

SOCZEWKA – EMBRIOLOGIA, ANATOMIA I FIZJOLOGIA- część I

Dr n. wet. Przemysław K. Bryła
Przychodnia Weterynaryjna w Warszawie
brvlapik@wp.pl

LENS – Part I

The lens originates from surface ectoderm covering the embryo's head. The lens is composed of an acellular capsule, epithelial cells and fibers. The postnatal lens lacks vascularization and innervations. For nutrients and removal of metabolic waste products depends on the aqueous humor. The lens is comprised of 2/3 water and 1/3 protein. Two forms of proteins have been described: soluble (crystallin) and insoluble (albuminoid). Metabolism of glucose from aqueous humor provides the main source of energy for the lens, with anaerobic glycolysis pathways, being the most important. The basic function of the lens is to focus light onto the retina producing a clear, sharp image.

KEYWORDS: lens, lens capsule, lens cortex, lens nucleus, lens proteins.

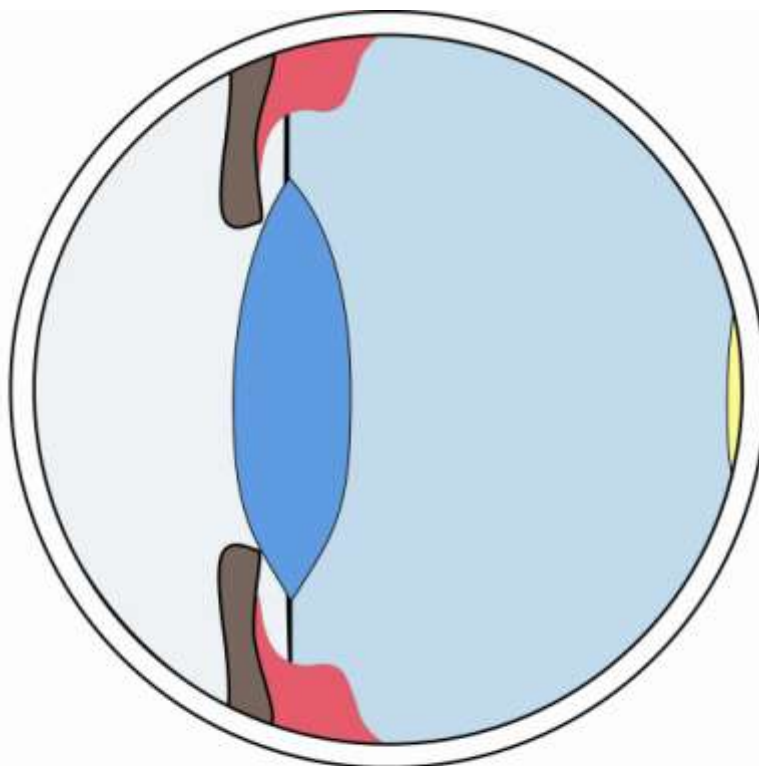
EMBRIOLOGIA

Przyjęto, że rozwój embrionalny oka u wszystkich gatunków ssaków jest podobny (1), a pierwszym zawiązkiem soczewki jest uwypuklenie międzymózgowia w kierunku ektodermy powierzchniowej głowy (2). Uwypuklenie to przyjmuje kształt pęcherzyka wzrokowego (vesicula optica), który zawiera jamę wzrokową. Etap ten wyznacza początek organogenezy, która u psa rozpoczyna się w 15 dniu ciąży (1). W miejscu zetknięcia się ektodermy z pęcherzykiem wzrokowym, ta pierwsza grubieje, tworząc płytę soczewki zwaną także plakodą (3). Formowanie plakody stymulują mediatory chemiczne uwalniane z neuroektodermy (3). Płyta soczewki stopniowo przekształca się w pęcherzyk soczewki (vesicula lentis). Po inwaginacji pęcherzyka wzrokowego, pęcherzyk soczewki zostaje zamknięty w jamie kielicha wzrokowego (calix optimus). W tym też czasie tylna i boczna powierzchnia soczewki pokryta zostaje siecią naczyń krwionośnych, które są odgałęzieniami tętnicy ciała szklistego. Struktura ta określana jest terminem - błona naczyniowa soczewki (tunica vasculosa lentis), (1). Jej zadaniem jest zaspokojenie potrzeb metabolicznych soczewki w okresie jej rozwoju (4). Granicę pęcherzyka soczewki stanowią komórki ektodermy powierzchniowej. Zwrócone są one wierzchołkami do środka jamy pęcherzyka soczewki, a ich podstawa tworzy pierwotną torebkę soczewki (1). Komórki przedniej części soczewki mają

kształt sześcienny, zaś w miarę zbliżania się ich do części tylnej soczewki, wydłużają się tworząc pierwotne włókna soczewki. Włókna te stopniowo wypełniają całą jamę pęcherzyka soczewki. W tym też czasie zanikają w nich jądra, mitochondria i pozostałe organella komórkowe. Z komórek tych powstaje jądro zarodkowe soczewki, które ostatecznie zajmuje centralne miejsce w soczewce (1). Komórki nabłonka sześciennego znajdujące się w przedniej części soczewki obecne są przez całe życie osobnika w postaci jednowarstwowego nabłonka (4).

ANATOMIA

Soczewka (lens) jest najważniejszym elementem układu optycznego oka. Celem tego układu jest uzyskanie zmniejszonego, odwróconego ale niezwykle wyraźnego obrazu na siatkówce (2). Soczewka leży pomiędzy tęczówką a ciałem szklistym. Ma kształt dwuwypukły i jest przezroczysta. Nie występują w niej naczynia krwionośne ani włókna nerwowe (1).



Topografia soczewki

Ryc. 1. Topografia soczewki.

Soczewka posiada dwie powierzchnie: przednią i tylną. U psa brak jest wyraźnych różnic w krzywiznie powierzchni przedniej i tylnej, natomiast u bydła i koni powierzchnia przednia jest bardziej spłaszczona niż tylna. U kota mamy odwrotną sytuację (2). Centralne punkty tych

powierzchni nazywane są biegunami. Wyróżniamy biegun przedni i biegun tylny soczewki. Linia łącząca oba bieguny stanowi oś soczewki (axis Lentis). Połączenie powierzchni przedniej soczewki z tylną tworzy równik soczewki. Występuje on w postaci zaokrąglonej obwódki. Do równika soczewki przytwierdzają się włókna obwódki rzęskowej. Utrzymują one soczewkę w stałej pozycji, w środku źrenicy. Włókna te nazywane są też więzadłami podwieszającymi i zbudowane są z kolagenu (1, 2, 3). Zmiany napięcia więzadeł podwieszających wpływają na stopień załamania światła przez soczewkę. Tym samym wpływają na ostrość widzenia przedmiotów znajdujących się blisko lub daleko od siatkówki. U zwierząt mięsożernych skurcz mięśni rzęskowych przesuwa soczewkę ku przodowi, zaś rozkurcz, pod wpływem pobudzenia układu sympatycznego, oddala ją (2). U ssaków naczelnych i ptaków za ostrość widzenia odpowiada zjawisko akomodacji oka. W zjawisku tym zmienia się kształt soczewki, staje się ona bardziej lub mniej wypukła (4). Soczewka odpowiada za 30- 35% refrakcji i pełni rolę w dokładnym dostosowywaniu oka do oglądania przedmiotów z różnych odległości (1, 3).

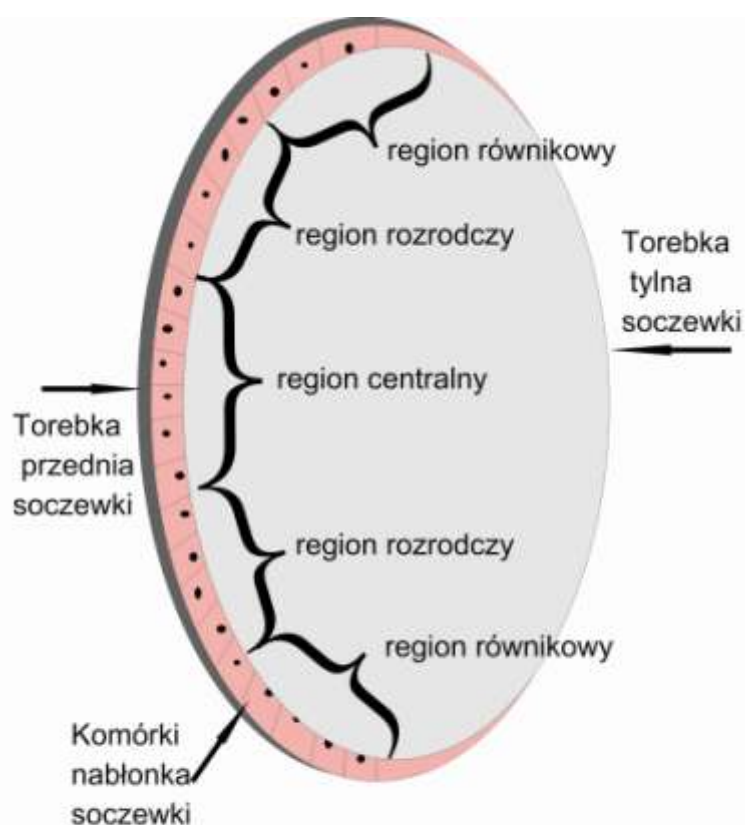
Soczewka składa się z torebki soczewki, nabłonka przedniego oraz z włókien soczewki (2, 3). Ponadto w soczewce wyróżniamy korę soczewki (cortex lentis) - obszar zewnętrzny w pobliżu torebki soczewki i jądro soczewki (nucleus lentis), (1).



Schemat soczewki

Ryc. 2. Schemat soczewki.

Cała soczewka otoczona jest torebką (capsula lentis). Jest to elastyczna, bezkomórkowa błona. Cienka ale niezwykle mocna (4). Przykładowo u psa przednia torebka soczewki ma grubość 50-70 μm , zaś tylna tylko 2-4 μm . Torebka przednia produkowana jest przez komórki nabłonka przedniego soczewki. Proces ten trwa przez całe życie danego osobnika, więc wraz z wiekiem grubość jej wzrasta (1). Torebkę części tylnej soczewki tworzy błona podstawna pierwotnych włókien soczewki. Torebka soczewki zbudowana jest z kolagenu typu IV i zawiera około 10 % glikoaminoglikanów (3, 4). Od strony wewnętrznej torebka soczewki pokryta jest pojedynczą warstwą komórek nabłonka. W nabłonku tym wyróżnia się trzy regiony: centralny, rozrodczy i równikowy (4).

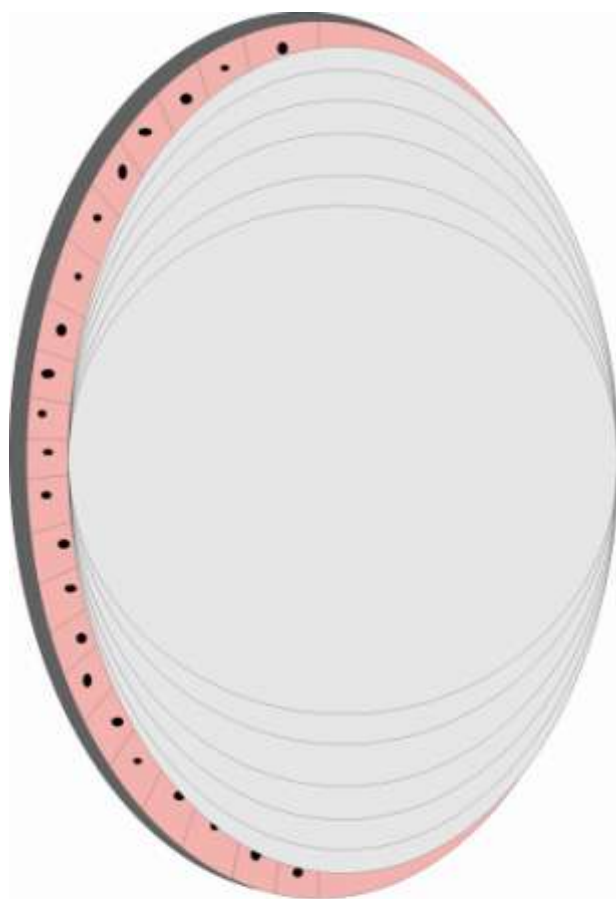


Schemat torebki i nabłonka soczewki z zaznaczeniem obszarów nabłonka

Ryc. 3. Schemat torebki i nabłonka soczewki z zaznaczeniem regionów nabłonka

W warunkach fizjologicznych region centralny odpowiada za transport substancji rozpuszczalnych pomiędzy soczewką a cieczą wodnistą oraz za wydzielanie materiału potrzebnego do produkcji torebki soczewki. Okazuje się, że w fizjologicznych warunkach

tylko 1% tych komórek przejawia aktywność. Natomiast w sytuacji, gdy dojdzie do uszkodzenia soczewki aktywność takich komórek wyraźnie wzrasta (3, 4). Proces transportu i wydzielania w tym obszarze oparty jest na pompie Na – K zależnej od ATPazy (4). Rola regionu rozrodczego nabłonka polega na ciągłym dostarczaniu młodych komórek do obszaru równikowego, w którym to zostaną one przekształcone we właściwe włókna soczewki. Odbywa się to w ten sposób, że komórki te pod wpływem czynników wzrostu pochodzących z ciała szklistego, stopniowo tracą organella, wydłużają się i łączą z sąsiednimi włóknami soczewki. Przy czym każde włókno łączy się z dwoma włóknami starszymi, dwoma młodszymi oraz z dwoma tej samej generacji (5). W efekcie przekształcają się we włókna właściwe soczewki i stanowią główną istotę soczewki. Ponieważ nowe włókna powstają przez całe życie, starsze włókna, położone w centrum soczewki stają się gęstsze i mniej przezroczyste niż otaczające je włókna młodsze (1).



Schemat powstawania włókien soczewki

Ryc. 5. Schemat powstawania włókien soczewki.

Z upływem wieku dochodzi *do* stwardnienia jądra soczewki (4). Ułożenie włókien w soczewkach różnych gatunków zwierząt ma odmienny charakter. Wyróżnia się dwa sposoby przebiegu włókien soczewki: nierozgałęziony i rozgałęziony. Przykładem nierozgałęzionego przebiegu włókien soczewki jest soczewka ptaków. W takiej soczewce włókna łączą się koniec do końca i układają w formie elipsy wokół embrionalnego jądra soczewki (4, 5). Rozgałęziony sposób przebiegu włókien soczewkowych spotykamy np. w soczewkach psów i kotów. U tych zwierząt żadne z włókien nie jest tak długie by rozciągać się przez całą szerokość soczewki, a końce komórek są zbyt grube, by mogły być skupione w jednym punkcie. Wobec tego stykają się one w strukturze określanej terminem szew soczewki. Przedni szew soczewki ma kształt litery Y, natomiast tylny szew ma kształt litery Y odwróconej o 180 ° (1, 5). Zarówno na powierzchni przedniej jak i tylnej soczewki występują trzy takie promienie, łączące się w odpowiednich biegunach. Wszystkie włókna soczewki łączą się w większe skupiska a następnie w lamele. Lamele powierzchniowe są miękkie i tworzą korę soczewki a lamele położone centralnie są twarde i stanowią jądro soczewki (4).



Ryc. 5. Szwy soczewki typu rozgałęzionego.

FIZJOLOGIA

Soczewka składa się w 1/3 z białek oraz w 2/3 z wody. Niecały 1% składu soczewki stanowią lipidy, aminokwasy, elektrolity i wodorowęglany (3, 4, 5). Wysokie stężenie białek w soczewce konieczne jest do utrzymania wysokiej wartości indeksu refrakcji. Indeks ten ma różną wartość w poszczególnych warstwach soczewki. W jądrze wynosi 1.42, a w warstwach zewnętrznych 1.33 (6). Właściwości refrakcyjne w dużej mierze zależą również od stopnia krzywizny przedniej i tylnej powierzchni soczewki oraz od skali uporządkowania i przylegania względem siebie dużych struktur soczewki (7). Soczewka psa ma objętość 0,5 ml, grubość jej wynosi ok. 7 mm, zaś jej średnica ok. 10 mm. Stosunek objętości soczewki do objętości gałki ocznej u psa waha się w granicach 1:8 – 1:10 (4).

W soczewce występują dwie frakcje białek. Frakcja rozpuszczalna w wodzie i frakcja nierozpuszczalna w wodzie. Frakcja rozpuszczalna w wodzie obejmuje 80-90% białek soczewki i stanowią ją białka określane terminem krystaliny. Krystaliny są białkami wewnątrzkomórkowymi występującymi w nabłonku i w błonie komórek soczewki. Charakteryzują się stabilną strukturą, która pozwala utrzymać wysoką przejrzystość soczewki. Białka te dzielą się na trzy grupy: alfa, beta i gamma- krystaliny. Obecnie uważa się, że beta i gamma są częścią tej samej grupy białek i objęte są wspólnym terminem betagamma-krystaliny (3). Alfa-krystaliny stanowią 35% białek soczewki, beta-krystaliny 55% a gamma-krystaliny tylko 1-2%. Alfa-krystaliny są największymi białkami o ciężarze cząsteczkowym 600-4000 kilodaltonów (kD), podczas gdy ciężar cząsteczkowy gamma-krystalin wynosi tylko 20 kD. Przyjęto, że główna rola alfa-krystalin związana jest z przemianą komórek nabłonka we włókna soczewki (4). Rozpuszczalne w wodzie frakcje białek mogą być dalej rozdzielane na kolejne frakcje, rozpuszczalne i nierozpuszczalne w 8- molowym roztworze mocznika. Frakcje rozpuszczalne w moczniku tworzą szkielet strukturalny komórek soczewki a frakcje nierozpuszczalne wchodzą w skład błon plazmatycznych włókien soczewki (3). Z wiekiem następuje naturalny proces obniżania się stężenia białka w soczewce oraz maleje udział frakcji białek rozpuszczalnych w wodzie. Utrata ta związana jest prawdopodobnie z ucieczką krystalin poprzez torebkę soczewki (8). Białka nierozpuszczalne w wodzie stanowią 10-20% białek soczewki i określane są terminem albuminoidy (1, 4).

Do pełnienia swojej funkcji soczewka wymaga dużej ilości energii. Źródłem tej energii są substancje rozpuszczone w cieczy wodnistej i w ciele szklistym gałki ocznej. Składniki odżywcze przenikają przez torebkę soczewki i wędrują do komórek nabłonkowych. Komórki te w soczewce stanowią obszar o wysokim stopniu metabolizmu (6). Głównym źródłem energii dla soczewki jest glukoza i inne cukry, które wnikają do niej na zasadzie dyfuzji prostej lub ułatwionej (3). Glukoza z przestrzeni zewnątrzkomórkowej transportowana jest do cytoplazmy poprzez system białek transportujących (6). Zawartość glukozy w soczewce wynosi 1/10 jej zawartości w cieczy wodnistej. Pośrednio świadczy to o szybkim metabolizmie cukrów w soczewce. W metabolizm węglowodanów w soczewce zaangażowanych jest kilka mechanizmów (4). Dominującym mechanizmem jest beztlenowa glikoliza. Za pomocą tego typu przemian, w soczewce przetwarzane jest 80% glukozy, co pozwala uzyskać 70% energii. Enzymem wiodącym w tego typu reakcji jest hexokinaza. W pewnych sytuacjach, gdy poziom glukozy przekracza wydajność hexokinazy, metabolizm glukozy przekierowany zostaje na inny tor przemian, zwykle na drogę przemian sorbitolu. Z taką sytuacją mamy często do czynienia w przypadku cukrzycy (1, 6). Drugim wiodącym mechanizmem przemian glukozy w soczewce jest metabolizm tlenowy oparty na cyklu Krebsa. Odbywa się on w komórkach nabłonka, ponieważ posiadają one mitochondria. Pomimo, że w procesie tym przetwarzane jest tylko 3% glukozy, dostarcza on soczewce aż 20% energii (4). Kolejnymi mechanizmami spalania węglowodanów w soczewce jest konwersja heksozy w pentozę (cykl pentozofosforanowy) oraz droga przemian sorbitolu (cykl sorbitolowy). Za pomocą konwersji heksozy w pentozę przetwarzane jest ok. 14 % węglowodanów, zaś drogą przemian sorbitolu ok. 5% (3, 4). Torebka soczewki jest słabo przepuszczalna dla sorbitolu. Gdy stężenie sorbitolu we wnętrzu soczewki stanie się większe niż w cieczy wodnistej, doprowadzi to do napływu wody do jej wnętrza. Nadmiar wody spowoduje uszkodzenie połączeń pomiędzy włóknami soczewki i w efekcie dojdzie do obrzęku i zmętnienia soczewki (5).

Obszarem soczewki o największym tempie metabolizmu jest nabłonek. Zużytkowuje on tlen i glukozę do syntezy białek i aktywnego transportu w kierunku soczewki elektrolitów, węglowodanów i aminokwasów. Celem cieczy wodnistej jest dostarczenie soczewce składników odżywczych i usuwanie produktów przemiany materii. W bezpośrednim kontakcie z cieczą wodnistą jest tylko przednia powierzchnia soczewki. Starsze komórki, położone wewnątrz soczewki mogą komunikować się ze środowiskiem zewnętrznym tylko za pomocą niskooporowych połączeń międzykomórkowych (3). Jednym z ważniejszych zadań soczewki

jest utrzymanie kontroli nad równowagą wodno-elektrolitową. Zaburzenia w uwodnieniu komórek soczewki szybko prowadzą do jej zmętnienia. Prawidłowa soczewka zawiera ok. 66% wody (6). Elektrolity takie jak sód, potas łatwo dyfundują przez torebkę soczewki a ich zawartość wewnątrz soczewki regulowana jest za pomocą pompy jonowej. Stężenie sodu w soczewce oceniane jest na 20 mM zaś potasu na 120 mM. Natomiast w otaczającej soczewkę cieczy wodnistej stężenie sodu wynosi 150 mM, a potasu tylko 5 mM (3). Połączenie transportu aktywnego i przepuszczalności błony jest określane jako układ ssąco-tłoczący soczewki (3, 4). Zgodnie z tą teorią, potas i inne cząsteczki są transportowane aktywnie przez nabłonek do przedniej powierzchni soczewki. Jednocześnie ulegają one dyfuzji w kierunku zewnętrznym przez tylną powierzchnię soczewki zgodnie z gradientem stężeń. Z kolei sód wpływa przez tylną powierzchnię soczewki (zgodnie z gradientem stężeń), a następnie jest aktywnie wymieniany na potas przez nabłonek soczewki. Homeostaza wapnia jest również istotna dla prawidłowego funkcjonowania soczewki. Jony wapnia wewnątrz soczewki występują w nadmiarze. Stężenie ich w soczewce jest kilkanaście razy wyższe niż w otaczającej ją cieczy wodnistej (4). Głównie wolne jony wapnia gromadzone są w przestrzeniach pozakomórkowych ale też wnikają one do komórek soczewki. Komórki nabłonka w swojej cytoplazmie zawierają mniej jonów wapnia niż włókna soczewki. Nadmiar wapnia w komórkach soczewki powoduje degradację ich cytoplazmy, proteolizę i w efekcie obrzęk komórek, co prowadzi do ich zmętnienia (6).

Jak wynika z powyżej omówionych mechanizmów, utrzymanie homeostazy w soczewce jest procesem niezwykle trudnym i złożonym. Zaburzenie funkcji na każdym etapie prowadzi do nieodwracalnych zmian w składzie białkowym soczewki, pracy pompy metabolicznej i elektrolitowej. Zaburzenia elektrolitowe zmieniają aktywność antyoksydacyjną, co sprzyja wzrostowi aktywności enzymów proteolitycznych. W komórkach soczewki wzrasta frakcja białek nierozpuszczalnych, kosztem frakcji krystalin. Utrata homeostazy jest początkiem powstawania zmian patologicznych w soczewce. Zmiany te zostaną omówione w II części pt. „Soczewka – patofizjologia, zaćma”. Artykuł ten zamieszczony zostanie w 4 numerze kwartalnika „Okulistyka weterynaryjna”.

PIŚMIENNICTWO

1. Ofri R.: Soczewka. W: Okulistyka weterynaryjna Slattera. Wydana przez Maggs D. J., Miller P. E., Ofri R., Elsevier Urban & Partners, Wrocław 2009, s. 284-304.
2. Kobryń H., Kobryńczuk F.: Anatomia zwierząt, t 3, Wydawnictwo Naukowe PWN Warszawa 2006, s.199-210.
3. Kałużny J. :Soczewka i zaćma. W: Basic and Clinical Science Course ,część 11, Wydanie I polskie, Elsevier Urban and Partner, Wrocław 2007, s.
4. Colitz C. M. H. Embryology, Anatomy, and Physioplogy of the lens. European Veterinary Ophtalmology Meeting 2009, Kopenhaga.
5. Samuelson D. A. : Ophtalmic Anathomy. W: Veterinary ophthalmology, Wydane przez Gelatt K., Blackwell Publishing, Wydanie IV, 2007, s. 37-60.
6. Mathias R. T., Rae J.L.: The Lens: local transport and global transparency. Exp Eye Res 2004, 78, 689-698.
7. Kuszak J. R., Zoltowski R. K., Sivertson C. : Fibre cell organization In crystalline lenses. Exp Eye Res 2004, 78, 673-687.
8. Hejtmancik J. F., Piatigorsky J.: Lens proteins and their molecular biology. W: Albert D. M., Jakobiec F. A.: Principles and Practice of Ophtalmology, II wydanie, Filadelfia Saunders 2000, s. 1409-1428.