

УДК: 617.7-007.681:004.8

ГЛАУКОМАНИ ЭРТА ТАШХИСЛАШ ВА КАСАЛЛИК ПРОГРЕССИЯСИНИ БАҲОЛАШДА СУНЪИЙ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИНИНГ ЗАМОНАВИЙ ИМКОНияТЛАРИ

*Камилов Халиджан Махамаджанович**Ўзбекистон Республикаси Соғлиқни сақлаш вазирлиги
Тиббиёт ходимларининг касбий малакасини ривожлантириш маркази**Худойбергенов Азизбек Рўзбаевич**Ўзбекистон Республикаси Соғлиқни сақлаш вазирлиги
Тиббиёт ходимларининг касбий малакасини ривожлантириш маркази*

АННОТАЦИЯ

Глаукома қайтарилмас кўрликнинг асосий сабабларидан бири бўлиб, касалликни эрта аниқлаш ва прогрессия тезлигини баҳолаш беморда кўриш функцияларини сақлаб қолишнинг муҳим шарти ҳисобланади. Сўнгги йилларда сунъий интеллект технологияларининг ривожланиши кўз туби тасвирлари, оптик когерент томография (ОСТ), ангиография билан оптик когерент томография (ОСТА) ва компьютер периметрия маълумотларини автоматик таҳлил қилиш имкониятларини сезиларли даражада кенгайтди. Мақолада чоп этилган илмий тадқиқотлар асосида глаукомани скрининг қилиш, эрта ташхислаш, структур ва функционал прогрессияни аниқлаш ҳамда келажакдаги касаллик ривожланишини прогнозлашда сунъий интеллект технологияларининг имкониятлари таҳлил қилинган. Замонавий алгоритмлар айрим тадқиқотларда глаукомани аниқлашда AUC 0,94–0,99 гача, касаллик прогрессиясини прогнозлашда эса AUC 0,81–0,92 атрофида натижалар кўрсатаётгани аниқланган. Шу билан бирга, алгоритмларнинг бошқа популяцияларда ишончлилиги, маълумотлар базасининг репрезентативлиги ва клиник валидация масалалари ҳали ҳам долзарб бўлиб қолмоқда.

Калит сўзлар: глаукома, сунъий интеллект, оптик когерент томография, ОСТ, ОСТА, RNFL, кўрув майдони, скрининг, прогрессия.

СОВРЕМЕННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В РАННЕЙ ДИАГНОСТИКЕ ГЛАУКОМЫ И ОЦЕНКЕ ПРОГРЕССИРОВАНИЯ ЗАБОЛЕВАНИЯ

*Камилов Халиджан Махамаджанович**Центр развития профессиональной квалификации медицинских
работников Министерства Здравоохранения Республики Узбекистан*

Худойбергганов Азизбек Рузбаевич

Центр развития профессиональной квалификации медицинских работников Министерства Здравоохранения Республики Узбекистан

АННОТАЦИЯ

Глаукома является одной из ведущих причин необратимой слепоты, а раннее выявление заболевания и оценка скорости его прогрессирования представляют собой важнейшие условия сохранения зрительных функций у пациентов. В последние годы развитие технологий искусственного интеллекта значительно расширило возможности автоматизированного анализа изображений глазного дна, данных оптической когерентной томографии (ОСТ), оптической когерентной томографии с ангиографии (ОСТА) и компьютерной периметрии. В статье на основании анализа опубликованных научных исследований рассмотрены возможности применения технологий искусственного интеллекта для скрининга и ранней диагностики глаукомы, выявления структурного и функционального прогрессирования заболевания, а также прогнозирования его дальнейшего течения. Установлено, что в отдельных исследованиях современные алгоритмы искусственного интеллекта демонстрируют значения площади под ROC-кривой (AUC) в диапазоне 0,94–0,99 при выявлении глаукомы и 0,81–0,92 при прогнозировании ее прогрессирования. Вместе с тем сохраняют актуальность вопросы воспроизводимости и надежности алгоритмов в различных популяциях, репрезентативности используемых баз данных, а также необходимости их клинической валидации.

Ключевые слова: глаукома, искусственный интеллект, оптическая когерентная томография, ОСТ, ОСТА, RNFL, поле зрения, скрининг, прогрессирование.

MODERN CAPABILITIES OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES IN THE EARLY DIAGNOSIS OF GLAUCOMA AND ASSESSMENT OF DISEASE PROGRESSION

Kamilov Kholidjon Makhamadjanovich

*Center for the development of professional qualifications of medical workers
of the Ministry of Health of the Republic of Uzbekistan*

Khudoiberganov Azizbek Ruzbaevich

*Center for the development of professional qualifications of medical workers
of the Ministry of Health of the Republic of Uzbekistan*

ANNOTATION

Glaucoma is one of the leading causes of irreversible blindness, and early detection of the disease and assessment of its rate of progression are essential for preserving visual function in affected patients. In recent years, advances in artificial intelligence technologies have significantly expanded the capabilities for automated analysis of fundus images, optical coherence tomography (OCT), optical coherence tomography angiography (OCTA), and computerized perimetry data. Based on an analysis of published scientific studies, this article reviews the potential applications of artificial intelligence technologies in glaucoma screening and early diagnosis, detection of structural and functional disease progression, and prediction of its future course. Several studies have demonstrated that modern artificial intelligence algorithms achieve an area under the receiver operating characteristic curve (AUC) ranging from 0.94 to 0.99 for glaucoma detection and from 0.81 to 0.92 for predicting disease progression. Nevertheless, the generalizability and reliability of these algorithms across different populations, the representativeness of the datasets used for their development, and the need for rigorous clinical validation remain important issues.

Keywords: glaucoma, artificial intelligence, optical coherence tomography, OCT, OCTA, retinal nerve fiber layer (RNFL), visual field, screening, progression.

Долзарблиги. Кўрув нервнинг прогрессив оптик нейропатияси ҳиобланган глаукома, тўр парда ганглиоз ҳужайралари ва уларнинг аксонлари йўқолиши натижасида характерли структур ўзгаришлар ҳамда кўрув майдони нуқсонларининг шаклланиши билан кечади. Касаллик натижасида юзага келган нерв тўқимаси шикастланиши қайтарилмас хусусиятга эга бўлганлиги сабабли глаукомани клиник белгилар яққол намоён бўлишидан олдин аниқлаш замонавий офтальмологиянинг асосий вазифаларидан бири ҳисобланади. Глаукомани анъанавий ташхислаш кўз ичи босимини ўлчаш, кўрув нерви дискини офтальмоскопик баҳолаш, гониоскопия, периметрия ҳамда оптик когерент томография текширувларининг комплекс натижаларига асосланади. Бироқ олинган маълумотларни интерпретация қилишга шифокор тажрибаси, текширув сифати, анатомик индивидуаллик ва касаллик босқичи таъсир қилиши мумкин. 2020 йилда Mursch-Edlmaуr ва ҳаммуаллифлар сунъий интеллект (AI) алгоритмларининг глаукомани ташхислаш ва прогрессияни аниқлашда клиник амалиётга жорий этилиш имкониятларини таҳлил қилиб, AI тизимлари кўз тубининг тасвирлари, OCT ва периметрия текшируви маълумотларидан фойдаланиб, диагностик қарор қабул қилиш жараёнини қўллаб-қувватлаши мумкинлигини таъкидлаганлар [1]. Сўнгги йилларда сунъий интеллект технологиялари глаукоманинг кейинги ривожланишини прогнозлаш, структур ва функционал ўзгаришларни вақт бўйича таҳлил қилиш ҳамда беморларни хавф

даражаси бўйича стратификация қилиш босқичига ўтмоқда. AI моделларининг глаукомага шубҳали шахсларда касалликнинг келажакда ривожланишини ва мавжуд глаукомада прогрессия хавфини прогнозлаш имкониятлари алоҳида таъкидланган [14].

Мақсад. Илмий тадқиқотларни таҳлил қилиш асосида сунъий интеллект технологияларининг глаукомани эрта ташхислаш, оммавий скрининг қилиш, структур ва функционал прогрессияни аниқлаш ҳамда касалликнинг кейинги ривожланишини прогнозлашдаги замонавий имкониятларини баҳолаш.

Материаллар ва усуллар. Сўнгги йилларда глаукома ва сунъий интеллект соҳасида чоп этилган илмий ишлар ўрганилди. Кўз туби тасвирлари, ОСТ, ОСТА ва периметрия маълумотларидан фойдаланган тадқиқотларга алоҳида эътибор қаратилди. Алгоритмлар самарадорлигини баҳолашда ROC эгри чизиғи остидаги майдон — AUC, диагностик сезгирлик, спецификлик ва умумий аниқлик кўрсаткичлари таҳлил қилинди.

Натижалар ва уларнинг муҳокамаси. Сунъий интеллектнинг глаукомада энг кўп ўрганилган йўналишларидан бири кўз тубининг рангли тасвирларини автоматик таҳлил қилиш ҳисобланади. Чуқур нейрон тармоқлари кўрув нерви диски экскавацияси, нейроретинал ҳалқа ҳолати, вертикал cup/disc нисбати ва тўр парданинг бошқа морфологик белгиларини автоматик равишда баҳолаш имкониятига эга. Hemelings ва ҳаммуаллифлар 2021 йилда чуқур ўқитиш алгоритми глаукомани нафақат кўрув нерви диски соҳасидаги, балки унинг атрофидаги ретинал белгилар асосида ҳам ажрата олишини кўрсатган. Кўз тубининг рангли тасвиридан фойдаланилганда глаукомани аниқлаш учун AUC 0,94 ни ташкил этган. Қизиғи шундаки, кўрув нерви диски тасвирдан чиқариб ташланган ҳолатда ҳам модел маълум даражада диагностик қобилиятини сақлаб қолган [2]. Ajitha ва ҳаммуаллифларнинг 2021 йилдаги ишида 1113 та кўз тубининг рангли тасвири асосида глаукомани ажратишда 95,61% умумий аниқлик ва 100% спецификлик кўрсатган [3]. 2022 йилда Atalay ва ҳаммуаллифлар 9950 та кўз тубининг рангли тасвири асосида турли нейрон тармоқ архитектураларини солиштирган. Улар ишлаб чиққан алгоритм глаукомани аниқлашда 99,4% аниқлик, 100% сезгирлик ва 99% спецификлик кўрсатган. Бироқ бундай юқори ички натижалар моделнинг бошқа клиник марказ ва популяцияларда ҳам худди шундай аниқликда ишлашини англатмайди [4]. Шу сабабли кейинги тадқиқотларда алгоритмларни ташқи маълумотлар базасида синашга катта аҳамият берилмоқда. Hemelings ва ҳаммуаллифларнинг 2023 йилда чоп этилган тадқиқотида алгоритм 13 та турли маълумот манбалари, жумладан, йирик популяцион когорталар ва бир нечта очик маълумотлар базаларида баҳоланган. Муаллифлар турли популяциялар ва глаукома мезонлари

ўртасидаги фарқ алгоритмларнинг ташқи ишончилигига сезиларли таъсир қилишини кўрсатган [5].

Глаукомани сунъий интеллект ёрдамида оммавий скрининг қилишда энг муҳим лойиҳалардан бири AIROGS — Artificial Intelligence for Robust Glaucoma Screening Challenge ҳисобланади. AIROGS маълумотлар базаси тахминан 60 минг беморнинг 113 мингга яқин кўз тубининг рангли тасвирларини қамраб олган бўлиб, тасвирлар 500 га яқин турли скрининг марказларидан йиғилган. Тадқиқотда 14 та жамоа алгоритмлари баҳоланган ва энг яхши моделларнинг натижалари 20 нафар эксперт офтальмолог ва оптометристлар натижаларига яқин бўлган. Шунингдек, энг яхши алгоритм сифатсиз ёки баҳолаш учун яроқсиз тасвирларни аниқлашда AUC 0,99 натижа кўрсатган [6]. Ушбу натижалар AI асосидаги скрининг тизимларининг фақат юқори сифатли лаборатория маълумотларида эмас, балки реал клиник шароитда учрайдиган паст сифатли ва стандартдан ташқари тасвирларда ҳам ишончли ишлаши зарурлигини кўрсатади. 2026 йилда чоп этилган JustRAIGS тадқиқоти ҳам глаукома бўйича сунъий интеллект скрининг тизимларини янада такомиллаштиришга қаратилган бўлиб, алгоритм қарори билан бирга беморни офтальмологга йўллаш сабабини асослаш масаласига эътибор қаратилган [15].

Оптик когерент томография глаукомада кўрув нерви ва тўр пардадаги структур ўзгаришларни объектив баҳолашнинг асосий усулларида бири ҳисобланади. Айниқса, перипапилляр тўр парданинг нерв толалари қатлами - RNFL ва макуляр ганглиоз ҳужайралар – ички плексиформ қатлами - GCIPL/GCC кўрсаткичлари катта диагностик аҳамиятга эга. Rap ва ҳаммуаллифларнинг шарҳида чуқур ўқитиш алгоритмлари OCT ва икки ўлчамли В-скан тасвирларидан фойдаланиб глаукомани аниқлашда юқори диагностик имкониятларга эга эканлиги кўрсатилган [7]. 2020 йилда ишлаб чиқилган OCT асосидаги бир Deep Learning тизимида RNFL қалинлиги харитаси глаукомани ажратишда AUROC 0,987, RNFL меъёрдан оғиш харитаси - 0,974, GCIPL қалинлиги харитаси - 0,966 натижа кўрсатган. Бу натижалар перипапилляр RNFL хариталарида глаукомага хос бўлган фазовий маълумотлар алгоритмлар учун юқори диагностик аҳамиятга эга эканлигини кўрсатади [8]. 2021 йилда кенг майдонли созланувчан манбали (swept-source) OCT тасвирлари асосидаги Deep Learning тизими глаукомани ташхислашда AUC 0,987 ва тахминан 95–96% аниқликка эришган. Алгоритм, шу жумладан, глаукоманинг эрта босқичларини аниқлашда анъанавий OCT параметрларига нисбатан юқори натижалар кўрсатган [9].

Глаукомада фақат бир марталик ташхис қўйиш эмас, балки касалликнинг вақт давомида прогрессиясини аниқлаш муҳим аҳамиятга эга. Бир беморда RNFL қалинлиги секин камайиши мумкин бўлса, бошқа беморда тез прогрессия

кузатилиши мумкин. Шунинг учун индивидуал ўзгариш тезлигини баҳолаш даволаш тактикасини танлашда муҳимдир. Mariottoni ва ҳаммуаллифларнинг тадқиқотида 14034 та SD-OCT текшируви ва 816 та кўз маълумотларидан фойдаланиб, RNFL маълумотлари асосида глаукома прогрессиясини аниқловчи Deep Learning модели ишлаб чиқилган. Алгоритм AUC 0,938, сезирлик 87,3% ва спецификлик 86,4% натижа кўрсатган. Бир хил спецификлик шароитида DL модели анъанавий таҳлилдан устун бўлган [10]. Mandal ва ҳаммуаллифларнинг 2024 йилги тадқиқотида эса глаукоматоз прогрессияни физиологик ёшга боғлиқ RNFL ингичкалашишидан ажратишга ҳаракат қилинган. 3253 та кўздан олинган 8785 та кетма-кет OCT серияси таҳлил қилинганда, бир хил 95% спецификлик шароитида Deep Learning модели анъанавий чизиқли регрессияга нисбатан прогрессив ҳолатларни сезиларли даражада кўпроқ аниқлаган [11]. Ушбу йўналиш клиник жиҳатдан жуда муҳим, чунки кексايш натижасида ҳам RNFL қалинлигининг табиий камайиши кузатилади. AI эса физиологик ва патологик структур ўзгаришларни бир-биридан ажратишга ёрдам бериши мумкин.

Оптик когерент томография-ангиография глаукомада макула ва перипапилляр соҳадаги микроциркуляцияни баҳолаш имкониятини беради. Сўнгги тадқиқотлар қон томир зичлигидаги ўзгаришларни AI ёрдамида динамик таҳлил қилиш мумкинлигини кўрсатмоқда. Mohammadzadeh ва ҳаммуаллифлар 2024 йилда 202 та глаукоматоз кўзда камида тўрт марта олинган ОСТА тасвирларини таҳлил қилган. Ўртача кузатув муддати 3,5 йилни ташкил этган. Deep Learning модели прогрессияни аниқлашда AUC 0,81 натижа кўрсатган ва ОСТА тасвирларидан глаукоманинг динамик мониторинги учун қўшимча биомаркер сифатида фойдаланиш мумкинлигини кўрсатган [12].

Глаукоманинг клиник аҳамиятини белгиловчи асосий кўрсаткичлардан бири функционал йўқотиш, яъни кўрув майдонининг прогрессив ёмонлашишидир. Шу сабабли ҳали периметрияда яққол прогрессия кузатилмасдан туриб, келажакда унинг юзага келишини прогнозлаш катта аҳамиятга эга. Mohammadzadeh ва ҳаммуаллифларнинг 3079 та кўзни қамраб олган тадқиқотида базавий RNFL қалинлиги ва кўрув нерви диски тасвиридан фойдаланилганда келажакдаги кўрув майдони прогрессиясини прогнозлаш AUC 0,813 ни ташкил этган. Дискнинг иккинчи тасвири қўшилганда AUC 0,860 га, учинчи тасвир қўшилганда эса 0,894 га ошган. Тез прогрессия қилувчи глаукомада алгоритм AUC 0,911 натижа кўрсатган [13]. AI алгоритмлари беморда кўрув майдони ҳали сезиларли ёмонлашмасдан олдин структур маълумотлар асосида келажак функционал хавфини баҳолаши мумкин. Huang ва ҳаммуаллифлар 2024 йилда макуляр OCT тасвирларидан фойдаланиб кўрув майдони прогрессиясини аниқлаш ва прогнозлаш учун Vision Transformer модели ишлаб чиққан. Модел 7,7 миллиондан оптик B-scan тасвирларидан

мавжуд прогрессияни аниқлашда AUC 0,90, тез прогрессияни аниқлашда 0,92, келажакдаги прогрессияни прогнозлашда эса 0,85 натижа қайд этилган [16]. Шунингдек, кетма-кет кўрув нерви диски тасвирларидан фойдаланган Deep Learning модели кейинги кўрув майдони прогрессиясини AUC 0,862 билан прогнозлаган. Тез прогрессия қилувчи ҳолатларда AUC 0,926 гача ошган [17]. Демак, AI технологиялари келажакда беморларни “стабил”, “секин прогрессия қилувчи” ва “тез прогрессия қилувчи” гуруҳларга ажратиш имкониятини бериши мумкин.

Анъанавий ёндашувда глаукомали беморларни текшириш интерваллари асосан касаллик босқичи ва шифокорнинг клиник баҳосига асосланади. Бироқ индивидуал прогрессия тезлиги беморлар ўртасида катта фарқ қилади. Сунъий интеллектнинг истиқболли вазифаси кўз ички босими, RNFL, GCC, кўрув нерви диски тасвирлари, кўрув майдони, ёш, марказий шох парда қалинлиги, оилавий анамнез ва бошқа омилларни бирлаштирган мультимодал моделларни яратишдан иборат [18]. 2026 йилги систематик таҳлилда глаукома ривожланиши ва прогрессиясини прогнозлашга бағишланган 44 та тадқиқот таҳлил қилинган. Улардан 7 таси глаукомага шубҳали ёки соғлом шахсларда келажакда глаукома пайдо бўлишини, 30 таси мавжуд глаукоманинг прогрессиясини ва 7 таси жарроҳлик аралашувигача бўлган прогрессияни прогнозлашга бағишланган. Муаллифлар AI моделларида клиник жиҳатдан истиқболли натижалар мавжудлигини, аммо уларни реал амалиётга киритиш учун ташқи ва проспектив валидация зарурлигини таъкидлаганлар [14].

AI технологияларининг асосий устунлиги катта ҳажмдаги диагностик маълумотларни тез, такрорланувчан ва стандартлаштирилган тарзда таҳлил қилиш имкониятидир. AI тизими офтальмолог ўрнини тўлиқ босиши эмас, балки клиник қарор қабул қилишни қўллаб-қувватловчи тизим сифатида ишлаши мақсадга мувофиқ. 2025 йилги замонавий шарҳларда ҳам офтальмологнинг глаукома беморларини бошқаришда етакчи роли сақланиб қолиши таъкидланган.

Ўзбекистон Республикаси шароитида сунъий интеллектнинг глаукомада қўлланилиши, биринчи навбатда, оммавий скрининг ва хавф гуруҳидаги аҳолини саралашда самарали бўлиши мумкин. Бунда республика бўйича ягона стандарт асосида йиғиладиган кўз туби тасвирлари, OCT, кўрув майдони ва клиник маълумотларни ўз ичига олувчи миллий глаукома маълумотлар базасини яратиш муҳим аҳамиятга эга. Айниқса, бирламчи тиббий-санитария ёрдами муассасаларида портатив фондус камералари ёки бошқа рақамли диагностик қурилмалардан фойдаланиб тасвирларни марказлашган AI платформасига юбориш, глаукомага шубҳали ҳолатларни автоматик саралаш ва уларни

ихтисослаштирилган офтальмологик марказларга йўналтириш истиқболли йўналиш ҳисобланади.

Хулоса. Илмий тадқиқотлар глаукомада сунъий интеллект технологияларининг ривожланиши жадал суръатларда кечаётганини кўрсатади. Агар дастлабки алгоритмлар асосан кўз туби тасвири асосида глаукомани соғлом кўздан ажратишга қаратилган бўлса, замонавий Deep Learning ва Transformer моделлари OCT, OCTA, кўрув нерви диски тасвирлари ва кўрув майдони маълумотларини таҳлил қилиб, касалликнинг структур ва функционал прогрессиясини аниқлаш ҳамда келажакдаги ўзгаришларни прогнозлаш имконини бермоқда. Шу билан бирга, сунъий интеллектнинг энг муҳим клиник йўналишларидан бири глаукоманинг прогрессиясини олдиндан прогнозлашдир. 2024 йилдаги тадқиқотларда OCT, RNFL ва кетма-кет кўрув нерви диски тасвирлари ёрдамида тез функционал прогрессия хавфини AUC 0,91–0,93 гача бўлган натижалар билан прогнозлаш мумкинлиги кўрсатилди. Келажакда мультимодал AI тизимлари беморнинг структур, функционал ва клиник маълумотларини бирлаштириб, касаллик хавфини индивидуал баҳолаш, текширувлар интервалини белгилаш ва даволаш интенсивлигини танлашда офтальмологга ёрдам бериши мумкин. Ўзбекистонда ушбу технологияларни жорий қилиш учун миллий офтальмологик маълумотлар базасини шакллантириш, маҳаллий популяцияда алгоритмларни валидация қилиш ва сунъий интеллектни телемедицина тизимлари билан интеграция қилиш муҳим илмий-амалий йўналиш бўлиб ҳисобланади.

Фойдаланилган адабиётлар рўйхати:

1. Mursch-Edlmayr A.S., Ng W.S., Diniz-Filho A., et al. Artificial Intelligence Algorithms to Diagnose Glaucoma and Detect Glaucoma Progression: Translation to Clinical Practice. Transl Vis Sci Technol. 2020;9(2):55. DOI: 10.1167/tvst.9.2.55. PMID: 33117612.
2. Hemelings R., Elen B., Barbosa-Breda J., et al. Deep learning on fundus images detects glaucoma beyond the optic disc. Sci Rep. 2021;11:20313. DOI: 10.1038/s41598-021-99605-1. PMID: 34645908.
3. Ajitha S., Akkara J.D., Judy M.V. Identification of glaucoma from fundus images using deep learning techniques. Indian J Ophthalmol. 2021;69(10):2702–2709. DOI: 10.4103/ijo.IJO_92_21. PMID: 34571619.
4. Atalay E., et al. Investigation of the Role of Convolutional Neural Network Architectures in the Diagnosis of Glaucoma using Color Fundus Photography. Turk J Ophthalmol. 2022. PMID: 35770344.
5. Hemelings R., Elen B., Schuster A.K., et al. A generalizable deep learning regression model for automated glaucoma screening from fundus images. npj Digit Med. 2023;6:112. DOI: 10.1038/s41746-023-00857-0. PMID: 37311940.
6. De Vente C., et al. AIROGS: Artificial Intelligence for Robust Glaucoma Screening Challenge. 2023. PMID: 37713220.

7. Ran A.R., Tham C.C., Chan P.P., et al. Deep learning in glaucoma with optical coherence tomography: a review. *Eye (Lond)*. 2021;35(1):188–201. DOI: 10.1038/s41433-020-01191-5. PMID: 33028972.
8. Development and Validation of a Deep Learning System for Diagnosing Glaucoma Using Optical Coherence Tomography. PMID: 32659918.
9. Deep Learning-based Diagnosis of Glaucoma Using Wide-field Optical Coherence Tomography Images. 2021. PMID: 33979115.
10. Mariottoni E.B., Datta S., Shigueoka L.S., et al. Deep Learning-Assisted Detection of Glaucoma Progression in Spectral-Domain OCT. *Ophthalmol Glaucoma*. 2023;6(3):228–238. DOI: 10.1016/j.ogla.2022.11.004. PMID: 36410708.
11. Mandal S., Jammal A.A., Malek D., Medeiros F.A. Progression or Aging? A Deep Learning Approach for Distinguishing Glaucoma Progression From Age-Related Changes in OCT Scans. *Am J Ophthalmol*. 2024;266:46–55. DOI: 10.1016/j.ajo.2024.04.030. PMID: 38703802.
12. Mohammadzadeh V., Liang Y., Moghimi S., et al. Detection of glaucoma progression on longitudinal series of en-face macular optical coherence tomography angiography images with a deep learning model. *Br J Ophthalmol*. 2024;108(12):1688–1693. DOI: 10.1136/bjo-2023-324528. PMID: 39117359.
13. Mohammadzadeh V., Wu S., Besharati S., et al. Prediction of Visual Field Progression with Baseline and Longitudinal Structural Measurements Using Deep Learning. *Am J Ophthalmol*. 2024;262:141–152. DOI: 10.1016/j.ajo.2024.02.007. PMID: 38354971.
14. Yang W.Y.L., Wong H.J., Fu C.E., et al. Artificial intelligence in the prediction of glaucoma development and progression: A systematic review. *Surv Ophthalmol*. 2026;71(1):235–247. DOI: 10.1016/j.survophthal.2025.06.006. PMID: 40541841.
15. Madadi Y., Raja H., Vermeer K.A., et al. JustRAIGS: Justified Referral in AI Glaucoma Screening Challenge. *IEEE Trans Med Imaging*. 2026;45(1):320–335. DOI: 10.1109/TMI.2025.3596874. PMID: 40773411.
16. Huang J., Galal G., Mukhin V., Etemadi M., Tanna A.P. Prediction and Detection of Glaucomatous Visual Field Progression Using Deep Learning on Macular Optical Coherence Tomography. *J Glaucoma*. 2024;33(4):246–253. DOI: 10.1097/IJG.0000000000002359. PMID: 38245813.
17. Mohammadzadeh V., Wu S., Davis T., et al. Prediction of visual field progression with serial optic disc photographs using deep learning. *Br J Ophthalmol*. 2024;108(8):1107–1113. DOI: 10.1136/bjo-2023-324277. PMID: 37833037.
18. Lan C.H., Chiu T.H., Yen W.T., Lu D.W. Artificial Intelligence in Glaucoma: Advances in Diagnosis, Progression Forecasting, and Surgical Outcome Prediction. *Int J Mol Sci*. 2025;26(10):4473. DOI: 10.3390/ijms26104473. PMID: 40429619