

# Różnorodność widzenia barwnego w świecie zwierząt



Foto: archiwum Autoriki



Foto: archiwum Autoriki

Inż. ZOFIA GRZESIAK, mgr inż. GABRIELA GRZEGORCZYK  
Koło Naukowe Optyki Widzenia Visus, Politechnika Wroclawska, Wydział Podstawowych Problemów Techniki, Katedra Optyki i Fotoniki

## Streszczenie

Artykuł przedstawia przegląd wiedzy na temat widzenia barwnego u różnych gatunków zwierząt, porównując zdolności percepcyjne ssaków, ptaków, płazów, gadów, owadów i skorupiaków. Widzenie kolorów zależy od liczby i rodzaju fotoreceptorów oraz kropli olejowych w oczach. U większości gatunków kluczową rolę odgrywają czopki, ale u niektórych, jak płazy, również pręciki mogą uczestniczyć w percepcji barw, co pozwala na widzenie w słabym świetle. Ssaki, takie jak psy i koty, są dichromatami i widzą świat w żółto-niebieskich barwach. Wyjątkiem są małpy Starego Świata, które są trójchromatyczne, widzą podobnie jak ludzie. Ptaki mają cztery rodzaje czopków i krople olejowe, co umożliwia tetrachromatyczne widzenie, w tym ultrafiolet. Gady również mają tetrachromatyczne widzenie. Płazy korzystają z dwóch rodzajów pręcików i czterech czopków, co pozwala na widzenie barw nawet w słabym oświetleniu. Ryby mogą mieć szerokie spektrum widzenia, obejmujące UV, ale niektóre mają jedynie pręciki. Krewetki modliszkowe posiadają aż 12 rodzajów czopków, co umożliwia im postrzeganie światła spolaryzowanego i ultrafioletowego.

## Wstęp

Fotoreceptory to wyspecjalizowane komórki sensoryczne obecne w siatkówce oka, które przekształcają bodźce świetlne w impulsy nerwowe, pozwalając na percepcję otoczenia poprzez zmysł wzroku. Złożoność widzenia barwnego i przetwarzania światła zależy od rodzaju i liczby fotoreceptorów, jakie dany organizm posiada. Proces ten jest kluczowym elementem w życiu zwierząt, warunkując m.in. efektywne zdobywanie pożywienia, unikanie drapieżników czy komunikację wewnątrzgatunkową.

## Fotopigmenty

Fotoreceptor to komórka znajdująca się w siatkówce oka, która zawiera fotopigmenty i odpowiada za odbieranie bodźców świetlnych. Komórki fotoreceptorowe przekształcają energię światła (fotonów) na sygnały elektryczne, które następnie są przesyłane do mózgu, gdzie zostają przetworzone na obraz. Głównymi fotoreceptorami odpowiedzialnymi za widzenie barwne są czopki, które reagują na określone długości fal świetlnych. U kręgowców, w czopkach możemy znaleźć fotopigmenty o następującej klasyfikacji:

- **RH2 (Rodopsyna 2):** wrażliwy na światło w zakresie zielonym, związany z widzeniem dziennym.
- **SWS1 (ang. Short Wavelength Sensitive 1):** wrażliwy na krótkie fale, szczególnie w zakresie fioletowym (VS) lub ultrafioletowym (UVS).
- **SWS2 (ang. Short Wavelength Sensitive 2):** wrażliwy na fale, w zakresie niebieskim.

## Abstract

*The article presents a review of current knowledge on color vision in various animal species, comparing the perceptual abilities of mammals, birds, amphibians, reptiles, insects, and crustaceans. Color vision depends on the number and type of photoreceptors and oil droplets present in the eyes. In most species, cones play a key role in color vision, but in some, such as amphibians, rods can also participate in color perception, allowing them to see colors even in low light. Mammals, such as dogs and cats, are dichromatic and see the world in a limited yellow-blue palette. The exception among mammals are Old World monkeys, which are trichromatic, seeing colors similarly to humans. Birds have four types of cones and oil droplets, enabling tetrachromatic vision, including ultraviolet detection. Reptiles also have tetrachromatic vision. Amphibians rely on two types of rods and four types of cones, which allow them to see colors even in dim lighting. Fish may have a wide spectrum of color vision, including UV, but some species have only rods. Mantis shrimp possess up to 12 types of cones, allowing them to perceive polarized and ultraviolet light.*

- **LWS (ang. Long Wavelength Sensitive):** wrażliwy na długie fale światła, w zakresie czerwonym.

Fotopigmentem obecnym w pręcikach jest RH1 (Rodopsyna 1), odpowiedzialny za widzenie w słabym świetle (widzenie nocne). Zakres wrażliwości RH1 wynosi mniej więcej 400-600 nm, przy czym jego maksymalna czułość jest bliska 498-500 nm (zielony) [1].

## Krople Olejowe

Choć mamy tylko cztery fotopigmenty, krople olejowe w czopkach działają jak filtry spektralne, co pozwala na bardziej precyzyjne rozróżnianie barw. Krople te występują w różnych odcieniach, selektywnie absorbują i przepuszczają określone długości fal, minimalizując tym samym rozpiętość nakładających się na siebie zakresów czułości spektralnych poszczególnych fotoreceptorów. Chociaż krople olejowe zmniejszają ogólną czułość na światło, poprawiają zdolność rozróżniania barw, co jest istotne dla zwierząt aktywnych w trybie fotopowym. Mimo tego, w warunkach słabego oświetlenia krople te mogą obniżyć czułość na światło, co może stanowić pewne ograniczenie w widzeniu w nocy [1].

## Ssaki

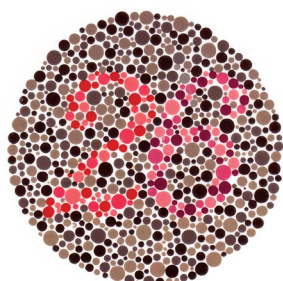
Większość ssaków ma dwa rodzaje fotopigmentów – SWS1 i LWS. Ich maksymalne czułości różnią się w zależności od gatunku. Słowa: „więc chodź, pomaluj mój świat na żółto i na niebiesko” pochodzące z piosenki zespołu

2 plus 1 moglibyśmy przypisać psom, będącymi dichromatami, ponieważ są one czułe na niebieski i żółty kolor. Mają również wąski obszar widzialnego spektrum, który wydaje się bezbarwny, co może powodować, że czerwone obiekty mogą wyglądać dla psów na brązowe lub szare [2].

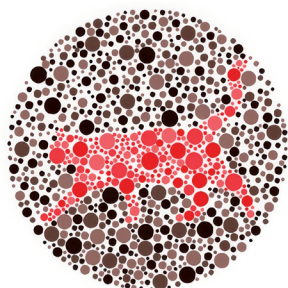
Potwierdzeniem tego są badania przeprowadzone na Uniwersytecie Medycyny Weterynaryjnej w Bari [3] w których naukowcy zbadali zachowania 21 psów różnych ras, po tym, jak pokazano im rysunki przedstawiające sylwetkę biegnącego kota za pomocą kolorów każdej z cyfr z karty numer 22 z tablicy Ishihary [rys. 2 i 3]. Reakcje psów były następujące:

- Animacja z kotem w kolorach cyfry „2” zauważono wzmożoną reakcję psów, zarówno ich wzrok, jak i postura ciała podążała za biegnącym kotem. Tak jak u osób z deuteranopią (daltonizmem).
- Animacja z kotem w kolorach cyfry „6” zaobserwowano znikomą reakcję psów albo jej brak.

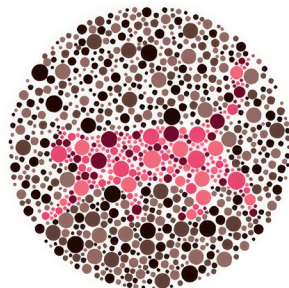
Na podstawie tych wyników sugeruje się, że zabawki dla psów w kolorach żółto-niebieskich są bardziej atrakcyjne, ponieważ odpowiadają one lepiej ich zdolnościom widzenia barw.



Rys.1. Karta numer 22 z tablicy Ishihara opisana w artykule [3]



Rys.2. Kot odtworzony na podstawie cyfry „2” z karty 22 tablicy Ishihary na potrzeby artykułu [3]



Rys.3. Kot odtworzony na podstawie cyfry „6” z karty 22 tablicy Ishihary na potrzeby artykułu [3]

Jak wiemy, człowiek i małpa mają wspólnego przodka. Naukowcy na Uniwersytecie w Londynie [4] postanowili zbadać, czy oczy małp są podobne do ludzkich. Eksperymenty behawioralne sugerują, że widzenie kolorów u makaków (**małp Starego Świata**) jest trójchromatyczne i bardzo podobne do widzenia człowieka. Pomiary przeprowadzono na siatkówkach ludzkich oraz siatkówkach dwóch różnych gatunków makaków – **makak rezus** (łac. *macaca mulatta*) i **makak jawański** (łac. *macaca fascicularis*). Wyniki pokazują, że makak rezus nie posiada czopków wrażliwych na barwę niebieską, zaś makak jawański jest trójchromatą. Ilość czopków czerwonych i zielonych obu gatunków makaków była podobna do tej zmierzonej u człowieka. Widzenie barwne zależy zatem również od gatunku zwierzęcia.

Z kolei badacze z Centrum Medycznego Uniwersytetu Nebraska Omaha [1] wywnioskowali, że widzenie barwne zależy również od płci, czego przykładem są **małpy Nowego Świata**. Małpy tego samego gatunku, w zależności od płci, mogą widzieć dwubarwnie (samce) albo trójbarwnie (samice). Prawdopodobnie, układ wzrokowy jest fundamentalnie modyfikowany u samic trójbarwnych podczas wczesnego rozwoju. Aby to przetestować, naukowcy wszczepili ludzki gen pigmentu czopków L do siatkówki widzącego dwubarwnie dorosłego samca małpy. Gen ten przyjął się, co oznacza to, że siatkówka i mózg małp są zdolne do wykorzystywania informacji z trzech typów czopków, jeśli te są obecne.

### Ptaki

Widzenie barwne u ptaków jest jednym z najbardziej zaawansowanych wśród kręgowców, umożliwiając im dostrzeganie barw w szerszym zakresie spektralnym niż u ludzi. Ptaki są tetrachromatami, co oznacza, że posiadają cztery typy czopków, które zawierają wcześniej wspomniane krople olejowe. Z kolei pigment SWS1 może występować u nich w dwóch formach: UVS (ultrafiolet) oraz VS (fiolet). Dzięki temu mogą widzieć nawet światło ultrafioletowe, co pozwala im na bardziej zróżnicowaną percepcję świata, zwłaszcza w kontekście interakcji społecznych, doboru płciowego i orientacji w przestrzeni [1].

Jednym z najbardziej unikalnych elementów widzenia barwne u ptaków jest obecność podwójnych czopków. Choć nie mamy pewności co do braku ich związku z percepcją barw, uważa się, że pełnią one istotną funkcję w detekcji luminancji i ruchu. Podwójne czopki działają na zasadzie zespołu dwóch fotoreceptorów, z których jeden pełni funkcję głównego, a drugi pomocniczego. Ta złożona struktura pozwala ptakom lepiej wykrywać zmiany w poziomie oświetlenia oraz ruch, co jest istotne w ich naturalnym środowisku oraz w trakcie lotu [1].

Widzenie ultrafioletowe odgrywa istotną rolę w funkcjach społecznych ptaków. **Modraszka zwyczajna** (łac. *cyanistes caeruleus*) wykorzystuje tę zdolność do oceny upierzenia innych osobników, co jest kluczowe w procesie wyboru partnera. **Pawie indyjskie** (łac. *pavo cristatus*) również korzystają z zaawansowanego widzenia barwnego, aby rozróżnić intensywne barwy swoich ogonów, co wpływa na sukces reprodukcyjny – samice preferują osobniki z jaskrawszymi i bardziej kontrastowymi kolorami [5,6].

Z drugiej strony, u niektórych gatunków, takich jak **pingwiny peruwiańskie** (łac. *spheniscus humboldti*), zauważono unikalne przesunięcie czułości pigmentów w stronę niebieskiego spektrum, co odróżnia je od większości innych ptaków. Pingwiny prawdopodobnie nie posiadają jednego z pigmentów SWS, co wpływa na ich zdolność do widzenia barw, szczególnie w środowisku morskim. Z kolei **bobolinki** (wróblowate) nie posiadają czopków niebieskich, ale mają dwa typy czopków LWS [7].

### Gady

Widzenie barwne u gadów jest równie imponujące jak u ptaków, co wynika z obecności czterech typów fotopigmentów: SWS1, SWS2, RH2 oraz LWS, które umożliwiają tetrachromatyczne widzenie barwne. Dzięki tej strukturze gady są w stanie rozróżnić szeroki zakres długości fal, w tym także ultrafiolet (UV). Obecność tego typu czopków pozwala gadom dostosować się do różnych warunków oświetleniowych, zarówno w środowisku lądowym, jak i wodnym [7].

Podobnie jak u ptaków, w siatkówkach gadów występują krople olejowe, które pełnią funkcję filtrów spektralnych. Przykładem może być **żółw chiński** (łac. *geoclemys reevesii*), który posiada aż siedem morfologicznie odrębnych typów czopków, z różnymi pigmentami i kropelkami olejowymi o różnych barwach. Te pigmenty i krople olejowe precyzyjnie dostrajają wrażliwość spektralną czopków, pozwalając na rozróżnianie szerokiego zakresu długości fal, w tym ultrafioletu, co jest szczególnie istotne w zróżnicowanych warunkach środowiskowych, w których żyją gady. U żółwi krople olejowe pozwalają na lepsze widzenie pod wodą, gdzie światło jest rozproszone, co jest szczególnie przydatne podczas poszukiwania pożywienia lub orientacji w przestrzeni [1,5].

### Płazy

Widzenie barwne u płazów jest bardziej zróżnicowane i złożone, niż można by przypuszczać. One również mają cztery typy czopków, jednak nie mają kropli olejowych w swojej strukturze. Płazy zazwyczaj żyją w środowiskach o słabszym oświetleniu, gdzie krople olejowe są zbędne. Co może być zaskakujące, u płazów, znajdziemy również aż dwa typy pręcików: pręciki „czerwone”, które, tak jak u innych kręgowców, zawierają fotopigment RH1 oraz pręciki „zielone”, wykorzystujące zmodyfikowany pigment SWS2. Takie nazewnictwo może być niestety mylące, ponieważ, tak jak wcześniej wspomniano, fotopigment SWS2 jest wrażliwy na fale światła w zakresie niebieskim, natomiast RH1 w zakresie zielonym. Badania wykazały, że **żaby śmieszki** (łac. *pelophylax ridibundus*) i **ropuchy olbrzymie** (łac. *phinella marina*) mają wyjątkową zdolność do rozróżniania kolorów w warunkach słabego oświetlenia. Mają one możliwość opierania się na sygnałach z dwóch rodzajów pręcików w warunkach skotopowych, gdzie czopki nie są aktywne [8,9].

### Ryby

Widzenie barwne u ryb zależy od tego, na jakich głębokościach wody żyją i jakie panują w niej warunki oświetleniowe. Niektóre gatunki ryb widzą w szerokim spektrum barw, w tym ultrafiolet. Taki układ jest powszechny u **ryb karpioatych**, które mają aż cztery rodzaje czopków – SWS1, SWS2, Rh2, LWS. Podobny zestaw fotoreceptorów występuje w rodzinie **ryb łososiowatych** [10]. Ciekawą percepcję postrzegania kolorów mają **ryby głębinowe**, które żyją na dużych głębokościach w oceanach, morzach, a rzadziej jeziorach. Ich układ wzrokowy musiał się przystosować do warunków, w jakich żyją, ponieważ światło na głębokości jest zredukowane do wąskiego pasma w niebieskim

zakresie widma i to o znacznie zmniejszonej intensywności. Ryby takie mają siatkówkę zaopatrzoną w same pręciki, z rodopsyną wrażliwą na odcienie błękitu [11]. Ryby mają również krople olejowe, czego przykładem jest **danio przegowany** (łac. *danio rerio*) z rodziny ryb karpioatych. Są one zawarte w czterech rodzajach czopków, które posiada ta ryba [1].

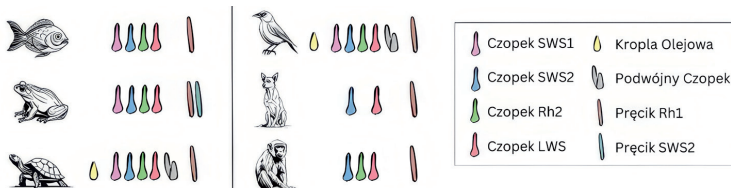
### Skorupiaki (bezkęgowce)

W królestwie zwierząt niewątpliwie najbardziej bogatym w ilość czopków układem wzrokowym dysponują **krewetki modliszkowe** (łac. *odontodactylus scyllarus*) z grupy skorupiaków. Mają one aż 12 różnych typów fotoreceptorów (R8, R8, R8 R1D, R4D, R1P, R4P, R2D, R2P, R3D, R3P), z których każdy z nich pobiera wąskie pasmo długości fali od głębokiego ultrafioletu (o długości fali około 300 nm) do dalekiej czerwieni (ok. 720 nm). Pozwala im to rozróżniać nie tylko kolory, ale i też światło spolaryzowane liniowo i kołowo. Badania przeprowadzone przez Thoena i innych wykazały, że skanujące ruchy oczu krewetek mogą generować sygnał czasowy dla każdej czułości widmowej, umożliwiając tym samym rozpoznawanie kolorów [12]. W układzie tym 12 różnych czułości jest przekształcanych na wzór czasowy podczas skanowania danego obiektu. System ten jest porównywalny do analizatorów liniowo widmowych, które wykorzystywane są w mechanizmach teledetekcyjnych.

### Podsumowanie

**Ssaki** są głównie dichromatami, ale wyjątkiem są **małpy Starego Świata**, które mogą być trójchromatyczne. **Ptaki** są tetrachromatami, widzą szerokie spektrum barw, w tym ultrafiolet, dzięki czopkom i kropelkom olejowym w siatkówkach. **Gady** również posiadają tetrachromatyczne widzenie, wspierane przez krople olejowe, co umożliwia im percepcję barw w intensywnym świetle. **Płazy** polegają na interakcjach między dwoma rodzajami pręcików i czterech czopków, co pozwala im widzieć barwy, nawet w słabym oświetleniu. **Ryby** w zależności od tego, w jakich warunkach oświetleniowych żyją, mogą mieć bardzo szerokie spektrum widzenia barwnego, zahaczające o widzenie w spektrum UV, ale mogą mieć też same pręciki z rodopsyną.

Chociaż mamy dostęp do bezpośrednich badań nad siatkówką, procesy przetwarzania obrazu przez różne gatunki pozostają dla nas mniej dostępne i zrozumiałe, głównie dlatego, że nasze własne doświadczenia wizualne ograniczają nasze podejście badawcze. Nasz układ wzrokowy jest stosunkowo uboższy w porównaniu z niektórymi gatunkami zwierząt, jak płazy czy ptaki. W związku z tym percepcja wzrokowa, którą przypisujemy zwierzętom, często opiera się na naszych własnych ograniczeniach, co może prowadzić do błędnych założeń.



Rys. 4. Schemat podsumowujący występowanie fotoreceptorów i ich fotopigmentów u kręgowców

### Piśmiennictwo

1. W.B. Thoreson, D.M. Dacey. Diverse Cell Types, Circuits, and Mechanisms for Color Vision in the Vertebrate. *Retina Physiological Reviews* 2019; 1527
2. P.E. Miller, DVM, and Ch.J. Murphy DVM, PhD. *Vision in dogs*. 1995.
3. M. Siniscalciji, S. D'Inigo, S. Fornellil-Angelo-Quaranta. *Are dogs red-green colour blind?* 2017
4. J.K. Bowmaker. *Visual pigments and colour vision in man and monkeys*. 1981; 348
5. D. G. Stavenga, B. D Wilts. Oil droplets of bird eyes: microlenses acting as spectral filters. *Phil. Trans. R. Soc. B* 2014
6. M. Vorobyev. Coloured oil droplets enhance colour discrimination. *Proc. R. Soc. Lond. B*. 2003.
7. D. Osorio, M. Vorobyev. A review of the evolution of animal colour vision and visual communication signals. *Vision Research* 2008
8. L.A. Astakhova, A.D. Novoselov, M.E. Ermolaeva, M.L. Firsov, A.Y. Rotov. Phototransduction in Amphibian Green Rods: Sources of Their High Sensitivity. *International Journal of Molecular Sciences* 2021
9. C.A.M. Yovanovich, S.M. Koskela, N. Nevala, S.L. Kondrashev, A. Kelber, K. Donner. The Dual Rod System of Amphibians Supports Colour Discrimination at the Absolute Visual Threshold. *Journal of Experimental Biology* 2021.
10. J.K. Bowmaker. *Evolution of colour vision in vertebrates*. 1998; 541
11. J.K. Bowmaker. *The visual system of fish*. 1990; 81
12. H. H. Thoena, M. J. How, Tsyrr-Huei Chiou, J. Marshall. *A Different Form of Color Vision in Mantis Shrimp*. 2014; 411