Természet Világa

TERMÉSZETTUDOMÁNYI KÖZLÖNY • 130. évf. 4. sz. • 1999. ÁPRILIS ÁRA: 220 Ft

GÁL JÓZSEF – HORVÁTH GÁBOR – EUAN N. K. CLARKSON – HAIMAN OTTÓ

Bifokális szemek és szemüvegek

A trilobiták szemétől a szemlencseprotézisig

A bifokális (kétfókuszú) szemüveget Benjamin Franklin (1706–1790), a híres amerikai tudós találta fel 1784-ben. Köztudott, hogy számos példáját ismerjük az olyan, az emberi igények kielégítésére tervezett optikai képalkotó rendszereknek, amelyek bizonyos mértékben utánozzák egyes állatok látórendszerét (pl. a napenergia- gyűjtők/sűrítők, az optikai információt gyűjtő és továbbító távközlési berendezések, a fényenergiát átalakító fotodetektorok, a fotokémiai molekuláris számítógépek, vagy a látási elégtelenségekkel rendelkezők számára kifejlesztett optikai/vizuális protézisek), de a bifokális szemüvegek és kontaktlencsék egészen napjainkig nem tartoztak ebbe a körbe.

A legújabb kutatások szerint azonban kiderült, hogy léteztek olyan állati szemek, amelyekben bifokális lencsék fordultak elő, s amelyek bizonyos mértékben a Franklin-féle kétfókuszú szemüvegre emlékeztetnek. Ilyen ritkaságszámba menő szeme volt két olyan ősi ízeltlábúnak, a Neocobboldia chinlinica *és a* Dalmanitina socialis *nevű háromkaréjos ősráknak (trilobitának), amely már több száz millió évvel ezelőtt kihalt. Ez a felismerés az állati látáskutatásban azért számít jelentős felfedezésnek, mert bifokális szemlencsékkel történő képalkotás az ismert, fosszilis, illetve recens állati szemek egyikében sem fordul elő.*

Cikkünkben először a bifokális szemlencséjű trilobiták látási mechanizmusát mutatjuk be, majd áttekintjük azon állati szemeket, amelyek bizonyos fokig ezen ősi szemekhez voltak hasonlóak, végül pedig az ember alkotta kétfókuszú szemüvegekről és kontaktlencsékről szólunk röviden. Érdekes, hogy az egyes trilobiták által már több száz millió évvel ezelőtt kifejlesztett bifokális képalkotás módszerét – amely amúgy a biológiai evolúció süllyesztőjébe került volna a háromkaréjos ősrákok teljes kipusztulása miatt – az ember éppen napjainkban élesztette újjá a kétfókuszú szemlencseprotézisek formájában.

Természet Világa

ALAPÍTVA 1869

A TUDOMÁNYOS ISMERETTERJESZTŐ TÁRSULAT ÉS A MAGYAR HIVATALOS KÖZLÖNYKIADÓ FOLYÓIRATA

Megindította 1869-ben SZILY KÁLMÁN

A TERMÉSZETTUDOMÁNYI KÖZLÖNY 130. ÉVFOLYAMA

1999. 4. sz. április

GÁL JÓZSEF – HORVÁTH GÁBOR – EUAN N. K. CLARKSON – HAIMAN OTTÓ

Bifokális szemek és szemüvegek

A trilobiták szemétől a szemlencseprotézisig

Első rész

A bifokális (kétfókuszú) szemüveget Benjamin Franklin (1706–1790), a híres amerikai tudós találta fel 1784-ben. Köztudott, hogy számos példáját ismerjük az olyan, az emberi igények kielégítésére tervezett optikai képalkotó rendszereknek, amelyek bizonyos mértékben utánozzák egyes állatok látórendszerét (pl. a napenergia- gyűjtők/sűrítők, az optikai információt gyűjtő és továbbító távközlési berendezések, a fényenergiát átalakító fotodetektorok, a fotokémiai molekuláris számítógépek, vagy a látási elégtelenségekkel rendelkezők számára kifejlesztett optikai/vizuális protézisek), de a bifokális szemüvegek és kontaktlencsék egészen napjainkig nem tartoztak ebbe a körbe.

A legújabb kutatások szerint azonban kiderült, hogy léteztek olyan állati szemek, amelyekben bifokális lencsék fordultak elő, s amelyek bizonyos mértékben a Franklin-féle kétfókuszú szemüvegre emlékeztetnek. Ilyen ritkaságszámba menő szeme volt két olyan ősi ízeltlábúnak, a Neocobboldia chinlinica *és a* Dalmanitina socialis *nevű háromkaréjos ősráknak (trilobitának), amely már több száz millió évvel ezelőtt kihalt. Ez a felismerés az állati látáskutatásban azért számít jelentős felfedezésnek, mert bifokális szemlencsékkel történő képalkotás az ismert, fosszilis, illetve recens állati szemek egyikében sem fordul elő.*

Cikkünkben először a bifokális szemlencséjű trilobiták látási mechanizmusát mutatjuk be, majd áttekintjük azon állati szemeket, amelyek bizonyos fokig ezen ősi szemekhez voltak hasonlóak, végül pedig az ember alkotta kétfókuszú szemüvegekről és kontaktlencsékről szólunk röviden. Érdekes, hogy az egyes trilobiták által már több száz millió évvel ezelőtt kifejlesztett bifokális képalkotás módszerét – amely amúgy a biológiai evolúció süllyesztőjébe került volna a háromkaréjos ősrákok teljes kipusztulása miatt – az ember éppen napjainkban élesztette újjá a kétfókuszú szemlencseprotézisek formájában.

Trilobita-szemek

A legelső háromkaréjos ősrákok (trilobiták) alsó-kambriumi (kb. 550 millió évvel ezelőtti) megjelenésükkor már viszonylag magasan szervezett, a tengerek vizében élő állatok voltak, és összetett szemekkel rendelkeztek. A fosszilizáció során a trilobiták szeméből csak a kalcitlencsék és a levedlett páncél szemek körüli részei maradtak fenn; a lencsék alatti képletek szerkezetéről szinte semmit sem tudunk. Szemük szerkezete alapján a trilobiták három csoportra oszthatók: holochroális, schizochroális és abathochroális szemtípust különböztetünk meg.

Holochroális szemmel rendelkezett a korai, alsó-kambriumi trilobiták mindegyike, és ez a szemtípus a csoport egész története alatt megmaradt. A holochroális szem tekinthető a legkezdetlegesebbnek, legősibbnek; belőle fejlődtek ki a későbbi szemtípusok. A holochroális szemben a lencsék viszonylag kis méretűek voltak; nagy számban (olykor több ezren), szorosan egymáshoz érve helyezkedtek el, és kalcit egykristályból álltak, amelyek kristálytani c-tengelye merőleges volt a látófelületre. Ily módon elkerülhetővé vált a kalcit kettős töréséből eredő kettős képalkotás, hiszen a kalcit a c-tengelye mentén nem kettőstörő. A holochroális szemű trilobiták valószínűleg éjszakai életmódot folytattak: nappal a mélyebb, alacsonyabb fényintenzitású vízben tartózkodhattak, éjszaka viszont a tengerfelszínig merészkedhettek.

A *schizochroális* szem a trilobiták egyetlen csoportjában fordult csak elő, az ordovíciumtól a devon időszakig létező *Phacopida* alrendben. Külső megjelenésében a kifejlett schizochroális szem az egymástól jól elkülönülő, nagyméretű és viszonylag kisszámú (legföljebb néhány száz), kör alakú lencsékkel jellemezhető. Ezek a lencsék két különböző, homogén törésmutatójú egységből álltak. Az ilyen kéttagú lencsék mentesek voltak az optikában gömbi hibának nevezett leképezési hibától (azaz attól, hogy zónánként változó a lencsék fókusza) a két lencsetag közötti hullámos válaszfelületnek köszönhetően. Mindegyik lencse saját szaruhártyával (corneával) rendelkezett. A *Phacopida* alrendbe tartozó trilobiták szemében a lencsék háti-hasi irányú oszlopokba rendezetten helyezkedtek el az oldalra néző, görbült látófelszínen. A kettős lencsék kalcitból álló fölső tagjának az optikai tengelye, a kristálytani c-tengely a látófelületre merőleges volt a kettős törés hatásának csökkentése érdekében. A schizochroális szem minden valószínűség szerint a holochroális szemből fejlődött ki. A *Phacopida* trilobiták a tengeraljzaton élhettek, viszonylag zavaros, fényszegény környezetben, vagy éjszaka aktív állatok lehettek.

A harmadik típus az ún. *abathochroális* trilobita-szem, a holochroális és a schizochroális szemek közötti átmenetnek tekinthető. Ezt a szemet először az Ausztráliában megtalált közép-kambriumi *Pagetia* nevű trilobitában írták le. Ezek a szemek viszonylag kis számú (50-70), egymástól elkülönült bikonvex lencsékből álltak, elhelyezkedésük félig rendezett szerkezetet mutatott, azonban nem volt a lencsék között kutikuláris elválasztó réteg, mint a schizochroális trilobita-szemben. A Kínából származó *Neocobboldia chinlinica* alsó-kambriumi trilobitának ugyancsak abathochroális szeme volt. Ennél a trilobitánál vetődött fel a kérdés, hogy az abathochroális szem vajon ténylegesen egy különálló szemtípus-e, vagy egyszerűen egyfajta olyan schizochroális szem, amely kevésbé specializálódott, mint a *Phacopida* trilobiták szeme. Eddig nem vizsgálta még senki az abathochroális lencse szerkezetét és optikai tulajdonságait, illetve az abathochroális szemnek a trilobita-szemtípusok közé történő besorolása sem volt világos.

A trilobita-lencsék optikai sajátságainak paleobiooptikai rekonstrukciója

Kitöltendő ezt az űrt és megvilágítandó az abathochroális szem leképezési tulajdonságait, rekonstruáltuk a *Neocobboldia chinlinica* szemlencséinek az alakját és optikáját. Eközben fedeztük fel, hogy ez a trilobita bifokális szemlencsékkel rendelkezett az alsó lencsefelszín közepén található, jellegzetes, kis kidudorodásnak köszönhetően. Mivel az abathochroális lencsék nagyon kisméretűek voltak (az átmérőjük nem volt nagyobb, mint 20 μm, ezért a fényelhajlás lerontotta az optikai leképezési sajátságaikat. Átnéztük hát a trilobita-szemekről szóló szakirodalmat hasonló dudorral rendelkező szemlencsék után kutatva. Azt találtuk, hogy a *Dalmanitina socialis* trilobita schizochroális szemében a 330 μm átmérőjű, kéttagú kalcitlencsék fölső tagjának alsó felületén, amelyet korábban már Clarkson (1968),

Az 1998. évi cikkpályázatunk második díjas írása.

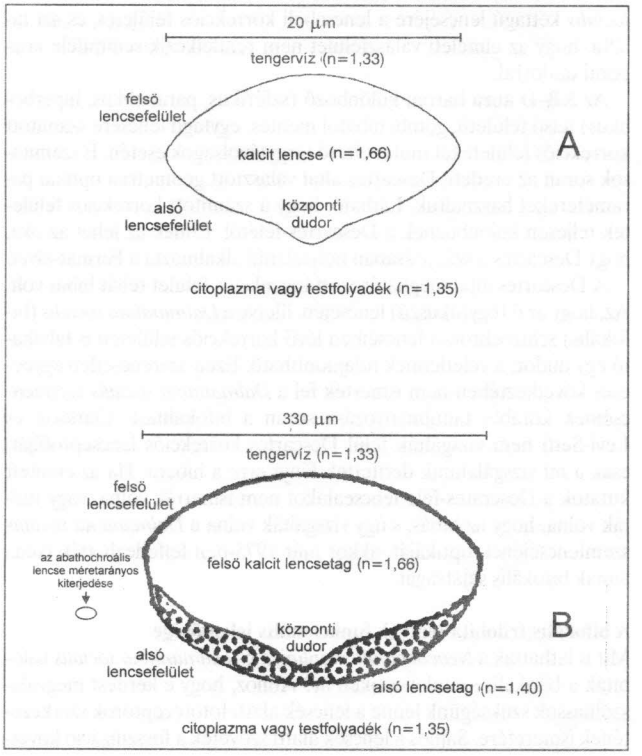
Clarkson és Levi-Setti (1975) valamint Levi-Setti (1993) részletesen leírt, szintén található egy ilyen központi dudor.

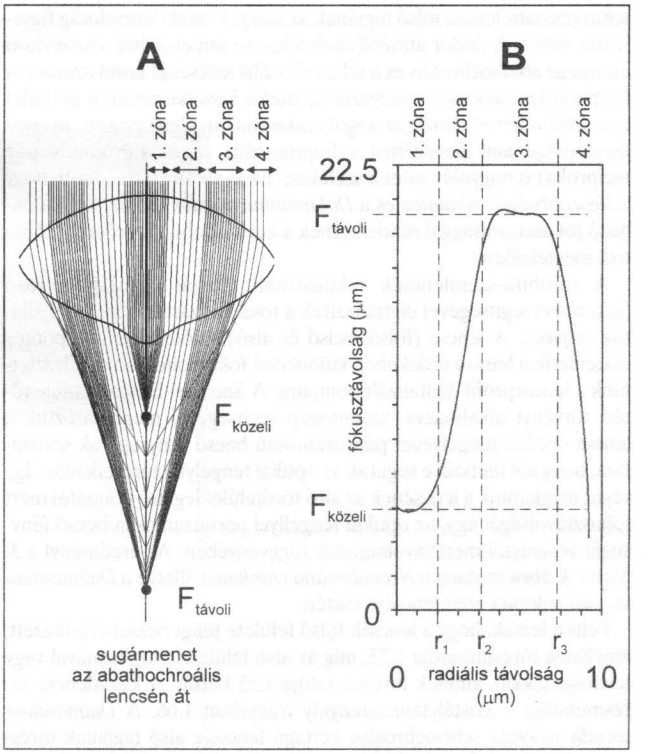
A viszonylag nagyméretű felső-ordoviciumi *Dalmanitina socialis* trilobitát Csehországban találták meg olyan finomszerkezetű homokkőben, amely megőrizte az állat vázának külső és belső felszínét; így a szemlencsék negatív lenyomata jól konzerválódott. Egyes maradványokban épen megmaradt a lencsék fölső felülete. Néhány lenyomat a lencsék alsó felületét őrizte meg (mivel a lencsék egészben kiestek), míg más lenyomatokban az alsó és fölső lencsetagot elválasztó hullámos felület maradt meg. Ez utóbbi esetben valószínűleg az állat halála után, de még a fosszilizáció előtt kieshetett a fölső lencsetag. Így tehát a kéttagú lencsék mindhárom törőfelületének pontos alakja megmaradt, és ezekből rekonstruálhatóak a trilobita-lencsék optikai tulajdonságai.

A trilobita-lencsék törőfelületeiről gumiszerűen megszilárduló latexoldat segítségével pozitív lenyomatot vettünk, majd néhányuk felületét arany-palládium réteggel vontuk be, és pásztázó elektronmikroszkóp segítségével nagy felbontású fényképet készítettünk. A gumilenyomatok másik részét a pontos lencse-keresztmetszet meghatározása érdekében felszeleteltük, és szintén pásztázó elektronmikroszkópos fotót készítettünk róluk. Így végül megkaptuk a *Dalmanitina socialis* trilobita schizochroális lencséinek pontos alakját.

Nehezebb dolgunk volt a *Neocobboldia chinlinica* abathochroális lencséi részletes szerkezetének rekonstrukciójával. Ennek a trilobitának a maradványai a dél-kínai *Szecsuán* területéről, alsó-kambriumi mészkőből származnak, és sok, nagyon kisméretű darabból állnak, amelyek ülepedés után a felületükön egy vékony foszfátréteggel vonódtak be. Ez a fajta konzerválódási folyamat igen ritka, de megszokott a dél-kínai alsó-kambriumi leletek esetén, mivel abban a környezetben akkor igen magas foszfátkoncentráció uralkodott. A tömény foszfát minden felületre, így az elpusztult ízeltlábúak külső és belső felületeire is (valószínűleg bakteriális folyamatok eredményeként) kicsapódott. A különálló trilobita-váz komponenseit 5%-os ecetsavoldattal tisztítottuk meg a mészkőtől, mely kezelés során feloldódott a lencse is, a foszfátváz azonban megőrizte a lencse eredeti alakját, pontosabban annak negatív lenyomatát. Az így előkészített mintákat pásztázó elektronmikroszkóppal és latexlenyomatok segítségével vizsgáltuk, és rekonstruáltuk a lencsék alakját a *Dalmanitina socialis*éhoz hasonlóan.

2. ábra. (A) A *Neocobboldia chinlinica* egytagú, abathochroális szemlencséjének rekonstruált keresztmetszeti profilja. A lencse alsó felületén jól látszik a központi dudor. (B) A *Dalmanitina socialis* kéttagú, schizochroális szemlencséjének rekonstruált keresztmetszeti alakja. A lencse fölső tagjának alsó felületén szintén látszik egy központi dudor. A bal oldali kis ellipszis méretei szemléltetik a *Neocobboldia* lencséjének a *Dalmanitináéhoz* viszonyított nagyságát.





3. ábra. A 2.A ábrán látható abathochroális trilobita-lencse zónák szerinti fókusztávolság-változásának számítógépes rekonstrukciója. (A) Az optikai tengellyel párhuzamosan beeső fénysugarak menete a lencse felületein való törés hatására. A sugarakat sűrűbben rajzoltuk a lencse azon régióiban (1. és 3. zóna), ahol a fókusztávolság közel állandó. Jól láthatóak az éles fókuszpontok az 1. és 3. zónában, valamint a fókuszpontok hiánya a 2. és 4. zónában. (B) A központi dudor alsó részétől mért fókusztávolság változása a beeső fénysugár optikai tengelytől mért távolságának függvényében. Az 1. és 3. zónák rendre az $F_{közeli}$ és $F_{távoli}$ fókuszpontokkal jellemezhetőek, míg a 2. és 4. zónában a fókusztávolság e két fókuszpont között folyamatosan változik. A legszélső 4. zónától eltekintve a lencse bifokális.

Az **1.A ábrán** (lásd hátsó belső borítólapunkon) a *Neocobboldia chinlinica* trilobita fosszilis maradványainak pásztázó elektronmikroszkóppal készült felvételei láthatóak különböző nagyítással. Az **1.B ábra** ugyanezt mutatja a *Dalmanitina socialis* trilobita esetén. A *Neocobboldia chinlinica* hiányzó szemlencséi illetve a *Dalmanitina socialis* hiányzó fölső lencsetagjai helyén jól látható a bifokalitásért felelős, jellegzetes, kis központi bemélyedés. A **2.A** és **2.B ábra** mutatja a *Neocobboldia chinlinica* és a *Dalmanitina socialis* szemlencséinek rekonstruált alakját. A fölső lencsefelületek a biológiai (és klasszikus optikai) lencséknél megszokott, domború profillal rendelkeznek, ellenben az abathochroális lencse alsó felületén jól látható a középen elhelyezkedő kidudorodás (2.A ábra), amely megfelel az 1.A ábra harmadik sorában látható gödröcskének, amit egy lencse hagyott maga után. Hasonló dudort figyelhetünk meg a schizochroális kéttagú lencse fölső lencsetagjának alsó felületén is (2.B ábra). Leolvasható a 2.B ábráról, hogy az abatchochroális lencse sokkal kisebb, mint a schizochroális: az egész abathochroális lencse kisebb, mint a schizochroális lencse központi dudora. Mindenesetre az abathochroális lencse és a

schizochroális lencse fölső tagjának az alakja közötti hasonlóság figyelemre méltó. A dudor átmérőjének a lencse átmérőjéhez viszonyított aránya az abathochroális és a schizochroális lencsénél közel azonos. A központi lencserészen elhelyezkedő dudor következtében a görbület és ezáltal a fénytörőerő (az angol szakirodalom „lens power" magyar megfelelője, ami lényegében a dioptriaszám, vagyis a gyújtótávolság reciproka) is nagyobb, mint a széleken. Ez kvalitatíve azt jelenti, hogy a *Neocobboldia chinlinica* és a *Dalmanitina socialis* lencséi két különböző fókusztávolsággal rendelkeznek a két különböző törőerejű zónának megfelelően.

A trilobita-szemlencsék rekonstruált alakját egy lapbeolvasó (szkenner) segítségével digitalizáltuk a további számítógépes vizsgálatok céljából. A lencse (fölső, belső és alsó) törőfelületeinek pontos matematikai leírása érdekében különböző fokú polinomokat illesztettünk a lencseprofil digitalizált pontjaira. A Snellius–Descartes-féle törési törvényt alkalmazva, számítógép segítségével meghatároztuk a lencse optikai tengelyével párhuzamosan beeső fénysugarak sorozatára, hogy hol metszik e sugarak az optikai tengelyt a töréseik után. Így végül megkaptuk a lencsének az alsó törőfelület legalsó pontjától mért fókusztávolságát egy, az optikai tengellyel párhuzamosan beeső fénysugár tengelytől mért távolságának függvényében. Az eredményt a **3.** illetve **4. ábra** mutatja a *Neocobboldia chinlinica,* illetve a *Dalmanitina socialis* trilobita szemlencséje esetén.

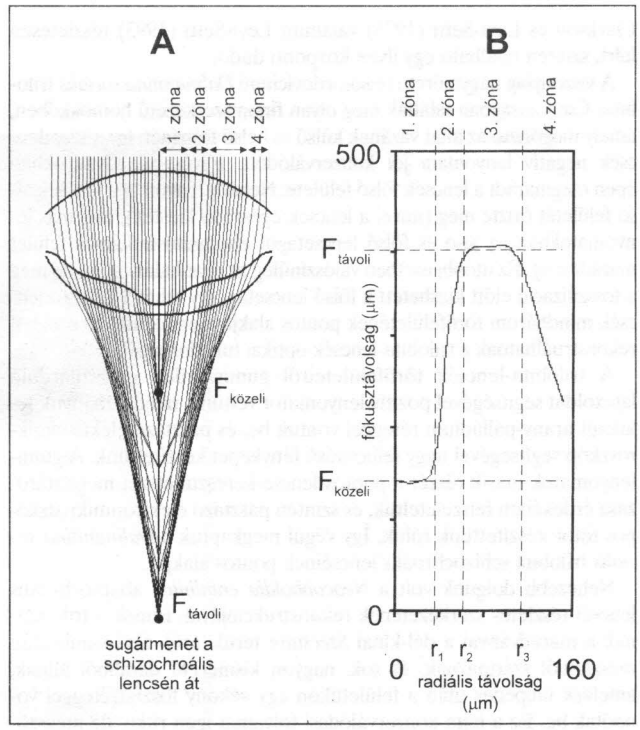
Feltételeztük, hogy a lencsék fölső felülete tengervízzel érintkezett, amelynek törésmutatója 1,33, míg az alsó felülete citoplazmával vagy testfolyadékkal, aminek törésmutatója 1,35 körüli. A kalcitlencse törésmutatója a kristálytani c-tengely irányában 1,66. A *Dalmanitina socialis* trilobita schizochroális, kéttagú lencséje alsó tagjának törésmutatója a korábbi paleobiooptikai vizsgálataink szerint 1,4 volt.

A 3.A és 4.A ábrán rendre a *Neocobboldia chinlinica* illetve a *Dalmanitina socialis* szemlencséjére számolt fénysugármeneteket ábrázoltuk, a 3.B és 4.B ábrákon pedig a két lencse fókusztávolság változása látható a beeső fénysugár optikai tengelytől mért távolságának függvényében. Ezekről az ábrákról leolvasható, hogy a lencsék 1. és 3. zónái egy-egy jól meghatározott, éles fókuszponttal jellemezhetőek (ezeket rendre $F_{közeli}$-vel, illetve $F_{távoli}$-val jelöljük a továbbiakban); ugyanakkor a 2. és 4. zónában a fókusz e kettő pont között folyamatosan változik. A 3. és 4. ábrák alapján megállapíthatjuk, hogy a legkülső lencserégió kivételével a *Neocobboldia chinlinica* és a *Dalmanitina socialis* lencséire teljesülnek a bifokalitás feltételei: két különálló, éles fókuszponttal rendelkeznek, amelyek a lencse sugarának egy adott régiójában állandóak. A központi 1. zóna fókusztávolsága kisebb, mint a széli 3., gyűrű alakú zónáé, a 2. átmeneti zónában viszont a fókusztávolság meredeken nő. A legkülső 4. zóna sem rendelkezik egzakt fókusztávolsággal, s emiatt, valamint nagyobb felületére való tekintettel hátrányosan befolyásolja az optikai leképezést. Azonban a *Neocobboldia* és a *Dalmanitina* trilobiták elkerülhették ezt a negatív hatást egy megfelelő, a lencsék körül kialakított, árnyékoló pigmentgyűrű segítségével, amely a széli sugarakat elnyelte, ahogyan ezt számos, ma élő ízeltlábú szemében is tapasztalhatjuk.

Descartes hibás lencséje, mint a bifokális trilobita-lencsék korábbi felismerésének gátja

Felvetődik a kérdés, hogy a *Dalmanitina socialis* trilobita szemét elsőként, meglehetősen részletesen vizsgáló kutatók, Clarkson (1968), Clarkson és Levi-Setti (1975), Levi-Setti (1993) vajon miért nem ismerték fel a szemlencsék központi dudorának sajátságos optikai funkcióját, hiszen éppen e dudor okozza az állati látásban egyedülálló optikai tulajdonságnak számító bifokalitást. Ennek érdekes módon René Descartes (1596-1650), a híres francia tudós egy téves számítása volt az oka.

Levi-Setti (1975, 1993), valamint Levi-Setti és Clarkson (1975) a schizochroális trilobita-lencsék optikájáról szóló műveikben idézik Descartes egyik eredeti ábráját, amelyet mi is bemutatunk az **5. A ábrán.** Descartes 1637-ben publikált, *La Géometrie* című könyvében foglalkozott azzal a problémával, hogy milyen alakúnak kell lennie egy egyik oldalán domború felülettel határolt gyűjtőlencse másik felületének ahhoz, hogy a lencse egyetlen, egzakt fókuszponttal bírjon, és a



4. ábra. Ugyanaz, mint a 3. ábra, csak a *Dalmanitina socialis* 2.B ábrán látható schizochroális szemlencséjére

geometriai optika módszereivel kiszámította ennek, a lencse gömbi hibáját kiküszöbölő, ún. korrekciós felületnek az alakját (5.A ábra). A Descartes-féle korrekciós felszín közepén dudor látható az optikai tengelyen. Levi-Setti és Clarkson korábbi felfogása szerint a *Dalmanitina socialis* kéttagú lencséjében előforduló hullámos korrekciós felület (2.B ábra) megfeleltethető a Descartes által meghatározott alaknak (5.A ábra). Azonban Horváth (1989) kiszámolta a *Dalmanitina socialis* kéttagú lencséjére a lencsebeli korrekciós felületet, és azt találta, hogy az elméleti válaszfelület nem rendelkezik semmiféle központi dudorral.

Az **5.B–D ábra** három különböző (szférikus, parabolikus, hiperbolikus) felső felületű, gömbi hibától mentes, egytagú lencsére számított korrekciós felületeket mutat eltérő tárgytávolságok esetén. E számítások során az eredeti, Descartes által választott geometriai optikai paramétereket használtuk. Látható, hogy a számított korrekciós felületek teljesen különböznek a Descartes-félétől. Ennek az lehet az oka, hogy Descartes a számításában helytelenül alkalmazta a Fermat-elvet.

A Descartes által meghatározott korrekciós felület tehát hibás volt. Az, hogy az ő (egyfókuszú) lencséjén, illetve a *Dalmanitina socialis* (bifokális) schizochroális lencséiben lévő korrekciós felületen is található egy dudor, a véletlennek tulajdonítható. Ezen szerencsétlen egybeesés következtében nem ismerték fel a *Dalmanitina socialis* szemlencséinek korábbi tanulmányozása során a bifokalitást. Clarkson és Levi-Setti nem vizsgálták felül Descartes korrekciós lencseprofilját; csak a mi vizsgálataink derítettek fényt erre a hibára. Ha az említett kutatók a Descrates-féle lencsealakot nem ismerték volna, vagy tudták volna, hogy az hibás, s úgy vizsgálták volna a *Dalmanitina socialis* szemlencséjének optikáját, akkor már 1975-ben felfedezhették volna annak bifokális sajátságát.

A bifokális trilobita-lencsék funkcionális jelentősége

Mit is láthattak a *Neocobboldia chinlinica* és *Dalmanitina socialis* trilobiták a bifokális szemlencséiken át? Ahhoz, hogy e kérdést megválaszolhassuk szükségünk lenne a lencsék alatti fotoreceptorok szerkezetének ismeretére. Sajnos a lencsék alatti szövetek a fosszilizáció követ-

keztében teljesen eltűntek, így csak feltételezésekkel élhetünk azok felépítéséről.

Sok paleontológus véleménye szerint a holochroális trilobita-szem lencséi alatt egyetlen fotoreceptor helyezkedett el, és ez a szem teljesen hasonló módon működött, mint a mai ízeltlábúak szeme, különösen a gyér fényviszonyokhoz alkalmazkodott ízeltlábúaké. Másrészt viszont szerkezetében és optikai tulajdonságai tekintetében a schizochroális trilobita-szem a *Perga* szövőlepke hernyójának ún. ocelláris szemére emlékeztet (amely egy kéttagú kitinlencséből és az alatta lévő apró, több száz fotoreceptort tartalmazó retinából áll), ezért a szakemberek egyetértenek abban, hogy a schizochroális szemű trilobiták ocelláris retinához hasonló recehártyával rendelkezhettek. A legtöbb kutató úgy véli, hogy a schizochroális trilobita-szemben minden egyes lencse alatt egy-egy kisméretű retina volt. A schizochroális trilobita-szem tehát ún. ocelláris összetett szem lehetett, ugyanis ilyen retina hiányában, azaz egyetlen fotoreceptor jelenlétében nem lett volna értelme olyan jó optikai sajátságokkal bíró szemlencsét kifejleszteni, továbbá sokkal több lencsére lett volna szükség a trilobiták életben maradásához nélkülözhetetlen, kellően nagy optikai felbontás biztosítása érdekében.

Mi lehetett a helyzet a *Neocobboldia chinlinica* és a *Dalmanitina socialis* kétfókuszú lencsékkel rendelkező szemében? A bifokális lencsetulajdonság teljesen funkció nélküli lett volna, ha a lencsék alatt csak egyetlen fotoreceptor helyezkedett volna el. Ezért jogos a feltételezés, miszerint mind a *Neocobboldia*, mind pedig a *Dalmanitina* szemlencséi alatt is egy-egy kisméretű retina foglalt helyet, hiszen csak így használhatták ki ezek a trilobiták szemlencséik bifokalitását.

A fotoreceptorok közötti véges távolságnak köszönhetően egy ilyen retina segítségével a trilobiták egy bizonyos mélységélességen belül élesen láthattak egy adott tárgyat. Ennek oka a következő: Tekintsünk egy tárgypontot a lencse előtt, amelynek képe a retina síkjában képződik le. Amikor távolítjuk a lencsétől illetve közelítjük a lencséhez a pontot, annak képe a retina elé, illetve mögé képződik, ami egy elkent kör alakú foltot eredményez a retina síkjában. Az állat mindaddig élesen, azaz egyetlen pontnak észleli a tárgypontot, amíg az elmosódott képgyűrű átmérője meg nem haladja a fotoreceptorok egymástól mért távolságának kétszeresét. A tárgytér azon tartományát, amelyen belüli tárgypontokra teljesül az előbbi feltétel, mélységélességnek nevezzük. A mélységélesség erősen függ a retinának a lencséhez képesti elhelyezkedésétől és a fotoreceptorok egymástól mért távolságától.

Mit láthattak hát a trilobiták bifokális szemlencséikkel? Hogyan képezték le számukra a vizuális környezetüket kétfókuszú szemlencséik? Ezt foglalja össze a 6. ábra. Ha a retina a lencse és az $F_{\text{közeli}}$ fókuszpont között lett volna, akkor nem lett volna képalkotás (**6.A ábra**). Ha a retina az $F_{\text{közeli}}$ fókuszpontban volt, éles kép keletkezhetett egy távoli, illetve a végtelenben lévő tárgyról a lencse központi régióján (dudorán) keresztül a nagyobb törőerő (dioptriaszám) következtében (6.B ábra). Ha a retina az $F_{\text{közeli}}$ és $F_{\text{távoli}}$ fókuszpontok között helyezkedett el, akkor éles kép alakulhatott ki a retina síkjában egy köztes térbeli tárgyról a központi lencserégión keresztül (6.C ábra). Ha a retina az $F_{\text{távoli}}$ fókuszpontban volt, szintén kialakulhatott éles kép vagy egy köztes térbeli tárgyról a központi lencserégión keresztül, vagy egy távoli, illetve a végtelenben lévő pontról a lencse széli régióján keresztül, amelynek kisebb a törőereje (6.D ábra). Ha a retina a lencsétől az $F_{\text{távoli}}$ fókuszpontnál is messzebb helyezkedett el, akkor vagy egy közeli tárgy képződhetett le a retinára élesen a központi lencserégión át vagy egy távoli tárgy a széli lencserégión keresztül (6.E ábra).

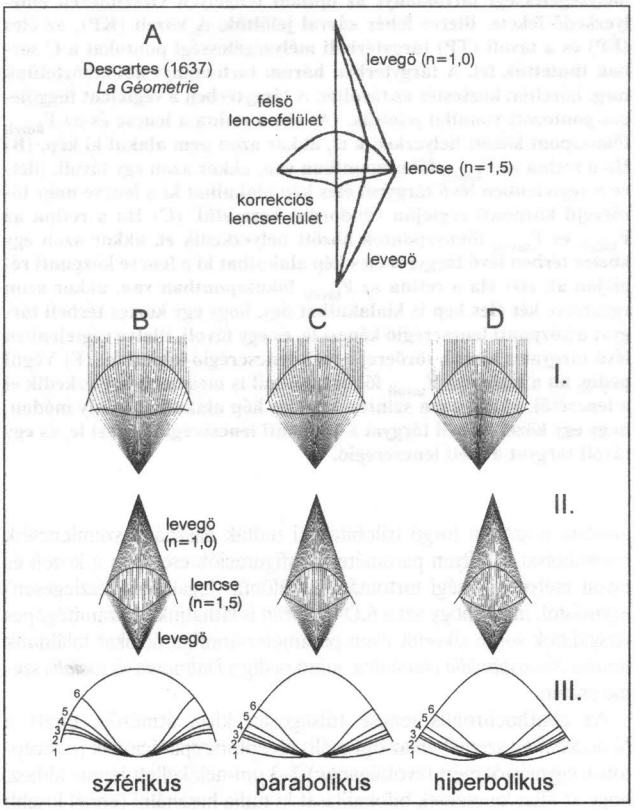
A 6. ábra alapján kijelenthetjük, hogy a *Neocobboldia chinlinica* és a *Dalmanitina socialis* abban az esetben tudta kihasználni szemlencséi bifokalitását, ha retinájuk az $F_{\text{távoli}}$ fókuszpontban helyezkedett el (6.D ábra): ezért a retina legoptimálisabb elhelyezkedése a távolabbi fókuszpont.

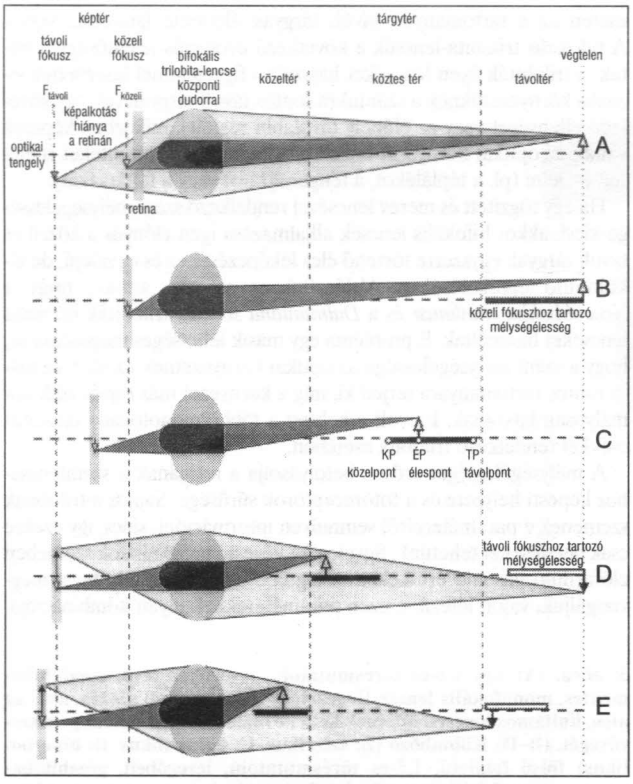
Mi volt az előnye a bifokális trilobita-lencséknek a közönséges, egyfókuszú (monofokális) lencsékhez képest? Ha a szemlencsék csak egyetlen fókuszponttal rendelkeztek volna, akkor a trilobiták optikai környezetének vagy csak a távoli tárgyai képződtek volna le élesen a retinájukra vagy csak a közeli tárgyak, és egy véges mélységélesség esetén az e tartományon kívüli tárgyak életlenül látszottak volna. A bifokális trilobita-lencsék a következő evolúciós jelentőséggel bírtak: a trilobiták ilyen lencséket használva figyelemmel kísérhették vizuális környezetüknek a számukra fontos távoli tárgyait (pl. egy közeledő ellenséget vagy az élőhely távolabbi régióit), miközben képesek voltak az optikai környezet közeli tartományaiban történteket is élesen észlelni (pl. a táplálékot, a tengeraljzatot vagy a fajtársakat).

Ha egy rögzített és merev lencsével rendelkező szem mélységélessége kicsi, akkor bifokális lencsék alkalmazása igen előnyös a közeli és távoli tárgyak egyszerre történő éles leképezéséhez és egyidejű, de elkülönülő érzékeléséhez. Valószínű ez az oka annak, hogy a *Neocobboldia chinlinica* és a *Dalmanitina socialis* trilobiták bifokális lencséket használtak. E probléma egy másik lehetséges megoldása az, hogy a szem mélységélessége az optikai környezetnek az állat számára fontos tartományára terjed ki, míg a környezet más régiói csak homályosan látszanak. Ez volt a helyzet a többi, monofokális szemlencsékkel rendelkező trilobita esetében.

A mélységélességet erősen befolyásolja a retinának a szemlencséhez képesti helyzete és a fotoreceptorok sűrűsége. Sajnos a trilobiták szemének e paramétereiről semmilyen információnk sincs, így ezekre csak becsléseket tehetünk, figyelembe véve a ma élő állatok szemében előforduló hasonló értékeket. A legtöbb, amit tehetünk, hogy megvizsgáljuk, vajon létezik-e ezen paramétereknek olyan kombinációja,

5. ábra. (A) Egy 1,5-es törésmutatójú, levegőben lévő, gömbihibamentes, monofokális lencse Descartes (1637) szerinti alakja, ahol az alsó, hullámos lencsefelületnek kellene biztosítania a fókusz pontszerűségét. (B–D) Különböző (B: szférikus, C: parabolikus, D: hiperbolikus) felső felületű, 1,5-es törésmutatójú, levegőbeli, gömbihibamentes, monofokális lencsék eltérő tárgytávolságokra számított korrekciós felületeinek az alakja. Az alsó lencsefelület biztosítja az egzakt fókuszpontot. (I.) Sugármenet a lencséken keresztül az optikai tengellyel párhuzamosan beeső fénysugarakra számolva. (II.) Sugármenet véges tárgytávolság esetén. (III.) Különböző tárgytávolságokra számolt korrekciós lencsefelületek. 1: végtelen távoli tárgy esetén érvényes profil, 2–6: a lencséhez fokozatosan közeledő tárgypontra számolt profilok.





6. ábra. A bifokális trilobita-lencse képalkotásának diagramszerű ábrázolása a lencse mögötti retina és a lencse előtti tárgy elhelyezkedésének függvényében. A retinát függőleges szürke sáv jelöli. A tárgyat és annak fordított képét nyilacskák szimbolizálják. A lencse központi régiója (a közelebbi fókusz létrejöttéért felelős tartomány) és a széli régiója (a távolabbi fókuszpontért felelős tartomány) eltérő szürke árnyalatúak. A közelebbi, illetve a távolabbi fókuszponthoz tartozó mélységélességi tartományt az optikai tengelyen vízszintesen elhelyezkedő fekete, illetve fehér sávval jelöltük. A közeli (KP), az éles (ÉP) és a távoli (TP) tárgytérbeli mélységélességi pontokat a C sorban tüntettük fel. A tárgytérben három tartományt különböztetünk meg: közeltér, köztestér és távoltér. A tárgytérben a végtelent függőleges pontozott vonallal jelöltük. (A) Ha a retina a lencse és az $F_{közeli}$ fókuszpont között helyezkedik el, akkor azon nem alakul ki kép. (B) Ha a retina az $F_{közeli}$ fókuszpontban van, akkor azon egy távoli, illetve a végtelenben lévő tárgyról éles kép alakulhat ki a lencse nagy törőerejű központi régióján (dudorán) keresztül. (C) Ha a retina az $F_{közeli}$ és $F_{távoli}$ fókuszpontok között helyezkedik el, akkor azon egy köztes térben lévő tárgyról éles kép alakulhat ki a lencse központi régióján át. (D) Ha a retina az $F_{távoli}$ fókuszpontban van, akkor azon egyszerre két éles kép is kialakulhat úgy, hogy egy köztes térbeli tárgyat a központi lencserégió képezi le, és egy távoli, illetve végtelenben lévő tárgyat a kisebb törőerejű széli lencserégió képezi le. (E) Végül pedig, ha a retina az $F_{távoli}$ fókuszpontnál is messzebb helyezkedik el a lencsétől, akkor azon szintén két éles kép alakulhat ki oly módon, hogy egy közel térbeli tárgyat a központi lencserégió képezi le, és egy távoli tárgyat a széli lencserégió.

amelyre a szóban forgó trilobiták ki tudták használni szemlencséik bifokalitását. Az ilyen paraméter-konfigurációk esetében a közeli és távoli mélységélességi tartomány elkülönül (legalábbis részlegesen) egymástól, mint ahogy azt a 6.D–E ábrán is láthatjuk. A számítógépes vizsgálatok során sikerült ilyen paraméter-konfigurációkat találnunk mind a *Neocobboldia chinlinica,* mind pedig a *Dalmanitina socialis* szeme esetén.

Az abathochroális lencse túlságosan kicsi átmérője miatt a *Neocobboldia* szemében az optimális receptorszeparációnak (a receptorok egymástól mért távolságának) 2–3 μm-nek kellett lennie ahhoz, hogy az állat lencséinek bifokalitását ki tudja használni (ennél kisebb receptorszeparációra nincs példa az állatvilágban, hiszen maguk a fotoreceptorok is minimum 1–2 μm szélesek). Ha a receptorszeparáció ennél az értéknél nagyobb lett volna, akkor mind a két fókusz esetén végtelen lett volna a mélységélesség. Ebben az esetben a lencsétől mért távolságtól függetlenül a *Neocobboldia* élesen látott volna minden tárgyat mind a központi, mind pedig a széli lencse-régiókon át. Ekkor viszont a bifokalitás elvesztette volna a jelentőségét, és a közönséges monofokális lencse alkalmazása egyszerűbb lett volna. A *Dalmanitina socialis* schizochroális szemű trilobiták lencséik bifokális tulajdonságát akkor tudták jól kihasználni, ha retinájukban a receptorszeparáció 15–18 μm volt. A *Dalmanitina* szemében a lencseátmérő sokkal nagyobb volta miatt az optimális receptorszeparáció értéke is jóval nagyobb, mint a *Neocobboldia* szemében.

Hogyan befolyásolja a fényelhajlás a bifokális trilobita-lencsék optikáját?

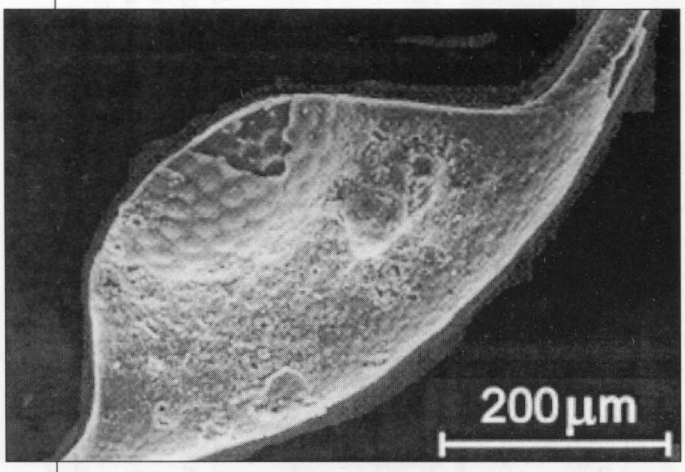
A bifokális lencse (mint minden lencse) fókuszpontjai a fényelhajlás (diffrakció) következtében elkenődnek. A diffrakció egy jellegzetes, elmosódott gyűrűrendszert eredményez. E gyűrűk közül az első, legintenzívebbnek a sugara a lencse fókusztávolságával valamint a beeső fény hullámhosszával egyenesen, míg a lencse átmérőjével fordítottan arányos. Minél nagyobb e gyűrű átmérője, annál kevésbé kontrasztos (éles) a lencse képalkotása. Meghatározván az elkenődés mértékét a *Neocobboldia chinlinica* és a *Dalmanitina socialis* lencséire 470 nm-es fényhullámhossz mellett (amelyet a víz alatti optikai környezetnek a víz szelektív fényabszorpciója miatti kvázi-monokromatikussága következtében tételezhetünk fel), azt találtuk, hogy a *Neocobboldia* kisméretű szemlencséje esetén a közeli fókuszpont a fényelhajlás miatt teljesen elkenődött, így a lencse bifokalitása tulajdonképpen elveszett, és a központi dudor szerepe továbbra is titokban maradt. A *Dalmanitina* szemében viszont a fényelhajlás miatt kialakuló képelkenődés elhanyagolható mértékű volt, a lencse viszonylag nagy átmérőjének folyományaként. A *Dalmanitina* schizochroális szemlencséjének bifokális tulajdonságát tehát nem rontotta el a fényelhajlás; így ezek a lencsék hihetően két éles fókuszponttal rendelkeztek.

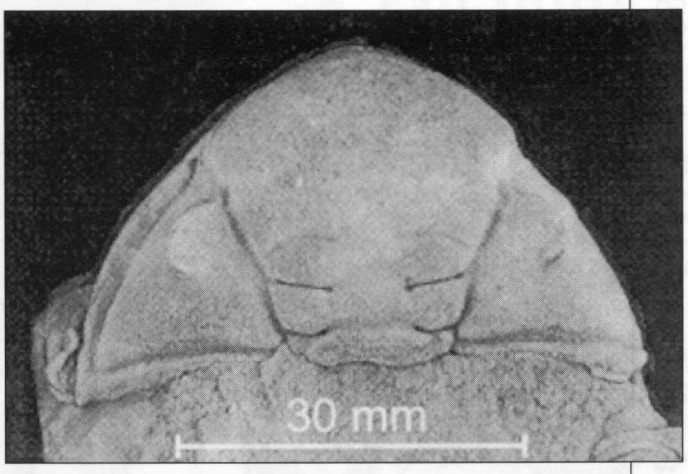
A *Dalmanitina* bifokális szemlencséi által alkotott két kép relatív fényerőssége

Miután elfogadhatónak találtuk, hogy a *Dalmanitina* szemlencséi bifokálisak voltak, érdemes volt azt is megbecsülnünk, hogy mekkora volt a relatív fényerőssége a központi és széli lencserégiók által a retinán alkotott képeknek. Azt kaptuk, hogy ha a *Dalmanitina* egy távoli, egyenletesen megvilágított felületet (pl. a tengeraljzatot) nézett, akkor a széli lencserégió által szolgáltatott retinális megvilágítottság kb. kétszer nagyobb volt, mint amit – ugyanazt a felületet nézve – a központi lencserégió szolgáltatott volna. Ez persze nem jelenti azt, hogy a *Dalmanitina* szemlencséjének széli része által alkotott kép a valóságban is kétszer világosabb volt a központi rész alkotta képhez képest, mert a széli lencserégió a távoli tárgyakat képezte le, míg a központi a közelieket, ahogy azt a 6.D–E ábrán láthatjuk. Víz alatt egy tárgyról érkező fény intenzitása a tárgy távolságával exponenciálisan csökken a fényelnyelés és fényszórás következtében. Minél zavarosabb a víz, annál erősebb ez a csökkenés. A fényerősség a felére erősen zavaros vízben már néhány deciméter alatt lecsökkenhet, míg ugyanilyen mértékű intenzitáscsökkenés tiszta vízben csak több méteren túl tapasztalható. A víz zavarossága nyilván a távolabbi tárgyak képeinek kontrasztját („élességét") is csökkenti. Így a *Dalmanitina* szemlencséje széli részének nagyobb fénygyűjtő-képességét két effektus is kompenzálja. Ebből végül is arra következtethetünk, hogy a közeli és a távoli tárgyakat a *Dalmanitina* közel azonos „súllyal" érzékelhette. (A cikk második részét májusi számunkban közöljük.)

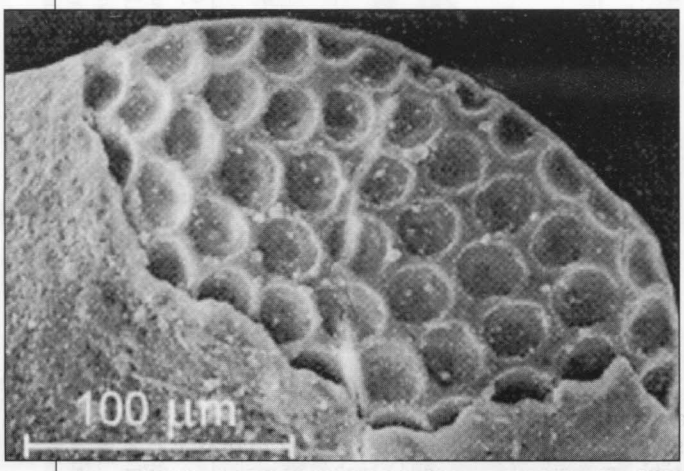
Köszönetnyilvánítás: Kutatómunkánkat az F-012858 számú OTKA-pályázat, a Magyar Felsőoktatásért és Kutatásért Alapítvány Magyary Zoltán posztdoktori ösztöndíja és az MTA Bolyai János kutatói ösztöndíja tette lehetővé.

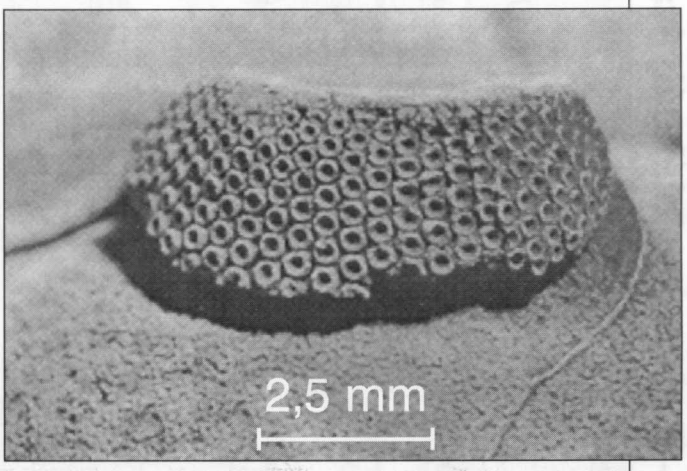
Bifokális trilobita szemek...



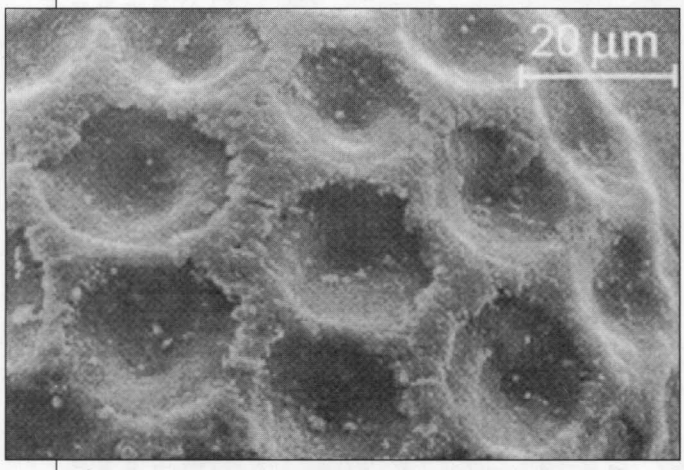


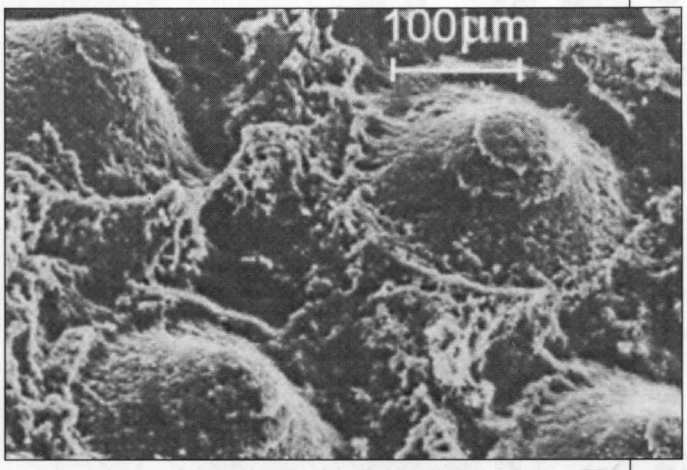
1





2





3

A B

A „Bifokális szemek és szemüvegek" c. cikk 1. ábrája. (A) A Kínából származó, alsó-kambriumi *Neocobboldia chinlinica* trilobita fosszíliáinak pásztázó elektronmikroszkópos felvételei. (1) Egy *Neocobboldia*-maradvány. (2) A szemfelületről hiányzó abathochroális lencsék lenyomatai. (3) Az alsó lencsefelület központi dudorának lenyomata. (B) Ugyanaz, mint az A oszlopban, csak az alsó-devoni *Dalmanitina socialis* trilobita esetén.