

Elülsőszegmentum- optikaikoherencia-tomográfia (OCT) a korszerű szemészeti diagnosztikában

Lukács Miklós Ágoston dr. ■ Módis László dr.

Debreceni Egyetem, Általános Orvostudományi Kar, Szemészeti Tanszék, Debrecen

Az 1990-es évektől a tomográfiai vizsgálati technikák a szemészetben jelentős fejlődésen mentek keresztül. Az optikaikoherencia-tomográfianak (OCT) döntő szerepe van a retina kórkepeinek differenciáldiagnózisában, ez az infravörös fényvel működő noninvasív technika azonban a szem elülső szegmentumának képalkotására is kiválóan alkalmas. A korábbi „time-domain” rendszerű tomográfiaikat a szemmozgásra kevésbé érzékeny, nagyobb felbontásra képes ’spectral-domain’ és ’swept-source’ típusok váltották fel. Mikrométeres felbontású képalkotása a rekonstruált keresztmetszeti képek mellett kvantitatív adatokat biztosít a szemfelszíntől a szemlencséig. Alkalmazási területeihez tartozik a szemfelszín, a cornealis homályok, degenerációk, dystrophiák vizsgálata. A szaruhártyakórképek diagnosztikájában előnye, hogy megbízható adatokat szolgáltat nemcsak az elülső, hanem a hátulsó felszín görbületéről, így a szaruhártya valódi teljes törőerejéről, valamint vastagságáról is. Segítségével a korai keratoconus is kiszűrhető. Emellett kiválóan alkalmazható szaruhártyaműtétek (refraktív sebészet, szaruhártya-átültetés) utáni követésre. Ezeken felül a glaucoma diagnosztikájában, műlencsetervezésben is pontos, megbízható technológia. Az egyik legújabb felhasználási területe az operálómikroszkópba integrált formája, amely műtét közben az operátor munkáját segíti. Másik, szintén újdonságnak számító formája az elülső szegmentum noninvasív angiográfiai vizsgálata. *Orv Hetil.* 2024; 165(29): 1112–1121.

Kulcsszavak: optikaikoherencia-tomográfia (OCT), szaruhártya, elülső szegmentum

Anterior segment optical coherence tomography in modern ophthalmic diagnostics

Since the 1990s, tomography examination techniques in ophthalmology have undergone significant development. Optical coherence tomography (OCT) plays a crucial role in the differential diagnosis of retinal pathologies, however, this non-invasive technique that operates with infrared light is also excellent for imaging the anterior segment of the eye. The former time-domain tomographies have been replaced by spectral-domain and swept-source types, which are less sensitive to eye movement and capable of higher resolution. In addition to reconstructed cross-sectional images, its micrometer-resolution imaging provides quantitative data from the ocular surface to the lens. Its fields of application include the examination of the ocular surface, corneal opacities, degenerations, and dystrophies. In the diagnosis of corneal pathologies, the advantage is that it provides reliable data not only on the anterior but also on the posterior curvature, thus on the true total refractive power of the cornea, as well as on its thickness. It can also be used for early keratoconus screening. It is also excellent for follow-up after corneal surgeries (refractive surgery, corneal transplantation). In addition, it is an accurate and reliable technology in the diagnosis of glaucoma and intraocular lens calculation. One of its latest applications is its integrated form in the operating microscope, which assists the surgeon during intervention. Another innovative form is the non-invasive angiographic examination of the anterior segment.

Keywords: optical coherence tomography (OCT), cornea, anterior segment

Lukács MÁ, Módis L. [Anterior segment optical coherence tomography in modern ophthalmic diagnostics]. *Orv Hetil.* 2024; 165(29): 1112–1121.

(Beérkezett: 2024. április 22.; elfogadva: 2024. május 11.)

Rövidítések

AOD = (angle opening distance) csarnokzugi mélység; ARA = (angle recess area) csarnokzugi terület; DALK = (deep anterior lamellar keratoplasty) mély elülső lamelláris keratoplasztika; DMEK = (Descemet's membrane endothelial keratoplasty) Descemet-membrán endothelialis keratoplasztika; DSAEK = (Descemet's stripping automated endothelial keratoplasty) Descemet-membrán-leválasztásos endothelialis keratoplasztika; HR = (high-resolution) nagy felbontású; ICL = (implantable collamer lens) beültethető kollamerlencse; iOCT = (intraoperative optical coherence tomography) intraoperatív optikaikoherencia-tomográfia; LASIK = laser *in situ* keratomileusis; OCT = (optical coherence tomography) optikaikoherencia-tomográfia; PTK = (phototherapeutic keratectomy) fototerápiás keratectomia; SD = (spectral domain) spektráldomén; SRAX = (skew of radial axis) a radiális tengely ferdesége; SS = swept source; TD = (time domain) idődomén; TISA = (trabecular iris space area) a trabecularis hálózat és az iris közötti csarnokzugi terület

Az optikaikoherencia-tomográf működési elve, típusai

A szemészetben egyre nagyobb teret nyernek az objektív képalkotó módszerek. Ezt példázza, hogy manapság a hátulsó szegmentum kórképeinek korszerű diagnosztikája elképzelhetetlen az optikaikoherencia-tomográfia (OCT) nélkül. Emellett az elülső szegmentum képalkotó műszerei is értékes kvalitatív és kvantitatív információkkal látják el a klinikust. Az elülső szegmentum (cornea, elülső csarnok, iris, szemlencse) réslámpás vizsgálatát kiegészíthetjük corneatopográfiával, ultrahang-biomikroszkópiával, a Scheimpflug-képalkotáson alapuló tomográfiával, spekulár-mikroszkópiával és OCT-vel. Az utóbbiról az elmúlt évtizedben már néhány hazai tanulmány is megjelent [1, 2].

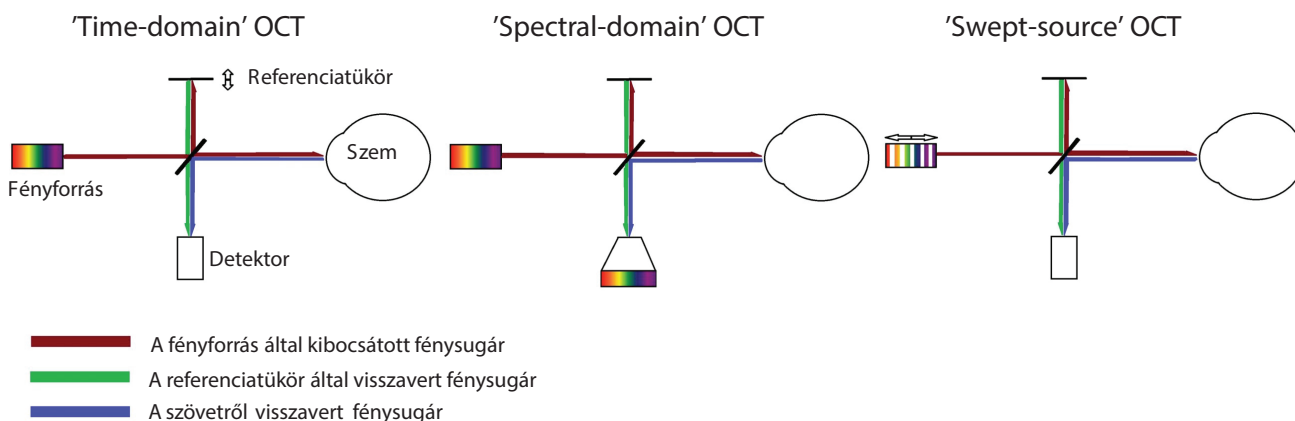
Jelen közleményünkben célul tűztük ki, hogy röviden bemutassuk a szemészetben használatos OCT-készülé-

kek működési elvét, és áttekintést adjunk arról, hogy az elülső szegmentum eltéréseiben, kórképeiben hogyan segíti a diagnosztikát ez a relatíve újonnan elterjedt képalkotó módszer.

Az OCT optikai elven működő, infravörös fényt használó tomográf, amellyel mind az elülső, mind a hátsó szegmentum térbeli ábrázolása lehetséges mikrométeres felbontásban, mindez a szövetek érintése nélkül. A műszer nevében a koherencia arra vonatkozik, hogy az általa kibocsátott fénysugarak interferenciára képesek. Az időben állandó fáziskülönbségű, egyező frekvenciájú hullámokat koherensnek nevezünk. Két találkozó koherens hullám interferál, erősítést vagy gyengítést létrehozva.

Az OCT legelső képviselői az ún. 'time-domain' típusúak voltak (TD-OCT). Ezek működési elve azonos a Michelson-féle interferométerével. A kibocsátott infravörös fénysugár két részre oszlik: az egyik nyaláb a vizsgált szövetre esik, a másik egy változtatható távolságban lévő referenciatükörre, amely a ráeső fényt visszaveri. A vizsgált szövetről – annak optikai tulajdonságaitól függően – különböző mélységekben és mértékben verődik vissza fénysugár. A két nyaláb a detektorban találkozik, az ott érzékelt jel intenzitását pedig a visszavert fény intenzitása és a két nyaláb interferenciája határozza meg. A referenciatükör mozgatásával meghatározható, hogy milyen mélységben történik a szövetben a fény visszaverődése, maximális erősítést ugyanis akkor kapunk, amikor a két sugárnyaláb közti fáziskülönbség nulla (tehát a vizsgált anyagban mélyebben visszavert fénysugár akkor ad maximális erősítést a detektorban, amikor a referenciatükör távolabbi pozícióba kerül). Ennek a technikának az a hátránya, hogy mozgó alkatrész van benne, amely korlátozza a leképezés gyorsaságát.

Később a TD típusúak mellett megjelentek az ún. 'Fourier-domain' típusú OCT-k. Az utóbbi tovább csoportosítható 'spectral-domain' (SD) és 'swept-source' (SS) típusokra. A referenciatükör mindkét típusban



1. ábra

Az optikaikoherencia-tomográfia technológiai fejlődése. Az alapelv mindhárom esetben ugyanaz, a szövetről és a referenciatükörről visszaverődő infravörös fénysugarak interferenciájából származtatható a rekonstruált félvétel. A legfejlettebb 'swept-source' technológiában a fényforrást módosították, amely mintegy végighalad a kibocsátott infravörös tartományon

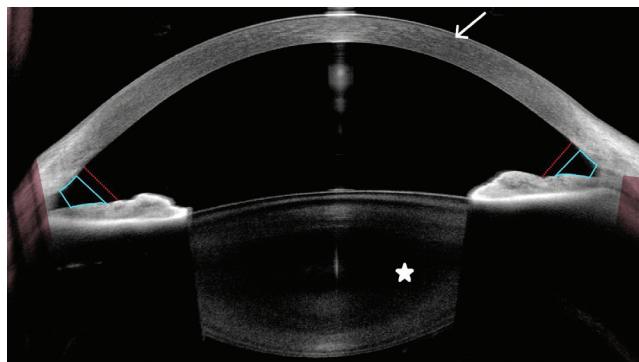
OCT = optikaikoherencia-tomográfia

1. táblázat | Az egyes OCT-típusok jellemzői [4]

| | 'Time-domain' | 'Spectral-domain' | 'Swept-source' |
|------------------------------|--------------------------|-------------------|---------------------------------------|
| Fényforrás | Szuperlumineszcens dióda | | Osztott spektrum, változó hullámhossz |
| Referenciatükör | Mozgó | Fix | |
| Alkalmazott hullámhossz (nm) | 1310 | 840–880 | 1050–1310 |
| Axiális felbontás (um) | 18–25 | 5–7 | <10 |
| Vizsgálható mélység (mm) | 6–7 | 1,8–5,8 | 3–6 |
| Képkészítési sebesség (kHz) | 0,2–2 | 26–53 | 30–100 |

mozdulatlan. Az SD-OCT esetében a műszer széles hullámhossz-tartományú infravörös spektrumot bocsát ki, az interferenciamintázatot pedig egy spektrométer méri. A különböző mélységekben visszaverődő fénysugarak interferenciáját a kibocsátott teljes spektrumban mérve lehet rekonstruálni a szövet felépítését a megfelelő matematikai eljárással (Fourier-transzformációval). Másik lehetőség, amikor a kibocsátott fény nem foglal magában egyszerre egy széles infravörös spektrumot, hanem a műszer egyszerre csak egy adott hullámhosszú fényt bocsát ki, és végighalad a spektrumon (SS-OCT) [3, 4]. A három típus közötti hasonlóságokat és különbségeket az 1. ábra és az 1. táblázat szemlélteti [4]. Az SS-OCT mikrométeres felbontásának segítségével az elülső szegmentum képletei anatómiai szinten jeleníthetők meg (2. ábra).

A szemén végzett első OCT-vizsgálat a hátsó szegmentumról készült 1991-ben. Huang és mtsai a látóideg fő környezetében vizsgálták a retinát, és felismerték, hogy az idegrostvastagság objektív mérése ezzel a módszerrel a glaucoma okozta retinakárosodás korai felisme-



2. ábra | Egy egészséges szem elülső szegmentumának optikakoherencia-tomográfias felvétele. A szaruhártya (nyíl) óráüvegként borul a bulbusra, alul a szemlencse (csillag), közöttük kétoldalt az íris, az elülső csarnok és a csarnokzug (kék vonallal határolt terület)

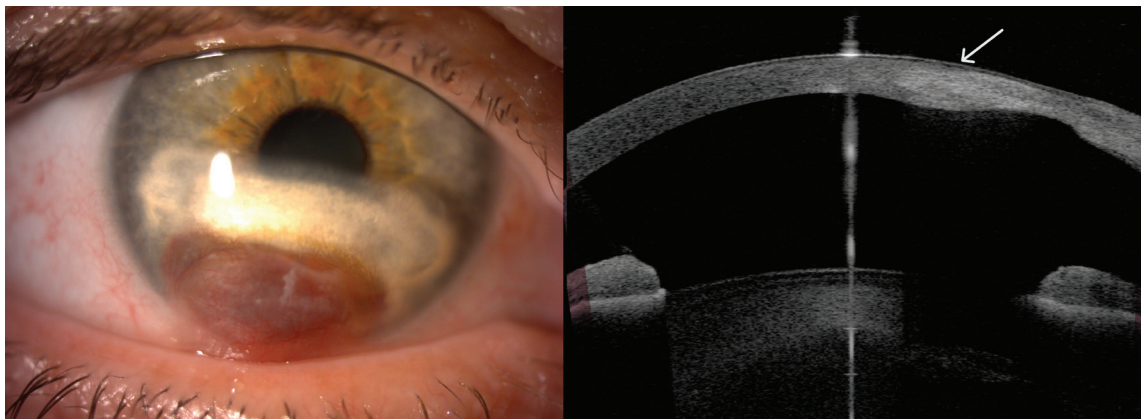
résében segíthet [5]. Ezt követte 1994-ben az elülső szegmentum OCT-vel történő leképezése Izatt és mtsai által, akik többek között szaruhártya-vastagságot, elülső-csarnok-mélységet és csarnokzugi szöget mértek [6].

A szemfelszín OCT-vizsgálata

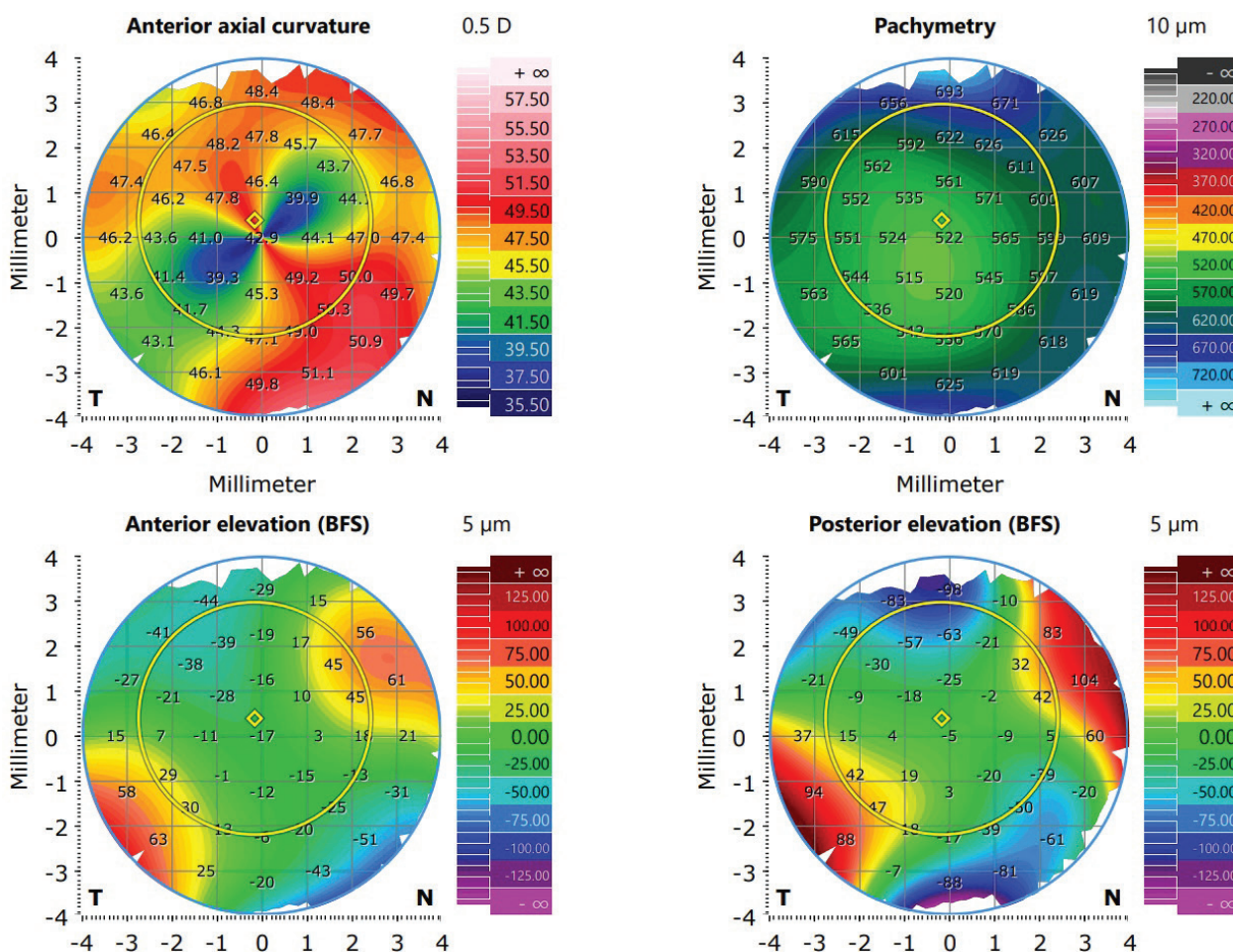
A szemfelszín legkülső rétege a könnyfilm, amely 3 fő rétegből áll (mucin, vizes és lipid fázis), és bármely részének csökkent termelődése, hiánya a száraz szem különböző formáit hozza létre. Az OCT az alsó szemhéjjal határos területen, az alsó könnymeniscusban képes mérni a könnyfilm magasságát, mélységét és keresztmetszeti területét. A jelenleg érvényes irányelv szerint a könnyhiányos száraz szem esetében a könnymeniscus magasságának meghatározása segíti a diagnózist [7]. A szemfelszínen különböző, degeneratív szövetszaporulatok is vizsgálhatók OCT-vel, mint a pterygium, pseudopterygium és pinguecula. Ezek belső szerkezete és környezetükhöz való viszonya is jól megítélhető. A malignitásra gyanús, malignus eseteknél ugyan az eltávolítás utáni szövettani vizsgálat az irányadó, de kiegészítő, noninvaszív vizsgálatként végezhetünk OCT-t (3. ábra). A szemfelszíni laphámsejtes neoplasiák változatos csoportjánál éles határu, megvastagodott és hiperreflektív felszíni hám figyelhető meg. Az epithelium vastagságának mérésével nagy (100% közeli) szenzitivitással és specificitással különíthetők el a laphámsejtes neoplasiák a pterygiumtól [8]. Ugyanakkor a laphámsejtes neoplasiák jellegzetes megjelenését az OCT-n egyéb, nem malignus elváltozások (papilloma, parakeratosis, keratoticus plakk) utánozhatják [9]. Emellett a többi nem pigmentált laesió elkülönítésében is támpontot adhat az OCT-n látott morfológia. A nagy felbontású OCT (HR-OCT – high-resolution OCT) megmutatja, hogy a szövetszaporulat az epitheliumban van-e, vagy subepithelialis helyzetű. Ennek jelentőségét az adja, hogy ezek között benignus és malignus elváltozások egyaránt lehetnek. Epitheliumból kiinduló malignus folyamat a laphámsejtes carcinoma. A lymphoma, a benignus reaktív lymphoid hyperplasia, a melanoma, valamint az amyloidosis szemfelszíni formái elsősorban a subepithelialis rétegből indulnak ki. A vastag vagy mélybe terjedő laesiók hátsó határának vizsgálatához ugyanakkor az ultrahang-biomikroszkópia az ideális eszköz [10].

Refraktív sebészet és az OCT

A fénytörési hibák lézeres korrekciója töretlen népszerűségnek örvend, a legelterjedtebb a lézer *in situ* keratomileusis (LASIK). A beavatkozás elvégezhetőségének feltétele a megfelelő szaruhártya-vastagság. Ezenkívül a keratoconus szubklinikai formáit is szükséges kizárni a műtét előtt. Ennek eldöntésére a corneatomográfia elengedhetetlen. Műtét utáni OCT-felvételeken meghatározható a stromalebény vastagsága, helyzete, valamint kimutathatók a lehetséges komplikációk is. Az utóbbi



3. ábra | Szemfelszíni, corneára terjedő haemangioma réslámpás (balra) és optikai koherencia-tomográfias felvétele (jobbra). A szaruhártya alsó részénél a sűrű kapilláris hálózat, felső határán heges, degeneratív sáv figyelhető meg. Az optikai koherencia-tomográfias képen a degeneratív sávnak megfelelően az optikailag densebb stroma látható, felette intakt hámborítással (nyíl)



4. ábra | A szaruhártya négy legfontosabb tulajdonságát reprezentáló színekódolt tomogram. Az elülső axiális törőerő (balra fent) és a vastagsági profil (jobbra fent) mellett az ún. elevációs térképek (lent) az egy szoftver által illesztett gömbfelület (BFS – best fit sphere) síkjától való eltérést jelzik

hoz tartoznak a lebeny elmozdulásával járó szövődmények, valamint az alatta lévő stroma érintkezésénél jelentkező, ún. „interface” eltérések (például hámbenövés) [11]. Egy másik, reverzibilis beavatkozás a szem fénytörési hibáinak kezelésére az ún. 'phakiás, implantable collamer' (ICL) lencsék. Ebben az esetben a hátsó csarnok-

ba, a corpus ciliare sulcusába helyeznek be egy műlencsét. A műlencse megfelelő méretének és az operálandó szem anatómiájának pontos ismerete elengedhetetlen az ilyen műtétek előtt, ezek határozzák meg ugyanis műtét után a műlencse és a saját szemlencse közötti távolságot. A túl kicsi lencse csökkenti a távolságot, így cataracta formáló-

dásához vezethet, a túl nagy lencse pedig a csarnokzugot teszi keskenyebbé, ami növelheti a szemnyomást. Az elülsőszegegmentum-OCT így az ideális műlencseméret megállapításával mérsékelheti a reoperációk szükségességét [12].

Szaruhártya-elváltozások OCT-vizsgálata

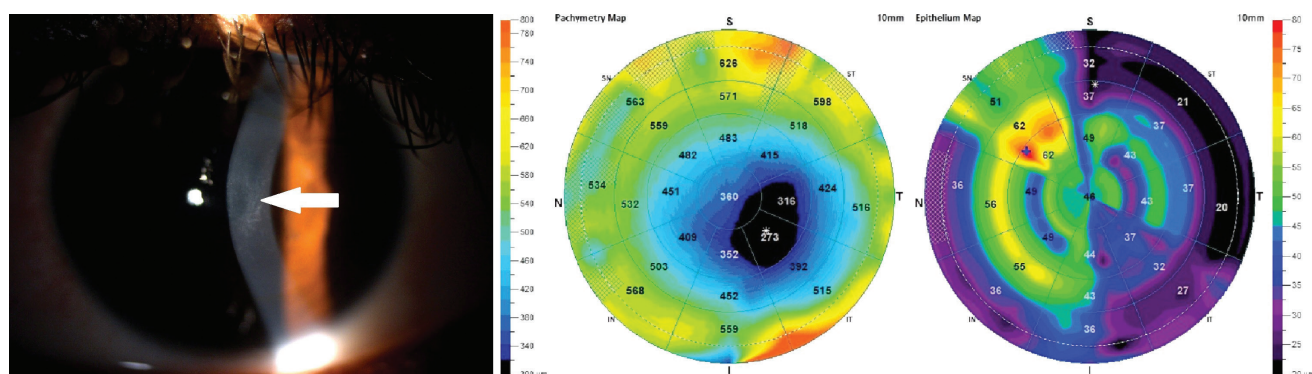
Az OCT-vel, mint fentebb bemutatuk, a szaruhártya nagy felbontású vizsgálata lehetséges. Ezenfelül a műszer színekódolt térképeken ábrázolja a szaruhártya-vastagságot (pachymetria), az elülső és a hátsó felszín axiális görbületét, elevációját, valamint a törőerőt a cornea teljes területén (4. ábra). A mért adatok numerikusan is megjeleníthetők, ami lehetőséget ad egyes, a továbbiakban részletezett kórképek diagnosztikájára, nyomon követésére, valamint a kezelés hatásosságának mérésére. Az elülső szegegmentumról készült keresztmetszeti, szürkeárnyalatos képek megmutatják, mennyire áttetsző a szaruhártya egy adott területe (denzitometria). A sötétebb területek a normális áttetsző viszonyokat tükrözik, a világos részek pedig arra a területre mutatnak rá, ahol a szövet transzparenciája csökkent. Ennek számos oka lehet: akut gyulladás, már lezajlott gyulladás utáni heges terület, sérülés hege, valamint a különböző szaruhártya-dystrophiáknál és -degenerációknál megfigyelhető kóros anyagcseretermékek lerakódása. A szaruhártya megvastagodása vagy elvékonyodása szintén jól ábrázolódik a rekonstruált képen. A vastagabb cornea hegesedést, oedemát jelezhet, az utóbbi a szaruhártya legbelső sejtrétegének, az endotheliumnak a károsodására utalhat. Az elvékonyodás számos kórkép része lehet, ilyen a keratoconus vagy a lezajlott gyulladás.

OCT a keratoconus diagnosztikájában

A keratoconus a szaruhártya kétoldali progresszív elvékonyodásával és kiboltosulásával járó kórkép. Ami az elváltozás refraktív tulajdonságait illeti, jellemző a centrális szaruhártya-törőerő növekedése, a törőerőben mutat-

kozó alsó-felső aszimmetria (alul jellemzően nagyobb), jelentős astigmia és az astigmia szabálytalanságára utaló torzult radiális tengely (skew of radial axis – SRAX) [13]. Az elülső felszín görbületének megváltozását a hagyományos corneatopográfia is kimutatja, és a különböző, szoftveresen számított kombinált topografikus indexek közvetlenül a diagnózist segítik. Ezzel szemben a tomográfias vizsgálatok a szaruhártya hátsó felszínének görbületét, a szaruhártya vastagságát, így a valódi, teljes törőerejét is mérik. Erre az egyik módszer a bevezetőben már említett Scheimpflug-képalkotás (Pentacam; Oculus, Wetzlar, Németország), amely a szaruhártya háromdimenziós rekonstrukcióját az elülső és a hátsó felszín elevációs értékeiből végzi. Az OCT-vel pedig az általa mért pontos keratometriás/pachymetriás adatokkal tapasztalhatjuk a keratoconusra jellemző aszimmetriát [14].

Az újabb fejlesztésű OCT-készülékek nagy felbontása lehetővé teszi, hogy a szaruhártya egyes rétegeinek vastagságát külön mérjük meg (5. ábra). Az epithelium vastagságának meghatározása a szaruhártya legvékonyabb pontján további segítséget nyújthat a keratoconus szubklinikai formáinak diagnosztikájában. A szaruhártya ezen pontjának elhelyezkedése ugyanis átfed a legvékonyabb epithelium és a hátsó felszíni maximális eleváció helyével. Normális keratometriás értékekkel rendelkező szubklinikai keratoconus esetén a legvékonyabb ponton mért hámvastagság szignifikánsan vékonyabb az egészséges szaruhártyákhoz képest. A két csoport 89%-os szenzitivitással és 60%-os specificitással különböztethető meg egymástól, 52 µm-es 'cut-off' érték (vágóérték) mellett [15]. A legújabban közölt, OCT-alapú keratoconus-stádiumbeosztás pedig a cornea legvékonyabb pontját és a hámvastagság egyenetlenségét jellemző epithelialis standard deviációt veszi figyelembe [16]. A keratoconus diagnózisa és progressziójának követése mellett az elülsőszegegmentum-OCT a kórkép konzervatív kezelésében is nagy segítséget nyújt. Idetartoznak a kemény gázáteresztő kontaktlencsék és a sclerális kontaktlencsék, melyek a szabálytalan elülső cornealis felszínt a könnyréteggel



5. ábra | Keratoconus heges, degeneratív csúccsal (nyíl). A nagy felbontású optikai koherencia-tomográfia nemcsak a teljes szaruhártya-vastagságról (középen), hanem külön az epitheliumról (jobbra) is színekódolt tomogramot készít. Ezek az adatok objektív diagnosztikai módszert és stádiumbeosztást tesznek lehetővé

együtt kompenzálva javítják a szem fénytörését. Az elülszegmentum-OCT-vel vizsgálható a kontaktlencse és a szemfelszín közötti távolság, valamint azok a sclerális, illetve cornealis területek, ahol a szemfelszínre a kontaktlencse felfekszik. Ezáltal a lencsék illesztésében és a viselés következtében kialakult komplikációk felismerésében segíti a klinikust [17].

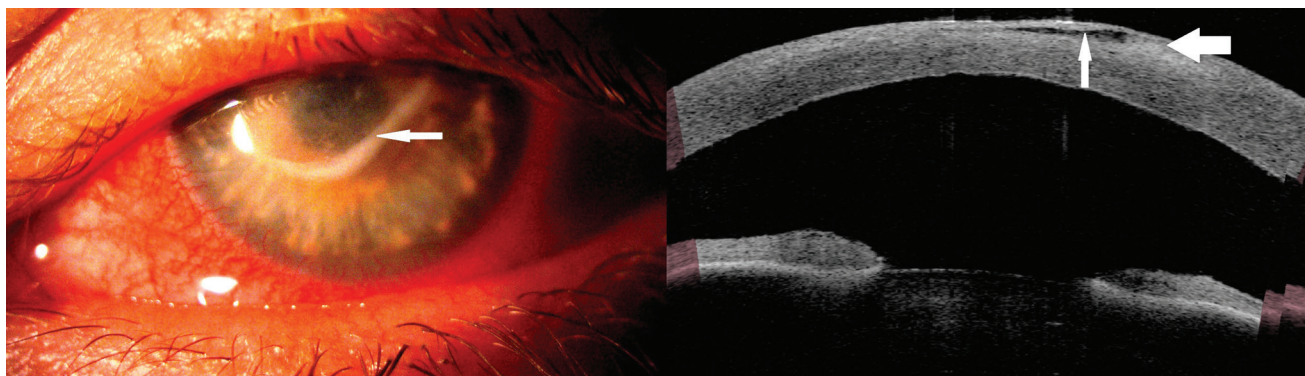
OCT a szaruhártyahomályok, -infekciók diagnosztikájában

Egyes szaruhártya-betegségek csökkent transzparenciájú területek megjelenésével járnak. Ezt etiológiától függően okozhatja degeneratív kórkép, dystrophia, trauma és infektív vagy noninfektív gyulladásos folyamat. A réslámpás vizsgálat mellett az OCT az elváltozás pontosabb kimutatását teszi lehetővé (6. ábra). Segítségével megállapítható a kóros terület kiterjedése, nagysága, mélysége, továbbá a progresszió pontosabb követésére is alkalmas a módszer. A különböző etiológiájú corneahomályoknál az OCT segíthet a tervezett beavatkozás típusának megválasztásában. A felszínes folyamatok abrázióval, esetleg lézeres beavatkozással (fototerápiás keratectomia – PTK), a mélyebb elváltozások lamelláris vagy perforáló szaruhártya-átültetéssel gyógyíthatók.

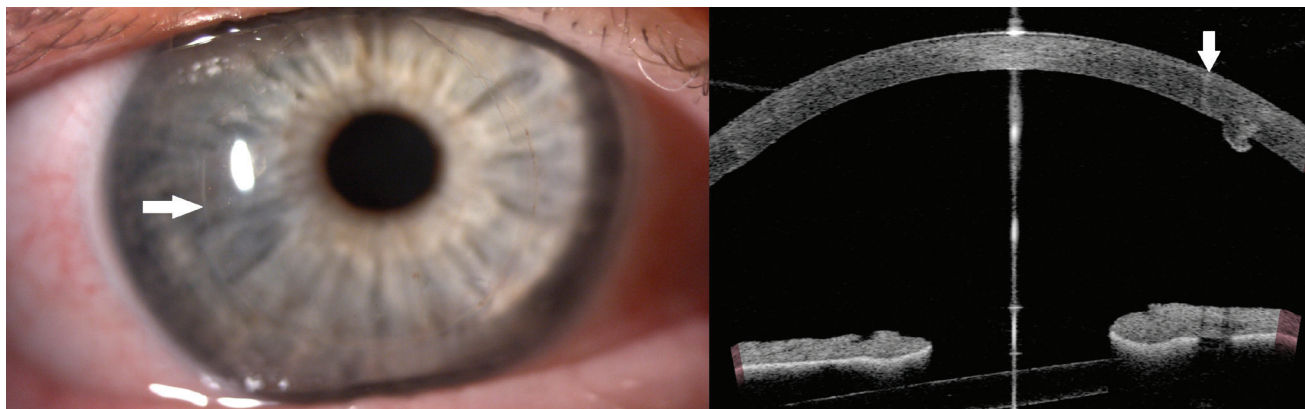
A cornealis infekciók okozta szaruhártya-folyamatok követésére ugyancsak alkalmas az OCT-technológia. *Konstantopoulos és mtsai* 7 keratitiszes betegen követték a cornea vastagságát és az infiltrátum kiterjedését a stromában. A beszűrődés és a körülötte lévő vizenyő csökkenése objektíven mérhető volt. Emellett hámszáj, Descemet-redők, retrocornealis gyulladásos felrakódások, elülső csarnoki gyulladásos sejtek, valamint a hegesedés is megfigyelhető volt a felvételeiken [18]. Az *Acanthamoeba* okozta keratitis egyik korai jelét, a radiális keratoneuritist is sikerült OCT-vel vizualizálni [19]. Ezenkívül a nem fertőző, immunpatológiai eredetű szaruhártya-gyulladások (perifériás ulceratív keratitis, Mooren-corneafekély) OCT-vizsgálata is többetinformációt nyújt a klinikus számára, ilyen például a gyulladás okozta infiltrátum kiterjedése és helyzete, valamint a szaruhártya következményes elvékonyodásának mértéke [20].

OCT szaruhártyaműtétek után

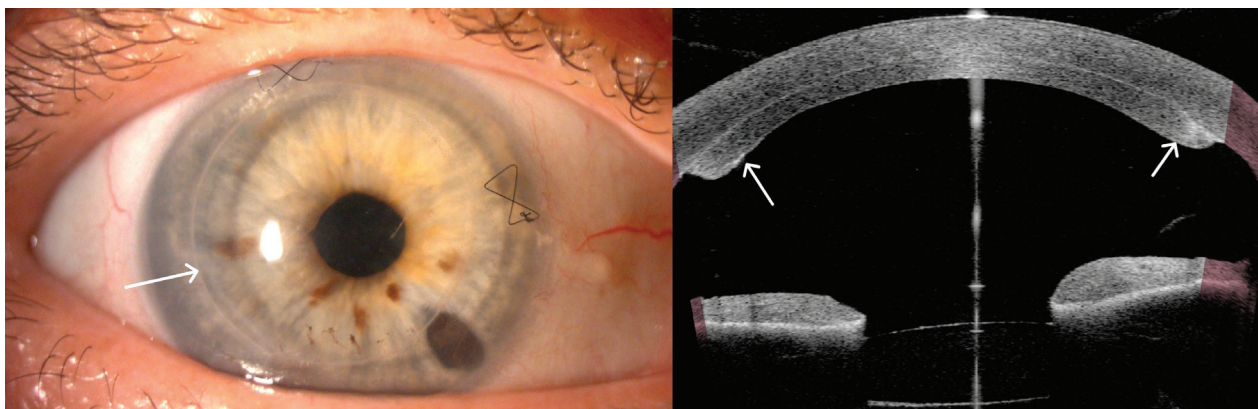
A szaruhártya-átültetés különböző technikáiban az OCT mind a preoperatív diagnosztikában, mind a posztoperatív betegkövetésben hasznos eszköz, segítségével a csökkent transzparenciájú területek, a transzplantátum



6. ábra | Cornealis infekció réslámpás felvétele centrális infiltrátummal (nyíl), felette stromalis homállal (balra). Az optikai koherencia-tomográfias képen a stromalis oedema (függőleges nyíl) mellett az infiltrátum kiterjedése, mélysége (vastag nyíl) is megítélhető



7. ábra | Perforáló keratoplasztika utáni állapot. A donor–recipiens határon körkörösén vékony hegvonal látható (nyíl), mely az optikai koherencia-tomográfias keresztmetszeti képen függőleges vonalként ábrázolódik (nyíl)



8. ábra | Hátsó lamelláris szaruhártya-átültetésen (DSAEK) átesett beteg réslámpás képe (balra). A cornea hátsó felszínén a donorlamella körvonala látszik (nyíl), 5 óránál iridectomiás nyílás, valamint 11 és 3 óránál varratok figyelhetők meg. A jobb oldali optika koherencia-tomográfias képen a teljes felületével a hátsó stromára tapadó donorlamella látható (nyílak)

illeszkedése, vastagsága is jól megítélhető (7. ábra). Megbízhatóbb numerikus adatokat (keratometria, elülső és hátsó felszíni törőerő, pachymetria, elülsőcsarnokmélység) szolgáltat *perforáló keratoplasztika* után a Scheimpflug-képalkotáson alapuló (Pentacam) tomográfiahoz képest [21]. Ezenkívül a rekonstruált kép kvalitatív vizsgálata is sok információt nyújt a klinikus számára. Az elmúlt évtizedben hazánkban is elérhetővé vált a *lamelláris keratoplasztika*, mely új távlatokat nyitott a szaruhártyakórkepek korszerű terápiajában [22]. A *mély elülső lamelláris keratoplasztika* (deep anterior lamellar keratoplasty, DALK) után előfordulhat a recipiens Descemet-membrán szakadása, ezáltal az átültetett stroma alá csarnokvíz kerülhet. Az így kialakuló korai posztoperatív komplikáció a dupla elülső csarnok, melynek jelenléte jól igazolható OCT-felvételeken. *Hátsó lamelláris keratoplasztikák* után (DSAEK – Descemet’s stripping automated endothelial keratoplasty, DMEK – Descemet’s membrane endothelial keratoplasty) a hátsó lamella megfelelő illeszkedése, helyzete is vizsgálható (8. ábra). A donorlamella esetleges leválása – ami a korai posztoperatív szak leggyakoribb komplikációja – még oedemás szaruhártyán keresztül is jól megítélhető OCT segítségével [23]. DMEK után egy órával és egy héttel a graftleválás mértéke és ennek időbeli változása prognosztikus értékkel rendelkezik *Yeh és mtsai* megfigyelései alapján [24]. Azok a donorlamellák, amelyek teljes felszínükkel illeszkedtek, vagy egyharmadnál kisebb területen váltak le, változatlan vagy javuló illeszkedést mutattak, rendre 73, 82, 86 és 90%-ban a beavatkozás után 1 héttel, illetve 1, 3 és 6 hónappal. Tehát további beavatkozás (ismételt levegőfeltöltés, „re-bubbling”) nélküli spontán javulás várható a beavatkozáson átesettek egy jól definiált csoportjában. A donorlamella és a szaruhártya teljes vastagságának sorozatos mérése pedig az oedema csökkenése révén az endothelium funkciójáról ad tájékoztatást. *Keratoprotézis beültetése* után az OCT nemcsak a protézis szélének háborítását, szemfelszínhez való viszonyát, hanem a stromaágy és a protézis illeszkedését, esetleges hézagok jelenlétét is feltárhatja. Ezeknek mind fontos

szerepük lehet az implantátum tartós megtapadásában, illetve esetleges infekciók kialakulásában [25].

Az OCT tehát olyan részletek vizsgálatát teszi lehetővé és időben folyamatosan követhetővé, amelyek réslámpával nem lennének kimutathatók.

OCT a szürkehályog-sebészetben

Bizonyos OCT-készülékek képesek a szemgolyó tengelyhosszát is megmérni, így segítségükkel a beültetendő intraocularis műlencse dioptriája is meghatározható (9. ábra). Az OCT-nek a szürkehályog-sebészetben való hasznosíthatósága nem merül ki ebben. A lencse részei nagy felbontásban ítélték meg a preoperatív időszakban, még akkor is, amikor a lencse transzparenciája nagymértékben csökkent. Egyrészt tokon belüli folyamatok – mint a lencseállomány strukturális elváltozásai (például annak elfolyósodása) –, másrészt a tok integritása válik láthatóvá. Egyes, nagyobb szövődményráttával társuló esetekben (traumás eredet, túlrett cataracta) a műtét gondosabb megtervezésében, a megfelelő műtéttechnika és a legideálisabb műlencse kiválasztásában segítheti az operatórt [26].

OCT a glaucoma diagnosztikájában

A csarnokzug megítélésének „gold standardja” a goni-oszkópia, amely kontaktvizsgálat. A csarnokzug nyitott vagy zárt voltát a látható anatómiai képletei alapján ítélik meg. Az elülsőszegmentum-OCT a keresztmetszeti képeivel nonkontakt módon és részletgazdagon jeleníti meg nemcsak a csarnokzugot, hanem a teljes elülső csarnokot, így ennek hátsó határát is, melyet a lencse és az iris elülső felszíne alkot (10. ábra). A felvételekről leolvasható a csarnok mélysége, keresztmetszetének területe. Továbbá a csarnokzug jellemezhető a szaruhártya hátsó felszínének meghatározott helye és az iris közötti távolsággal (angle opening distance – AOD) és a keresztmetszeti képekből számított területek nagyságával (angle

OD 05/03/2024 at 13:58:24

Eye status: No surgery, Phakic, Vitreous only

Target refraction: 0.00 D IOL database: head

OS 05/03/2024 at 13:56:56

Eye status: No surgery, Phakic, Vitreous only

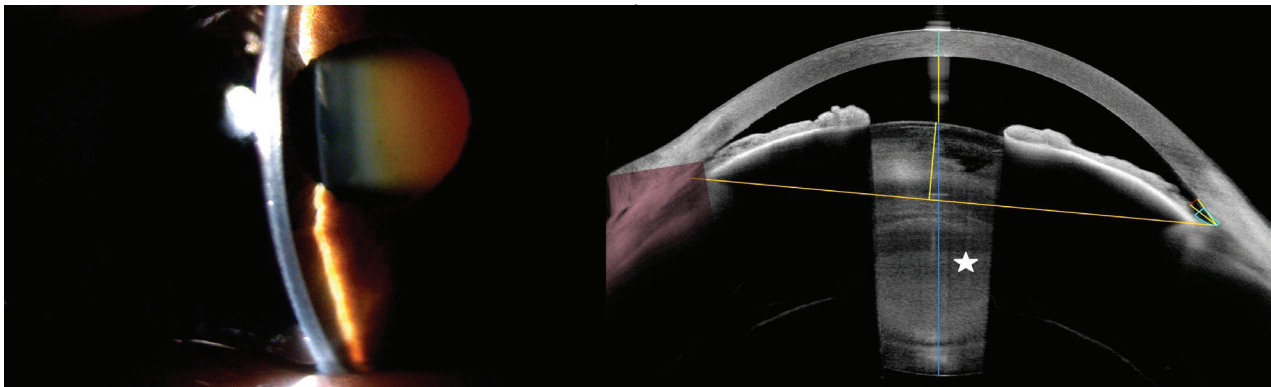
Target refraction: 0.00 D IOL database: head

| IOL power SE | Residual refraction | IOL power SE | Residual refraction | IOL power SE | Residual refraction | IOL power SE | Residual refraction |
|--------------|---------------------|--------------|---------------------|--------------|---------------------|--------------|---------------------|
| 20.00 | -0.52 | 20.00 | -0.72 | 25.00 | -0.63 | 25.00 | -0.91 |
| 19.50 | -0.17 | 19.50 | -0.37 | 24.50 | -0.26 | 24.50 | -0.53 |
| 19.00 | 0.17 | 19.00 | -0.02 | 24.00 | 0.10 | 24.00 | -0.16 |
| 18.50 | 0.50 | 18.50 | 0.32 | 23.50 | 0.46 | 23.50 | 0.21 |
| 18.00 | 0.83 | 18.00 | 0.66 | 23.00 | 0.82 | 23.00 | 0.57 |

| IOL power SE | Residual refraction | IOL power SE | Residual refraction | IOL power SE | Residual refraction | IOL power SE | Residual refraction |
|--------------|---------------------|--------------|---------------------|--------------|---------------------|--------------|---------------------|
| 20.50 | -0.80 | 20.50 | -0.60 | 25.50 | -0.92 | 25.50 | -0.64 |
| 20.00 | -0.46 | 20.00 | -0.26 | 25.00 | -0.55 | 25.00 | -0.28 |
| 19.50 | -0.11 | 19.50 | 0.08 | 24.50 | -0.18 | 24.50 | 0.08 |
| 19.00 | 0.22 | 19.00 | 0.41 | 24.00 | 0.18 | 24.00 | 0.44 |
| 18.50 | 0.56 | 18.50 | 0.74 | 23.50 | 0.54 | 23.50 | 0.79 |

| | Premium IOL | OS | OD - OS Difference |
|---|----------------|-----------------|--------------------|
| Anterior axial curvature (simulated) | | | |
| nk = 1.3375; 3 mm ring | | | |
| SimK mean | 43.61 D | 43.69 D | -0.08 D |
| SimK (steep) | 46.18 D @ 170° | 44.33 D @ 102° | |
| SimK (flat) | 41.32 D @ 80° | 43.06 D @ 12° | |
| Astigmatism (steep) | 4.86 D @ 170° | 1.27 D @ 102° | 3.59 D |
| Astigmatism (Steep) | | | |
| nc = 1.376; nah=1.336; 3 mm ring | | | |
| Astigm. (total) | 4.74 D @ 170° | 1.04 D @ 106° | |
| Astigm. (posterior) | -0.85 D @ 175° | -0.44 D @ 93° | |
| Δ Ast. (anterior - total) | 0.12 D @ 1° | 0.23 D @ -4° | |
| Total corneal wavefront | | | |
| 5 mm zone, pupil-centered | | | |
| Z ² Spherical aberration | 0.15 μm | n/a | n/a |
| RMS HOA | 1.19 μm | n/a μm | n/a μm |
| Pachymetry | | | |
| CCT (vertex) | 636 μm | 573 μm | 63 μm |
| Anterior segment | | | |
| AQD | 5.02 mm | 3.08 mm | 1.94 mm |
| CCT + AQD | 5.66 mm | 3.65 mm | 2.01 mm |
| Lens thickness | n/a | 3.50 mm | n/a |
| Pupil & WTW | | | |
| ○ Pupil diameter | 7.7 mm | 4.4 mm | 3.3 mm |
| ◇ Pupil center | 1.27 mm (@ 1°) | 0.15 mm (@ 13°) | |
| ◇ Pupil center x/y | 1.27/0.02 mm | 0.15/0.03 mm | |
| WTW | 11.60 mm | 12.14 mm | |
| Axial length | | | |
| Length | 24.25±0.02 mm | 22.60±0.00 mm | 1.65 mm |

9. ábra SS-OCT ('swept-source' optikai koherencia-tomográfia) segítségével végzett műlencsetervezés (biometria) regisztrátuma. A szem fontosabb adatai (keratometria, elülsőcsarnok-mélység, tengelyhossz) alapján elvégzett szoftveres kalkuláció után az operátor több műlencsetípusból választhat

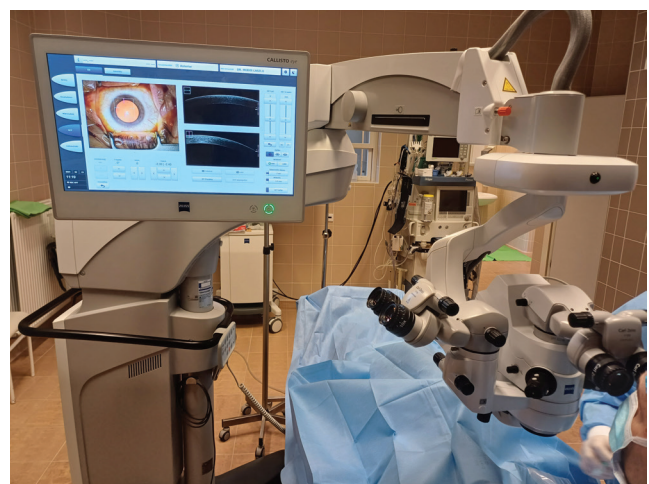


10. ábra Glaucomás roham utáni állapot, duzzadó, barna magvú cataractás szemlencsével, sekély elülső csarnokkal (réslámpás felvétel, balra). Az optikai koherencia-tomográfias képen jól megfigyelhető az előrehelyezett iris, amit a vastos, duzzadó szemlencse (csillag) okoz. A csarnokzug résnyi (zöld és sárga háromszög)

recess area – ARA, trabecular iris space area – TISA). Az OCT segíthet a zárt csarnokzug etiológiájának megállapításában és az ezt követő beavatkozások (lézeres glaucomaműtétek, valamint a korai szürke hályog műtéte) utáni változások követésében [27].

OCT az elülső uveális daganatok vizsgálatában

Bár az OCT szerepe a nonkontakt volta, részletgazdagsága, gyorsasága miatt vitathatatlan az iris és a corpus ciliare tumorainak vizsgálatában, a módszer korlátozó tényezői is ismertek. Az infravörös fényt a pigmentált, nem transzparens rétegek nem engedik át, így az iris hátsó felszínén és a corpus ciliarén lévő daganatok, valamint a felszínebb elhelyezkedő tumorok hátsó határai nem megfelelően vizsgálhatók. Ezért az elülső szegmen-tum daganatainak vizsgálatában inkább az ultrahang-biomikroszkópia terjedt el, amely a tumoros laesiókat



11. ábra Intraoperatív optikai koherencia-tomográfia használat közben. A készülék valós idejű, mikrométeres felbontású képekkel segíti az operátort szemfelszíni és szaruhártyaműtétek végzésében egyaránt. A képernyőn a cornea hossz- és keresztmetszeti optikai koherencia-tomográfias felvétele látható

jobban vizualizálja az OCT-hez képest [28]. Ugyanakkor az ultrahang-biomikroszkópia kontaktelven működő technológia, a vizsgálati idő sokkal hosszabb, és elvégzése, értékelése nagy gyakorlatot igényel.

Elülsőszegetum-OCT-angiográfia

Egyes OCT-készülékek az elülső szegetum angiográfias vizsgálatára is képesek. Ez noninvaszív módon, kontrasztanyag beadása nélkül történik, a hagyományos angiográfias vizsgálatokkal ellentétben. Így kockázat nélkül, tetszőleges alkalommal ismételhető. Az elülső szegetum ereinek egy része megítélhető réslámpás vizsgálat, de az angiográfias vizsgálat a kisebb és a mélyebben elhelyezkedő ereket is vizualizálja. Ez az új technika egyelőre nem terjedt el a klinikai gyakorlatban, de a későbbiekben számos területen adhat többletinformációt a klinikus számára. Többek között például megítélhető kémiai sérülések esetén a limbalis ischaemia kiterjedése, a kóros, csökkent transzparenciájú szaruhártya erezettsége, valamint az iris rubeosis pontos mértéke [29].

Intraoperatív elülsőszegetum-OCT

Az elülső szegetum műtétei közben kiegészítésképpen intraoperatív OCT (iOCT)-vizsgálatot végezhetünk. A nagy felbontású, részletgazdag iOCT-képek már a korszerű vitreoretinalis sebészetben is bizonyították hasznosságukat [30]. A manapság használatos iOCT-készülékek már be vannak építve az operálómikroszkópokba (11. ábra). Az így készült felvétel a szöveteket és az éppen használt műszer okozta változásokat mutatja, és még a műtét közben segítheti az operatórt a beavatkozás további lépéseinek tervezésében. Jelenleg a legelterjedtebb felhasználási területe lamelláris szaruhártya-átültetések esetén a transzplantátum helyzetének, a recipiens szövetrel érintkező felszínének megítélésében van, különösen akkor, amikor a szaruhártya transzparenciája csökkent [31].

Következtetés

Összegezve megállapítható, hogy az elülsőszegetum-OCT-technológia és -képalkotás az elmúlt évtizedekben jelentős fejlődésen ment keresztül. A korábbi 'time-domain' rendszerű OCT-eket a nagyobb felbontásra képes, részletgazdagabb képet nyújtó 'spectral-domain' és 'swept-source' típusok váltották fel. Az elülsőszegetum-OCT alkalmazható a szemfelszín, a cornealis homályok, degenerációk, dystrophiák nagy felbontású vizsgálatára, ezért segítségével a korai keratoconus is kiszűrhető. Kiválóan használható szaruhártyaműtétek utáni követésre, de a glaucoma diagnosztikájában, a műlencsetervezésben is pontos, megbízható technológia. Legújabb felhasználási területe az intraoperatív, valamint

az angio-OCT. Az elülsőszegetum-OCT ma már a réslámpás vizsgálat nélkülözhetetlen, kiegészítő diagnosztikus módszere.

Anyagi támogatás: A közlemény megírása nem részesült anyagi támogatásban.

Szerzői munkamegosztás: M. L. és L. M. Á. a kézirat elkészítésének minden fázisában egyaránt részt vett. A közlemény végleges változatát mindkét szerző elolvas-ta és jóváhagyta.

Érdekeltségek: A szerzőknek nincsenek érdekeltségeik.

Irodalom

- [1] Németh G, Módis L, Kolozsvári B, et al. Anterior segment optical coherence tomography in ophthalmology. [Elülső szegetum optikai koherencia tomográf alkalmazása a szemészetben.] Szemészet 2009; 146: 53–58. [Hungarian]
- [2] Szalai E, Berta A, Módis L. Evaluation of a novel technique for imaging of the anterior segment: Fourier domain OCT. [Új képalkotó módszer az elülső szegetum vizsgálatában: Fourier domain OCT.] Szemészet 2011; 148: 85–92. [Hungarian]
- [3] Hopp B, Kemény L, Smausz Kolombán T, et al. Lasers in medicine. Optical coherence tomography. [Lézerek az orvostudományban. Az optikai koherencia tomográfia.] Available from: https://titan.physx.u-szeged.hu/tamop411c/public_html/Lezerek_az_orvostudományban/841_az_optikai_koherencia_tomografia.html [accessed: 20 April, 2024]. [Hungarian]
- [4] Shan J, DeBoer C, Xu BY. Anterior segment optical coherence tomography: applications for clinical care and scientific research. Asia Pac J Ophthalmol. 2019; 8: 146–157.
- [5] Huang D, Swanson EA, Lin CP, et al. Optical coherence tomography. Science 1991; 254: 1178–1181.
- [6] Izatt JA, Hee MR, Swanson EA, et al. Micrometer-scale resolution imaging of the anterior eye in vivo with optical coherence tomography. Arch Ophthalmol. 1994; 112: 1584–1589.
- [7] Wolffsohn JS, Arita R, Chalmers R, et al. TFOS DEWS II. Diagnostic Methodology report. Ocul Surf. 2017; 15: 539–574.
- [8] Nanji AA, Sayyad FE, Galor A, et al. High-resolution optical coherence tomography as an adjunctive tool in the diagnosis of corneal and conjunctival pathology. Ocul Surf. 2015; 13: 226–235.
- [9] Füst Á, Tóth J, Imre L, et al. Non-malignant conjunctival epithelial masses with ocular surface squamous neoplasia-like optical coherence tomography features. Int Ophthalmol. 2021; 41: 1827–1834.
- [10] Venkateswaran N, Sripawadkul W, Karp CL. The role of imaging technologies for ocular surface tumors. Curr Opin Ophthalmol. 2021; 32: 369–378.
- [11] Abdelazeem K, Sharaf M, Saleh MG, et al. Relevance of swept-source anterior segment optical coherence tomography for corneal imaging in patients with flap-related complications after LASIK. Cornea 2019; 38: 93–97.
- [12] Kim T, Kim SJ, Lee BY, et al. Development of an implantable collamer lens sizing model: a retrospective study using ANTERION swept-source optical coherence tomography and a literature review. BMC Ophthalmol. 2023; 23: 59.
- [13] Módis L, Szalai E, Takács L, et al. Diagnosis and treatment of keratoconus. [A keratoconus diagnosztikája és kezelése.] Szemészet 2015; 152: 34–51. [Hungarian]

- [14] Ramos JL, Li Y, Huang D. Clinical and research applications of anterior segment optical coherence tomography – a review. *Clin Exp Ophthalmol.* 2009; 37: 81–89.
- [15] Temstet C, Sandali O, Bouheraoua N, et al. Corneal epithelial thickness mapping using Fourier-domain optical coherence tomography for detection of form fruste keratoconus. *J Cataract Refract Surg.* 2015; 41: 812–820.
- [16] Lu NJ, Hafezi F, Koppen C, et al. New keratoconus staging system based on OCT. *J Cataract Refract Surg.* 2023; 49: 1098–1105.
- [17] Vincent SJ, Alonso-Caneiro D, Collins MJ. Optical coherence tomography and scleral contact lenses: clinical and research applications. *Clin Exp Optom.* 2019; 102: 224–241.
- [18] Konstantopoulos A, Kuo J, Anderson D, et al. Assessment of the use of anterior segment optical coherence tomography in microbial keratitis. *Am J Ophthalmol.* 2008; 146: 534–542.
- [19] Yamazaki N, Kobayashi A, Yokogawa H, et al. In vivo imaging of radial keratoneuritis in patients with *Acanthamoeba* keratitis by anterior-segment optical coherence tomography. *Ophthalmology* 2014; 121: 2153–2158.
- [20] Módis L, Süveges I. Allergic and immunopathological diseases of the ocular surface. [A szemfelszín allergiás és immunpatológiai betegségei.] *Orv Hetil.* 2023; 164: 1686–1692. [Hungarian]
- [21] Szalai E, Németh G, Hassan Z, et al. Noncontact evaluation of corneal grafts: swept-source fourier domain OCT versus high-resolution scheimpflug imaging. *Cornea* 2017; 36: 434–439.
- [22] Módis L, Lukács M, Makhoul S. Corneal transplantation at the beginning of the 21th century. [Szaruhártya-átültetés a 21. század elején.] *Orv Hetil.* 2023; 164: 1087–1093. [Hungarian]
- [23] Lim LS, Aung HT, Aung T, et al. Corneal imaging with anterior segment optical coherence tomography for lamellar keratoplasty procedures. *Am J Ophthalmol.* 2008; 145: 81–90.
- [24] Yeh RY, Quilendrino R, Musa FU, et al. Predictive value of optical coherence tomography in graft attachment after Descemet's membrane endothelial keratoplasty. *Ophthalmology* 2013; 120: 240–245.
- [25] Imre L, Filkorn T, Fuchs A, et al. Analysis of the position of keratoprosthetics Konstantinov-type with help of anterior segment optical coherence tomography. [Konstantinov-típusú keratoprotézisek helyzetének vizsgálata elülső szegment OCT segítségével.] *Szemészet* 2016; 153: 21–26. [Hungarian]
- [26] Pujari A, Sharma N. The emerging role of anterior segment optical coherence tomography in cataract surgery: current role and future perspectives. *Clin Ophthalmol.* 2021; 15: 389–401.
- [27] Triolo G, Barboni P, Savini G, et al. The use of anterior-segment optical-coherence tomography for the assessment of the iridocorneal angle and its alterations: update and current evidence. *J Clin Med.* 2021; 10: 231.
- [28] Medina CA, Plessec T, Singh AD. Optical coherence tomography imaging of ocular and periocular tumours. *Br J Ophthalmol.* 2014; 98(Suppl 2): ii40–ii46.
- [29] Wen Y, Jiang D, Tang K, et al. Current clinical applications of anterior segment optical coherence tomography angiography: a review. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol.* 2023; 261: 2729–2741.
- [30] Bokor Á, Makhoul S, Pásztor O, et al. Autologous neurosensory retinal transplantation [Autológ neuroszenzoros retinatranszplantáció.] *Orv Hetil.* 2023; 164: 1511–1517. [Hungarian]
- [31] Han SB, Liu YC, Mohamed-Noriega K, et al. Application of intraoperative optical coherence tomography technology in anterior segment surgery. *J Ophthalmol.* 2022; 2022: 1568406.

(Módis László dr.,
 Debrecen, Nagyerdei krt. 98., 4032
 e-mail: modis.laszlo@med.unideb.hu)

„*Donec eris felix, multos numerabis amicos,
 tempora si fuerint nubila, solus eris.*” (Horatius)
 (Míg a szerencse rád ragyog, sok lesz a barátod,
 hogyha eged felhős, állasz a viharban magad.)