978. 8, – p.25-40.

11. Li, Z. Artificial intelligence in ophthalmology: The path to the real-world clinic / Z.Li, L.Wang, X.Wu [et al.] // – 2023.
12. Ting, D.S.W. Artificial intelligence and deep learning in ophthalmology / D.S.W.Ting, L.R.Pasquale L.Peng [et al.] // *Br. J. Ophthalmol.*, – 2019. 103, – p.167-175.
13. Burton, M.J. The lancet global health commission on global eye health: vision beyond 2020 / M.J.Burton, J.Ramke, A.P.Marques [et al.] // *Lancet Global Health*, – 2021. 9, –p.489-551.
14. WHO / Diabetic Retinopathy Screening: A Short Guide: Increase Effectiveness, Maximize Benefits and Minimize Harm, – 2020. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/336660>
15. Shah, P. Acceptability of artificial intelligence-based retina screening in general population / P.Shah, D.Mishra, M.Shanmugam [et al.] // *Indian J. Ophthalmol.*, – 2022. 70, – p.1140-1144.
16. Abramoff, M.D. Improved automated detection of diabetic retinopathy on a publicly available dataset through integration of deep learning / M.D.Abramoff, Y.Lou, A.Erginay [et al.] // *Invest Ophthalmol Vis Sci.*, – 2016. 57, – 5200-5206.
17. Gargeya, R. Automated identification of diabetic retinopathy using deep learning / R.Gargeya, T.Leng // *Ophthalmology*, – 2017. 124, – p.962-969.
18. Liu, R. DeepDRiD: diabetic Retinopathy-Grading and image quality estimation challenge / R.Liu, X.Wang, Q.Wu [et al.] // *Patterns (NY)*, – 2022. 3, – p.100512.
19. Abramoff, M.D. Pivotal trial of an autonomous AI-based diagnostic system for detection of diabetic retinopathy in primary care offices / M.D.Abramoff, P.T.Lavin, M.Birch [et al.] // *NPJ Digit Med.*, – 2018. 28, – p.1-39.
20. Vujosevic, S. Screening for diabetic retinopathy: new perspectives and challenges / S.Vujosevic, S.J.Aldington, P.Silva [et al.] // *Lancet Diabetes Endocrinol.*, – 2020, 8, –p.337-347.
21. Krause, J. Grader variability and the importance of reference standards for evaluating machine learning models for diabetic retinopathy / J.Krause, V.Gulshan, E.Rahimy [et al.] // *Ophthalmology*, – 2018. 125, – p.1264-1272.
22. Gulshan, V. Development and validation of a deep learning algorithm for detection of diabetic retinopathy in retinal fundus photographs / V.Gulshan, L.Peng, M.Coram [et al.] // *JAMA*, – 2016. 316, – p.2402-2410.
23. Ting, D.S.W. Development and validation of a deep learning system for diabetic retinopathy and related eye diseases using retinal images from multiethnic populations with diabetes / D.S.W.Ting, C.Y.Cheung, G.Lim [et al.] // *JAMA*, – 2017. 318, – p.2211-2223.
24. Tang, F. Detection of diabetic retinopathy from Ultra-Widefield scanning laser ophthalmoscope images: a multicenter deep learning analysis / F.Tang, P.Luenam, A.R.Ran [et al.] // *Ophthalmol., Retina*, – 2021. 5, – p.1097-1106.
25. Dai, L. A deep learning system for detecting diabetic retinopathy across the disease spectrum / L.Dai, L.Wu, H.Li [et al.] // *Nat. Commun.*, – 2021. 12, – p.3242.
26. Margot S. IDx-DR for Diabetic Retinopathy Screening // *Am.Fam.Physician*, – 2020. 101(5), – p.307-308.
27. Lim, J.I. Artificial Intelligence Detection of Diabetic Retinopathy: Subgroup Comparison of the Eye Art System with Ophthalmologist’s Dilated Examinations / J.I.Lim, C.D.Regillo, S.R.Sadda, [et al.] // *Ophthalmol Sci.*, – 2022. 3(1), – p.100228. DOI: 10.1016/j.xops.2022.100228.

28. Vought, R. Eye Art artificial intelligence analysis of diabetic retinopathy in retinal screening events / R.Vought, V.Vought, M.Shah [et al.] // *Int Ophthalmol.*, – 2023. DOI: 10.1007/s10792-023-02887-9.
29. Wong, W.L. Global prevalence of age-related macular degeneration and disease burden projection for 2020 and 2040: a systematic review and meta-analysis / W.L.Wong, X.Su, X.Li [et al.] // *Lancet Global Health*, – 2014. 2, – p.106-116.
30. Mitchell, P. Age-related macular degeneration / P.Mitchell, G.Liew, B.Gopinath [et al.] // *Lancet*, – 2018. 392, – p.1147-1159.
31. Li, Z. Automated detection of retinal exudates and drusen in ultra-widefield fundus images based on deep learning / Z.Li, C.Guo, D.Nie [et al.] // *Eye*, – 2022. 36, – p.1681-1686.
32. Burlina, P.M. Automated grading of age-related macular degeneration from color fundus images using deep convolutional neural networks / P.M.Burlina, N.Joshi, M.Pekala [et al.] // *JAMA Ophthalmol.*, – 2017. 135, – 1170-1176.
33. Grassmann, F. A deep learning algorithm for prediction of age-related eye disease study severity scale for age-related macular degeneration from color fundus photography / F.Grassmann, J.Mengelkamp, C.Brandl [et al.] // *Ophthalmology*, – 2018. 125, – p.1410-1420.
34. Peng, Y. Deep See Net: a deep learning model for automated classification of patient-based age-related macular degeneration severity from color fundus photographs / Y.Peng, S.Dharssi, Q.Chen [et al.] // *Ophthalmology*, – 2019. 126, – p.565-575.
35. Yim, J. Predicting conversion to wet age-related macular degeneration using deep learning / J.Yim, R.Chopra, T.Spitz [et al.] // *Nat. Med.*, – 2020. 26, – p.892-899.
36. Yan, Q. Deep-learning-based prediction of late Age-Related macular degeneration progression / Q.Yan, D.E.Weeks, H.Xin [et al.] // *Nat. Mach. Intell.*, – 2020. 2, – p.141-150.
37. Brown, J.M. Automated diagnosis of plus disease in retinopathy of prematurity using deep convolutional neural networks / J.M.Brown, J.P.Campbell, A.Beers [et al.] *JAMA Ophthalmol.*, – 2018. 136, – 803-810.
38. Brown, J.M. Fully automated disease severity assessment and treatment monitoring in retinopathy of prematurity using deep learning / J.M.Brown, J.P.Campbell, A.Beers // *Proceedings Volume 10579, Medical Imaging 2018: Imaging Informatics for Healthcare, Research, and Applications.* – 2018.
39. Chen, J.S. Deep learning for the diagnosis of stage in retinopathy of prematurity: Accuracy and generalizability across populations and cameras / J.S.Chen, A.S.Coyner, S.Ostmo [et al.] // *Ophthalmol. Retina*, – 2021. 5, – 1027-1035.
40. Ran, A.R. Detection of glaucomatous optic neuropathy with spectral-domain optical coherence tomography: a retrospective training and validation deep-learning analysis / A.R.Ran, C.Y.Cheung, X.Wang [et al.] // *Lancet Digital Health*, – 2019. 1, – p.172-178.
41. Fu, H. A deep learning system for automated Angle-Closure detection in anterior segment optical coherence tomography images / H.Fu, M.Baskaran, Y.Xu [et al.] // *Am. J. Ophthalmol.*, – 2019. 203, – p.37-45.
42. Yousefi, S. Detection of longitudinal visual field progression in glaucoma using machine learning / S.Yousefi, T.Kiwaki, Y.Zheng [et al.] // *Am. J. Ophthalmol.*, – 2018. 193, – p.71-79.
43. Ramesh, P.V. Utilizing human intelligence in artificial intelligence for detecting glaucomatous fundus images using human-in-the-loop machine learning / P.V.Ramesh, T.Subramaniam, P.Ray [et al.] // *Indian J Ophthalmol.*, – 2022. 70, – p.1131-1138.

44. Li, Z. Deep learning for automated glaucomatous optic neuropathy detection from ultra-widefield fundus images / Z.Li, C.Guo, D.Lin [et al.] // *Br. J. Ophthalmol.*, – 2021. 105, – p.1548-1554.
45. Hood, D.C. Detecting glaucoma with only OCT: implications for the clinic, research, screening, and AI development / D.C.Hood, S.La.Bruna, E.Tsamis [et al.] // *Prog. Retin. Eye Res.*, – 2022. 90, – p.101052.
46. Wang, M. Reversal of glaucoma hemifield test results and visual field features in glaucoma / M.Wang, L.R.Pasquale, L.Q.Shen [et al.] // *Ophthalmology*, – 2018. 125, – p.352-360.
47. Yu, M. Risk of visual field progression in glaucoma patients with progressive retinal nerve fiber layer thinning: a 5-Year prospective study / M.Yu, C.Lin, R.N.Weinreb [et al.] // *Ophthalmology*, – 2016. 123, – p.1201-1210.
48. Christopher, M. Retinal nerve fiber layer features identified by unsupervised machine learning on optical coherence tomography scans predict glaucoma progression / M.Christopher, A.Belghith, R.N.Weinreb [et al.] // *Invest Ophthalmol. Vis. Sci.*, – 2018. 59, – p.2748-2756.
49. Kazemian, P. Personalized prediction of glaucoma progression under different target intraocular pressure levels using filtered forecasting methods / P.Kazemian, M.S.Lavieri, M.P.Van Oyen [et al.] // *Ophthalmology*, – 2018. 125, – p.569-577.
50. Goh, J.H.L. Artificial intelligence for cataract detection and management / J.H.L.Goh, Z.W.Lim, X.Fang [et al.] // *Asia Pac J Ophthalmol.*, – Phila: – 2020. 9, – p.88-95.
51. Keenan, T.D.L. Deep Lens Net: deep learning automated diagnosis and quantitative classification of cataract type and severity / T.D.L.Keenan, Q.Chen, E.Agrón [et al.] // *Ophthalmology*, – 2022. 129, – p.571-584.
52. Tham, Y.C. Detecting visually significant cataract using retinal photograph-based deep learning / Y.C.Tham, J.H.L.Goh, A.Anees [et al.] // *Nat. Aging*, – 2022. 2, – p.264-271.
53. Nespolo, R.G. Evaluation of artificial Intelligence-Based intraoperative guidance tools for phacoemulsification cataract surgery / R.G.Nespolo, D.Yi, E.Cole [et al.] // *JAMA Ophthalmol.*, – 2022. 140, – p.170-177.
54. Wu, X. Application of artificial intelligence in anterior segment ophthalmic diseases: Diversity and standardization / X.Wu, L.Liu, L.Zhao [et al.] // *Ann. Transl. Med.*, – 2020. 8, – p.714.
55. Kovács, I. Accuracy of machine learning classifiers using bilateral data from a Scheimpflug camera for identifying eyes with preclinical signs of keratoconus / I.Kovács, K.Miháltz, K.Kránitz [et al.] // *J. Cataract Refract Surg.*, – 2016. 42, – p.275-283.
56. Hidalgo, I.R. Evaluation of a machine-learning classifier for keratoconus detection based on Scheimpflug tomography / I.R.Hidalgo, P.Rodríguez, J.J.Rozema [et al.] // *Cornea*, – 2016. 35, – p.827-832.
57. Koprowski, R. Corneal power evaluation after myopic corneal refractive surgery using artificial neural networks / R.Koprowski, M.Lanza, C.Irregolare // *Biomed. Eng. Online*, – 2016. 15, – p.1-2.
58. Ting, D.S.J. Artificial intelligence for anterior segment diseases: emerging applications in ophthalmology / D.S.J.Ting, V.H.Foo, L.W.Y.Yang [et al.] // *Br. J. Ophthalmol.*, – 2021. 105, – p.158-168.
59. Almeida, J.G. Novel artificial intelligence index based on Scheimpflug corneal tomography to distinguish subclinical keratoconus from healthy corneas / J.G.Almeida, R.C.Guido, S.H.Balarin [et al.] // *J. Cataract Refract. Surg.*, – 2022.

60. Castro-Luna, G. Diagnosis of subclinical keratoconus based on machine learning techniques / G.Castro-Luna, D.Jiménez-Rodríguez, A.B.Castaño-Fernández [et al.] // J. Clin. Med., – 2021. 10, – p.4281.
61. Kermany, D.S. Identifying medical diagnoses and treatable diseases by Image-Based deep learning / D.S.Kermany, M.Goldbaum, W.Cai [et al.] // Cell, – 2018. 172, – p.1122-1131.
62. Al Timemy, A.H. A hybrid deep learning construct for detecting keratoconus from corneal maps / A.H.Al Timemy, Z.M.Mosa, Z. Alyasseri [et al.] // Transl. Vis. Sci. Technol., – 2021. 10, – p.16.
63. Ferdi, A.C. Keratoconus natural progression: a systematic review and meta-analysis of 11 529 eyes / A.C.Ferdi, V.Nguyen, D.M.Gore [et al.] // Ophthalmology, – 2019. 126, – p.935-945.
64. Jiménez-García, M. The REDCAKE Study Group Forecasting progressive trends in keratoconus by means of a time delay neural network / M.Jiménez-García, I.Issarti, E.O.Kreps [et al.] // J. Clin. Med., – 2021. 10, – p.3238.

Участие авторов:

Концепция и дизайн исследования: Касимов Э.М., Бабаева Б.Р.

Сбор и обработка материала: Биландарли Л.Ш., Бабаева Б.Р.

Статистическая обработка: Биландарли Л.Ш., Бабаева Б.Р.

Написание текста: Биландарли Л.Ш., Бабаева Б.Р.

Редактирование: Бабаева Б.Р.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**Для корреспонденции:**

Бабаева Бегим Рауфбек кызы, доктор философии по медицине, старший научный сотрудник отдела глаукомы Национального Центра Офтальмологии имени акад. Зарифы Алиевой

E-mail: beyimbabayeva@gmail.com