

## SPALVŲ SUVOKIMO KONSTANTIŠKUMAS: EMPIRINIS TYRIMAS IR MATEMATINIS MODELIS

V. VILIŪNAS, H. VAITKEVIČIUS,  
J. KULIKOWSKI, A. ZANAIB

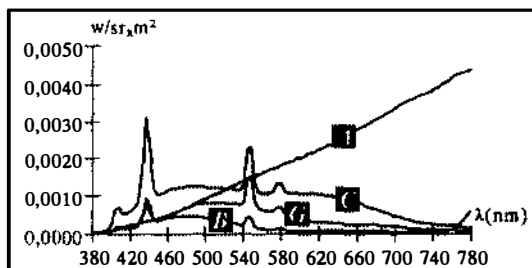
Spalvų konstantiškumas apibūdina savybę suvokti objekto spalvą nepriklausomai nuo apšvietėjo spektro (spalvos). Šio reiškinio paaiškinimui pasiūlyta daug tiesinių ir netiesinių teorinių modelių [1, 2, 4, 8, 11]. Spalvinių koordinačių tiesinė transformacija (fon Kriso koeficientai) buvo pasiūlyta dar 1905 m. [11], tačiau vėlesni darbai [4, 8] parodė, kad šis modelis nepilnai atitinka eksperimentų rezultatus. Minėtuose darbuose spalvų konstantinį suvokimą buvo bandoma paaiškinti remiantis tik adaptaciniais procesais receptoriuose, modifikuojančiais receptorių jautrumą. Kita vertus, šie procesai aprašomi tik vieno tipo tiesiniais operatoriais – ištempimo/suspaudimo operatoriais. Taigi nenagrinėjami procesai, susiję su kito tipo tiesiniais operatoriais, o būtent, visai nenagrinėjami posūkio operatoriai, kurie galėtų reikšti spalvinių koordinačių posūkį.

Šio darbo tikslas – patikrinti, ar galima spalvų suvokimo konstantiškumą paaiškinti tiesiniu modeliu, įskaitant tiek adaptacinius pokyčius receptoriuose, tiek spalvinio kontrasto reiškinius, tiek ir spalvinių koordinačių posūkius. Šiame straipsnyje mes siūlome tiesinį modelį spalvų konstantiškumui įvertinti. Remiantis gautais matavimų rezultatais, nustatytas tiesinės transformacijos operatorius ir atlikta jo analizė. Parodyta, kad ši tiesinė transformacija skiriasi nuo transformacijos, kuri aprašo receptorių jautrumo kitimą fon Kriso koeficientais.

### Metodika

*Tiriamieji.* Empiriniai matavimai buvo atlikti Mančesterio universiteto Psichologijos fakulteto Regos tyrimų laboratorijoje. Eksperimente dalyvavo šeši tiriamieji, kurių spalvinis regėjimas buvo normalus.

**Aparatūra.** Tiriamojo regėjimo laukas buvo padalintas į dvi puses. Kiekvieną regėjimo pusę galima buvo apšviesti atskirai. To pasiekama padedant specialiai pusiau pertvertai dėžei. Dėžės sienelės padengtos neatspindinčia šviesos juoda medžiaga. Dalis matomosios sienelės padengta pilkos spalvos popieriumi (N9 pagal Munsello spalvų katalogą [6]). Ši spalva sudaro foną, kuriame matomi spalvoti Munsello pavyzdėliai. Dešinėje dėžės pusėje įrengtas standartinis C apšvietimo šaltinis, kuris atitinka dienos šviesos apšvietimą [10]. Kairės pusės apšvietimą galima buvo keisti. Šiai pusei apšviesti naudoti trys apšvietimo šaltiniai: standartinis apšvietimas A [10] ir du nestandartiniai apšvietimo šaltiniai, kuriuos sąlygiškai vadiname žalsvos spalvos apšvietimu G ir mėlsvos spalvos apšvietimu B. Visų naudotų apšvietimo šaltinių spektrai parodyti 1 paveiksle ir pažymėti raidėmis A, B, C ir G. Atspindėtos nuo pavyzdėlių šviesos spektrinė sudėtis buvo matuojama specialiu prietaisu – “Minolts” spektrofotometru PR650.



1 pav. Apšvietimų A, G, B, C spektrai

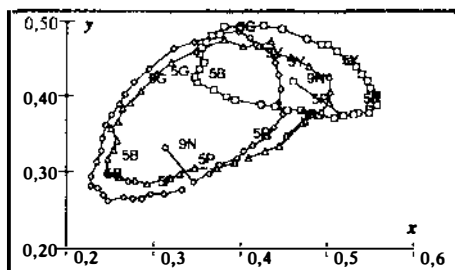
**Tyrimo eiga.** Matavimai buvo atliekami tamsiame kambaryje – vieninteliai apšvietimo šaltiniai – tai naudojami dėžėje apšvietimo šaltiniai. Vienu metu tiriamasis galėjo matyti tik dešinę arba kairę dėžės dalį (nematoma dalis buvo uždengiama specialia pertvara). Prieš kiekvieną matavimą tiriamasis 10 sekundžių buvo visiškoje tamsoje. Po to tiriamasis turėjo 1 minutę stebėti dešinę dėžės dalį, kur jis matė testinį pavyzdėlį neutraliame fone (N9), apšviestą šviesos šaltiniu C, o po to trumpam jam buvo rodoma kairioji dėžės dalis, kur tokia pačia fone jis matė testinį Munsello pavyzdėlį, apšviestą vienu iš šviesos šaltinių: A, G arba B. Tiriamasis turėjo atlikti tokią užduotį – dešinės dėžės dalyje kiek galima greičiau parinkti iš Mun-

sello spalvų katalogo [6] tokį pavyzdėlį, kuris jam atrodytų tokios pat spalvos, kaip ir testinis pavyzdėlis kairėje dėžės dalyje, apšviestas A, B arba G šaltiniais.

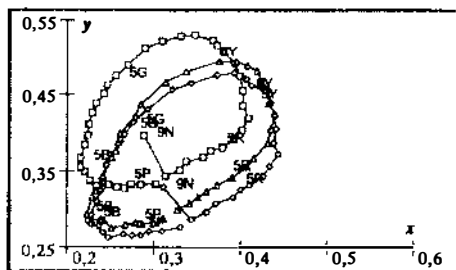
Matavimai buvo kartojami prie 40 skirtingų vienodo sodrumo testinių pavyzdėlių, kurių tonas pagal Munsellą P, PB, B, BG, G, GY, Y, YR, R, RP (2,5 P, 5 P, 7,5 P, 10 P ir t. t.), ryškumas lygus 7, o sodrumas buvo parinktas lygus 8 arba 4 (taigi buvo naudojama 80 pavyzdėlių). Po to buvo išmatuoti visų pavyzdėlių spektrai prie apšvietimų C, A, G, B ir, panaudojant žinomą metodiką [4], paskaičiuotos pavyzdėlių spalvinės koordinatės.

### Matavimų rezultatai

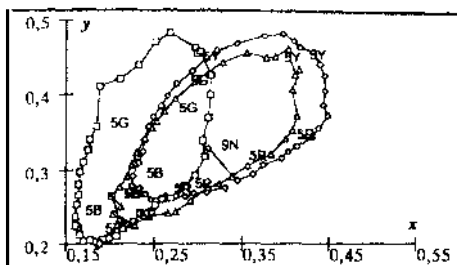
Šešių tiriamųjų atsakymai, gauti eksperimento metu, suvidurkinti ir pa-vaizduoti 2, 3, 4 pav. spalvinių koordinatė x, y CIE 1931 sistemoje.



2 pav. 40 Munsello testinių pavyzdėlių spalvinės koordinatės: —◆— prie C apšvietimo, —■— prie A apšvietimo, —▲— parinktos lyginimo procedūros metu



3 pav. 40 Munsello testinių pavyzdėlių spalvinės koordinatės: —◆— prie C apšvietimo, —■— prie G apšvietimo, —▲— parinktos lyginimo procedūros metu



4 pav. 40 Munsello testinių pavyzdėlių spalvinės koordinatės: —◆— prie C apšvietimo, —■— prie B apšvietimo, —▲— parinktos lyginimo procedūros metu

Spalvinės koordinatės, pažymėtos, —◆—, —■—, atitinka fizines tų pačių Munsello pavyzdėlių koordinates prie C apšvietimo (pažymėjimas —◆—) ir A, G arba B apšvietimo (pažymėjimas —■—). Spalvinės koordinatės, pažymėtos —▲—, atitinka tuos atvejus, kai tiriamasis parinkdavo tokius Munsello pavyzdėlius, kurie jam atrodė tokios pačios spalvos, kaip ir testiniai pavyzdėliai, apšviesti A, G arba B šaltiniais. Nors paveiksluose pateikti rezultatai, kai pavyzdėlių sodrumas buvo didelis, t. y. lygus 8, tačiau analogiški rezultatai buvo gauti ir prie mažesnio sodrumo – 4.

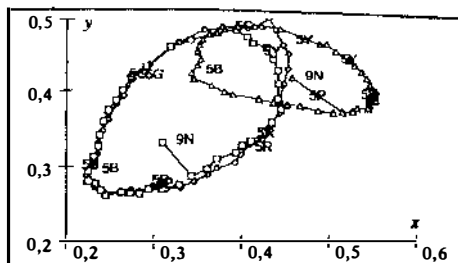
### Matematinis modelis

Atliktame eksperimente matyti stiprus spalvų suvokimo konstantiškumo efektas. Spalvų suvokimo konstantiškumui paaiškinti yra pasiūlyta keletas modelių [1, 2, 4, 8]. Pastaraisiais metais buvo iškelta hipotezė, kad spalvų suvokimo konstantiškumą reikia aiškinti netiesiniais procesais [1, 4]. Mūsų tikslas buvo patikrinti, ar gautus rezultatus galima aiškinti tiesiniais procesais, ir jeigu galima, tai kuo skiriasi tokius procesus aprašantis tiesinis operatorius nuo anksčiau nagrinėtų. Tokiam operatoriui rasti galima būtų panaudoti gautus matavimo rezultatus. Palyginę C ir A kreives (2 pav.), C ir G kreives (3 pav.) bei C ir B kreives (4 pav.), akivaizdžiai matome, kad tų pačių pavyzdėlių spalvinės koordinatės, jeigu jas vertintų prietaisais, la-

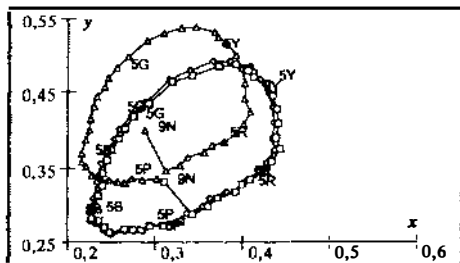
bai priklausytų nuo apšvietėjo spektro (“spalvos”). Tačiau žmogus suvokia šiuos pavyzdžius kaip panašius.

Jeigu regos sistemoje vykėtų procesai, kurių dėka kreivės A, G ir B būtų transformuojamos į kreivę C, tai tokia regos sistema pasižymėtų idealiu spalvų suvokimo konstantiškumu. Šią idėją panaudojome mūsų uždaviniui spręsti. Taigi ieškujome tokių tiesinių operatorių, kurie transformuotų pavyzdžių prie apšvietimo A, G arba B spalvines koordinates į tų pačių pavyzdžių prie apšvietimo C spalvines koordinates. Tai ir yra “idealaus konstantiškumo” sąlyga. Siūlomas toks tiesinio operatoriaus nustatymo būdas. Pasirenkame tris poras taškų (tris spalvas), kurie nustatytų trijų pavyzdžių spalvas prie dviejų skirtingų apšvietimų. Jeigu šie trys taškai nėra vienoje tiesėje, tai galima surasti tiesinį operatorių, kuris perversėtų trijų pavyzdžių taškus prie vieno apšvietimo (pavyzdžiui, prie A apšvietimo) į tris tų pačių pavyzdžių taškus prie kito apšvietimo (C apšvietimo) (be abejo, tokių taškų yra daug – detalesnis skaičiavimo metodas aprašytas straipsnio priede). Suradus tokį tiesinį operatorių, kuris užtikrina “idealų konstantiškumą” tik trimis spalvoms, kyla klausimas, kiek toks operatorius tinka likusių 37 (arba net 77 – įskaityti ir 40 mažesnio sodrumo pavyzdžiai) spalvų suvokimui aprašyti. Norėdami atsakyti į šį klausimą mes patikrinome, kaip toks operatorius transformuoja kitas 37 (arba 77) spalvas.

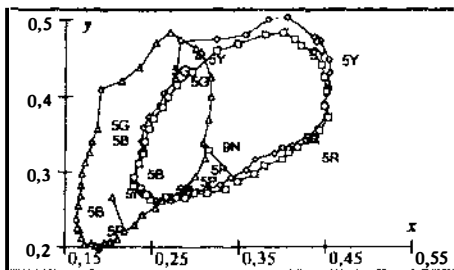
**Skaičiavimo rezultatai.** Suradus anksčiau aprašytu metodu tiesinius operatorius, paskaičiuota, kaip transformuojamos visos 40 Munsello pavyzdžių spalvinės koordinatės prie apšvietimų A, G, B. Gauti rezultatai pavaizduoti 5, 6, 7 paveiksluose. Kaip matyti, paskaičiuotas tiesinis operatorius tiksliai transformuoja pavyzdžių spalvines koordinates, nustatytas prie A, B ir G apšvietimų į tų pačių pavyzdžių spalvines koordinates, nustatytas prie dienos apšvietimo C (palygink 2, 3, 4 pav. ir 5, 6, 7 pav.). Buvo atlikti ir panašūs skaičiavimai, kaip tie patys tiesiniai operatoriai transformuoja mažesnio sodrumo (4) pavyzdžių spalvines koordinates. Ir šiuo atveju surasta transformacija tiksliai perveda pavyzdžių spalvines koordinates prie vieno apšvietimo (A, B arba G) į spalvines tų pačių pavyzdžių koordinates, išmatuotas prie dienos apšvietimo (t. y. šis operatorius užtikrina beveik idealų spalvų suvokimo konstantiškumą).



5 pav. 40 Munsello testinių pavyzdėlių spalvinės koordinatės: —■— prie C apšvietimo, —▲— prie A apšvietimo, —◆— paskaičiuotos naudojant tiesinį operatorių



6 pav. 40 Munsello testinių pavyzdėlių spalvinės koordinatės: —■— prie C apšvietimo, —▲— prie G apšvietimo, —◆— paskaičiuotos naudojant tiesinį operatorių



7 pav. 40 Munsello testinių pavyzdėlių spalvinės koordinatės: —■— prie C apšvietimo, —▲— prie B apšvietimo, —◆— paskaičiuotos naudojant tiesinį operatorių

### Rezultatų aptarimas

Palyginus tyrimų rezultatus, pavaizduotus 2, 3, 4 pav., su teorinių skaičiavimų rezultatais, pavaizduotais 5, 6, 7 pav., matome, kad rezultatai nedaug skiriasi: suminis kvadratinis nuokrypis neviršija 5–6 proc. Remiantis pateiktais skaičiavimo rezultatais, galima sakyti, kad rastas tiesinis operatorius „užtikrina“ beveik „idealų“ konstantinį spalvų suvokimą – skaičiuotos pavyzdėlių spalvinės koordinatės prie A, B ir G apšvietimų beveik sutampa su pavyzdėlio spalvinėmis koordinatėmis prie C apšvietimo. Tačiau detalesnė gautų rezultatų analizė rodo, kad matome pavyzdėlių paskaičiuotų spalvinių koordinatinių poslinkių link apšvietimo šaltinio spalvinių koordinatinių, tai yra turime nuokrypį nuo „idealaus“ konstantiškumo. Lyginant su eksperimentiniais rezultatais, gautais kitų autorių [8], galima daryti išvadą, kad šis poslinkis priklauso nuo sąlygų, kuriomis buvo atlikti matavimai.

Kyla klausimas, kuo skiriasi mūsų paskaičiuotas tiesinis operatorius nuo kitų autorių paskaičiuoto tiesinio operatoriaus [4]. Mes nustatėme, kad mūsų paskaičiuotas tiesinis operatorius yra dviejų operatorių – posūkio ir ištempimo – sandauga. Kiti autoriai nagrinėdavo tik tuos operatorius, kurie aprašo adaptacinius poveikius receptorių lygyje arba sąveikas, susijusias su simultaniniu kontrastu [4, 5, 7]. Šie operatoriai atlieka tik spalvinės erdvės ištempimą ar suspaudimą. Tada posūkio operatorius nenagrinėjamas. Tačiau mūsų atveju posūkio operatoriaus negalima ignoruoti. Šis operatorius reiškia, kad spalvines koordinates būtina pasukti, t. y. jis rodo, kad spalvų konstantiškumas negali būti paaiškintas vien tik procesais, susijusiais su fon Kriso adaptacijos koeficientais arba sąveikomis, aprašančiomis simultaninį kontrastą.

Gauti rezultatai leidžia formuluoti keletą hipotezių apie neurofiziologinius spalvų konstantiškumo mechanizmus. Ištempimo operatorius gali būti susijęs su dviem procesais – adaptaciniais procesais, vykstančiais receptoriuose ir keičiančiais jų jautrumą, ir simultaniniu kontrastu, kurio dėka vyksta fono spalvos įvertinimas. Posūkio operatorius gali vykti ne receptoriame, o aukštesniame lygyje ir sietis su spalvinių koordinatinių posūkiu, t. y. oponentinių ląstelių savybių transformavimu. Tai iš dalies yra patvirtinta ir kitų autorių atliktais neurofiziologiniais eksperimentais [3, 9]. Šie

eksperimentai leido išskirti dvi žievės zonas. Pirmoje zonoje rasti neuronai, kurie nustato atspindėtos nuo objekto paviršiaus šviesos spalvą, t. y. šių neuronų atsakai priklauso tiek nuo objekto paviršiaus spalvos, tiek ir nuo apšvietėjo spektro (spalvos). Šioje zonoje nėra neuronų, kurių atsakai nepriklausytų nuo apšvietėjo spektro, t. y. jų atsakai neturi "spalvų konstantiškumo" savybių. Antroje zonoje yra neuronai, kurių atsakai priklauso tik nuo objektų paviršiaus spalvos ir nepriklauso nuo apšvietėjo spektro.

### Išvados

1. Esant trimis skirtingiems apšvietimams A, G ir B matyti aiškius spalvų suvokimo konstantiškumas.

2. Parodyta, kad stebimą efektą galima paaiškinti tiesiniais procesais, vykstančiais regos sistemoje.

3. Gautas tiesinis operatorius yra dviejų operatorių – posūkio ir ištempimo – sandauga.

### Priedai

#### 1. Tiesinio operatoriaus nustatymas

Tarkime, kad esant idealiam konstantiškumui stebėtojo parinktų pavyzdėlių spalvinės koordinatės  $X'$ ,  $Y'$ ,  $Z'$  prie bet kokio apšvietimo sutaps su spalvinėmis koordinatėmis  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  prie standartinio C apšvietimo (dienos šviesos apšvietimo). Pavyzdėlių spalvinės koordinatės  $X_s$ ,  $Y_s$ ,  $Z_s$  prie apšvietimo  $S(\lambda)$  (apšvietimai A, G, B) transformuojamos į pavyzdėlių spalvines koordinatas  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  prie C apšvietimo tiesiniu operatoriumi P:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix} \quad (1).$$

Jeigu naudojama bet kokia spalvinių koordinatinių sistema surišta tiesiniu transformacijos operatoriumi M:



$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = M^{-1}PM \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ X_s \end{bmatrix} \quad (2),$$

operatoriai P ir  $M^{-1}PM$  yra ekvivalentiški, todėl rezultatai nepriklausys nuo pasirinktos spalvinių koordinačių sistemos (jeigu jos tiesiškai surištos). Toliau nagrinėjimui mes pasirinkome CIE 1931 spalvinių koordinačių sistemą, kadangi ji leidžia geriau atvaizduoti gautus rezultatus.

Operatorius P randamas iš šios išraiškos:

$$P = \begin{bmatrix} X_1 & X_2 & X_3 \\ Y_1 & Y_2 & Y_3 \\ Z_1 & Z_2 & Z_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{1s} & X_{2s} & X_{3s} \\ Y_{1s} & Y_{2s} & Y_{3s} \\ Z_1 & Z_2 & Z_3 \end{bmatrix}^{-1} \quad (3),$$

kur:  $X_n, Y_n, Z_n$  – parinktų pavyzdėlių spalvinės koordinatės prie C apšvietimo ir  $X_{ns}, Y_{ns}, Z_{ns}$  – tų pačių pavyzdėlių spalvinės koordinatės prie  $S(\lambda)$  apšvietimo ( $n=1, 2, 3$ ).

Tiesinis operatorius paskaičiuotas iš pavyzdėlių 10R7/8, 5G7/8, 7,5PB7/8 spalvinių koordinačių – taip skaičiuojant minimizuojamos transformacijos paklaidos. Žemiau pateikiamos paskaičiuotų operatorių išraiškos (1 lentelė):

### 1 lentelė

2. Tiesinio operatoriaus išskaidymas į posūkio ir ištempimo operatorius ir jų sandauga

A apšvietimo			G apšvietimo			B apšvietimo		
0,3334	0,1415	0,5425	2,9097	-0,4080	0,0739	11,3602	-1,0331	-1,1250
-0,3617	1,0199	0,2819	0,6108	1,5015	-0,0846	4,4210	3,8192	-0,6959
0,1811	-0,3469	3,0773	0,1718	-0,2354	2,6891	-0,2164	-0,4574	3,5200

Operatorius P išskaidytas į du operatorius – posūkio operatorių Q ir poslinkio operatorių R (matricos QR skaidymas [12]). Rezultatai pateikti 2 lentelėje.

## 2 lentelė

A								
Operatorius Q			Operatorius R			Operatorius P		
0,6361	0,7586	-0,1410	0,5242	-0,7336	1,2138	0,3334	0,1415	0,5425
-0,6900	0,6410	0,3363	× 0,0000	0,8015	0,2335	= -0,3617	1,0199	0,2819
0,3455	-0,1166	0,9312	0,0000	0,0000	2,8837	0,1811	-0,3469	3,0773
G								
Operatorius Q			Operatorius R			Operatorius P		
0,9770	-0,1950	-0,0859	2,9780	-0,1042	0,2100	2,9097	-0,4080	0,0739
0,2051	0,9699	0,1315	× 0,0000	1,5702	-0,4893	= 0,6108	1,5015	-0,0846
0,0577	-0,1461	0,9876	0,0000	0,0000	2,6383	0,1718	-0,2354	2,6891
B								
Operatorius Q			Operatorius R			Operatorius P		
0,9318	-0,3622	-0,0248	12,1920	0,4304	-1,3630	11,3602	-1,0331	-1,1250
0,3626	0,9252	0,1123	× 0,0000	3,9595	-0,6363	= 4,4210	3,8192	-0,6959
-0,0177	-0,1136	0,9934	0,0000	0,0000	3,4464	-0,2164	-0,4574	3,5200

## Literatūra

1. Courtney S. M., Finkel L. H., Buchsbaum G. Network Simulations of Retinal and Cortical Contributions to Colour Constancy // *Vision Res.* 1995. Vol. 35 P. 413-434.
2. Guth B. L. Model for Colour Vision and Light Adaptation // *J. Opt. Soc. Am. A.* 1991. Vol. 8. P. 976-993.
3. Lennie P., Krauskopf J., Sclar D. Chromatic Mechanisms in Striate Cortex of Macaque // *J. Neuroscience.* 1990. Vol. 10. P. 649-669.
4. Lucassen M. P., Walraven J. Quantifying Colour Constancy: Evidence for Nonlinear Processing of Cone-Specific Contrast // *Vision Res.* 1993. Vol. 33. P. 739-757.
5. McCann. Rules for Colour Constancy // *Ophthal. Physiol. Opt.* 1992, Vol. 12. P. 175-177.
6. Munsell Book of Colour-mate Finish Collection. Baltimore: Munsell Colour Corporation.
7. Webster M. A., Mollon J. Colour Constancy Influenced by Contrast Adaptation // *Nature.* 1995. Vol. 373. P. 694-698.
8. Wyszecki G., Stiles W. S. *Colour Science.* 1982.
9. Zeki S. A Century of Cerebral Achromatopsia // *Brian,* 1990. Vol. 113. P. 1721-1777.

10. Джадд Д., Вышецки Г. Цвет в науке и технике. Москва: Мир, 1978.
11. Максимов В. В. Трансформация цвета при изменении освещения. Москва: Наука, 1984.
12. Хорн Р., Джонсон Ч. Матричный анализ. Москва: Мир, 1989.

## **CONSTANCY OF COLOUR PERCEPTION: EMPIRICAL INVESTIGATION AND MATHEMATICAL MODEL**

V. VILIŪNAS, H. VAITKEVIČIUS,  
J. KULIKOWSKI, A. ZANAIB

### **Summary**

The method to estimate the color constancy is suggested. The experimental results confirm the hypothesis of color constancy linear model. The linear operator calculated from the chromaticity coordinates of three chips under two different illuminations. The analysis of this linear operator is performed to clear up the physiological mechanism.