

LATVIJAS UNIVERSITĀTE



PROMOCIJAS DARBS

Psihofizikāla pseidoizohromatiska testa izveide un krāsu izšķirtspējas
slietkšņa novērtējums

Nozare: Fizika

Apakšnozare: Medicīniskā fizika

Zinātniskā grāda pretendente: **Kaiva Juraševska**

Doktora darba vadītājs: profesors, *Dr. habil. phys.* **Māris Ozoliņš**

Rīga

2015

Promocijas darbs izstrādāts Latvijas Universitātes Fizikas un Matemātikas Fakultātes Optometrijas un redzes zinātnes nodaļā laika posmā no 2011. līdz 2015. gadam.

Darbs sastāv no piecām nodaļām, literatūras saraksta un pieciem pielikumiem, ir uzrakstīts datorsalikumā uz 96 lapaspusēm, satur 49 attēlus, 35 formulas un 2 tabulas.

Darba forma: disertācija fizikas nozarē, medicīniskās fizikas apakšnozarē.

Darba zinātniskais vadītājs:

Dr. habil. phys. **Māris Ozoliņš**, profesors, Latvijas Universitāte; Redzes uztveres laboratorijas vadītājs, vadošais pētnieks, Latvijas Universitātes Cietvielu Fizikas Institūts.

Darba recenzenti:

1) *Dr. habil. phys.* **Linards Skuja**, Amorfo materiālu spektroskopijas laboratorijas vadītājs, vadošais pētnieks, Latvijas Universitātes Cietvielu Fizikas Institūts.

2) *Dr. phys.* **Aleksejs Kataševs**, profesors, dekāna vietnieks zinātniskajā darbā, Rīgas Tehniskā Universitāte.

3) *Dr. habil. psych.* **Galina Paramei**, psiholoģijas profesore, Liverpūles Cerību Universitāte, Apvienotā Karaliste.

Promocijas darba aizstāvēšana notiks Latvijas Universitātes Fizikas, astronomijas un mehānikas zinātņu nozares promocijas padomes atklātajā sēdē 2015. gada 29. jūnijā pulksten 14:00 Zeļļu ielā 8, 233. telpā.

Ar promocijas darbu un tā kopsavilkumu var iepazīties Latvijas Universitātes Bibliotēkā Rīgā, Kalpaka bulvārī 4.

LU Fizikas, astronomijas un mehānikas specializētās promocijas padomes priekšsēdētājs *Dr. habil. phys.* **Ruvins Ferbers**;
padomes sekretāre **Laureta Buševica**.

© Latvijas Universitāte, 2015

© Kaiva Juraševska, 2015

SATURS

ANOTĀCIJA	5
ABSTRACT	6
1. IEVADS	7
1.1. Tēmas aktualitāte	7
1.2. Darba mērķis un uzdevumi	8
1.3. Izmantotās metodes	8
1.4. Darba novitāte	9
1.5. Autores ieguldījums	9
1.6. Aizstāvamās tēzes	10
2. LITERATŪRAS PĀRSKATS	11
2.1. Krāsu redze	11
2.2. Terminoloģija psihofizikā	13
<i>2.2.1. Krāsu izšķirtspējas psihofizikālie mērījumi</i>	14
2.3. Sarkani-zaļais krāsu redzes deficīts	14
2.4. Standartizētu, uz saskaņošanas eksperimentiem balstītu krāsu telpu izstrāde	15
<i>2.4.1. CIE standarta novērotājs</i>	15
<i>2.4.2. CIE xy krāsu diagramma</i>	17
<i>2.4.3. Uztveres ziņā viendabīgāku sistēmu izveide</i>	17
<i>2.4.4. Oponentās krāsu sistēmas</i>	18
2.5. Krāsu izšķirtspējas mainīgums normālas krāsu redzes gadījumā	20
<i>2.5.1. Preretinālie filtri - makulas pigments, acs lēcas dzeltēšana un šūnu novecošana</i>	20
<i>2.5.2. Krāsu izšķirtspējas izmaiņas dzīves laikā</i>	20
<i>2.5.3. Fotopigmenta spektrālās jutības mainīgums normālas krāsu redzes gadījumā</i>	21
<i>2.5.4. Apkārtējās vides un eksperimenta apstākļu ietekme uz krāsu izšķirtspēju</i>	23
<i>2.5.5. Dzimums un krāsu uztvere</i>	24
<i>2.5.6. Spektrālo krāsu (viļņa garumu) izšķirtspēja</i>	25
<i>2.5.7. MakAdamsa un krāsu tolerances elipses</i>	26
<i>2.5.8. Krāsu redze un apgaismojums</i>	27
2.6. Krāsu redzes testu vēsture	29
<i>2.6.1. Konfūzijas līnijas CIE xy krāsu diagrammā</i>	30
<i>2.6.2. Pseudoizohromatisko plašu izveide</i>	31
<i>2.6.3. Pseudoizohromatisko plašu darbības principi</i>	32
<i>2.6.4. Pseudoizohromatisko plašu lietojums dažādos apgaismojuma apstākļos</i>	35
<i>2.6.5. Anomaloskopa darbības principi</i>	36
2.7. Krāsu izšķirtspēja sarkani-zaļā krāsu defekta gadījumā	37
<i>2.7.1. Relatīvā luminances jutība un viļņu garumu izšķirtspēja sarkani-zaļā KRD gadījumā</i>	37
<i>2.7.2. L-tipa un M-tipa vāļišu fotopigmenta ģenētiskās variācijas un krāsu izšķirtspēja</i>	39
3. DARBĀ IZMANTOTĀS METODES	45
3.1. Krāsu redzes pārbaude ar pseudoizohromatiskajām platēm	45
3.2. Krāsu redzes pārbaude ar anomaloskopu	46
3.3. Krāsu redzes pārbaude ar Farnsworth D-15 testu	47
3.4. Pilnā krāsu atšķirība ΔE	47
3.5. Attēlu multispektrālā analīze	49

3.6. Vāļišu atbilžu modelēšana	50
4. REZULTĀTI UN DISKUSIJA	51
4.1. Krāsu piekārtošanas eksperiments un pseidoizohromatiska testa izveide	52
4.1.1. <i>Hromatisko vērtību izraudzīšanās un krāsu pāru ieguve testa izveidei</i>	52
4.1.2. <i>Šablona un testa plates izveide</i>	54
4.2. KAMS testa izdrukas metode un krāsu noturība laikā	55
4.2.1. <i>Paraugu un testa plašu izdrukas metode</i>	55
4.2.2. <i>Izdruku multispektrālo attēlu analīze</i>	56
4.2.3. <i>KAMS testa druka un balēšanas novērtējums</i>	57
4.2.4. <i>Pikseļu datu kopu attēlojošo elipšu centru savstarpējā nobīde balēšanas rezultātā</i>	57
4.2.5. <i>Secinājumi</i>	58
4.3. Paraugu krāsu un konfūziju līniju savstarpējā attiecība	59
4.3.1. <i>Izohromatisko apgabalu mērījumi traucētas krāsu redzes gadījumos</i>	61
4.4. KAMS testa veikspējas novērtējums	62
4.4.1. <i>Vāļišu signālu modelēšana dažādiem traucējuma gadījumiem</i>	62
4.4.2. <i>KAMS testa pārbaude skolēnu populācijā un dalībniekiem ar iepriekš konstatētu sarkani-zaļo krāsu redzes defektu</i>	62
4.4.3. <i>Ar KAMS testa pirmo versiju iegūtais krāsu izšķirtspējas sliekšnis</i>	64
4.4.4. <i>Krāsu izšķirtspējas sliekšnis zemas pakāpes KR D gadījumā un tā korelācija ar RGI</i>	65
4.4.5. <i>Secinājumi</i>	68
4.5. Krāsu izšķirtspējas sliekšņa mērījuma atkārtojamība	68
4.5.1. <i>Dalībnieki</i>	68
4.5.2. <i>KAMS2 testa uzbūve</i>	69
4.5.3. <i>Eksperimenta gaita</i>	70
4.5.4. <i>Krāsu izšķirtspējas sliekšņa rezultātu atkārtojamības analīze</i>	70
4.5.5. <i>KAMS2 krāsu izšķirtspējas sliekšņa izmaiņas, to nosakot atsevišķi ar sārtajām un zaļganajām platēm</i>	71
4.5.6. <i>KAMS2 sliekšnis un citu klīnikā izmantojamo testu rezultāti</i>	72
4.5.7. <i>Secinājumi</i>	73
5. NOBEIGUMS	74
ATSAUCES	75
AUTORES PUBLIKĀCIJU SARAKSTS	80
DALĪBA STATPTAUTISKAJĀS KONFERENCĒS (IZLASE)	81
1. pielikums	83
2. pielikums	91
3. pielikums	92
4. pielikums	93
5. pielikums	95
PATEICĪBAS	96

ANOTĀCIJA

Darba mērķi - izveidot psihofizikālu pseidoizohromatisku testu krāsu izšķirtspējas sliekšņa noteikšanai iedzimta sarkani-zaļā krāsu redzes defekta gadījumā; raksturot krāsu izšķirtspējas sliekšņa pastāvību laikā; kā arī paredzēt krāsu uztveri citu stimulu un testēšanas sistēmu gadījumos.

Darbā tiek aprakstīta pseidoizohromatiska psihofizikāla testa izstrāde. Testa pārbaudei izmantotas vairākas metodes. Pirmkārt, modelētas vāļišu atbildes pie dažādiem traucējuma veidiem un pakāpēm. Otrkārt, testa sniegums ir salīdzināts ar klīnikā izmantotiem testiem – anomaloskopu (standartu krāsu redzes diagnostikā) un Richmond Hardy–Rand–Rittler (HRR) testu. Darbā analizēta testa veiktspēja sarkani-zaļo krāsu redzes traucējumu diagnostikā un gradācijā. Ar izstrādāto testu tika iegūts un analizēts krāsu izšķirtspējas sliekšnis indivīdiem ar krāsu redzes traucējumu, tā izmaiņas laikā, kā arī no iegūtajiem datiem izvirzītas hipotēzes par redzes uztveri.

Salīdzinot divas drukas metodes testa radīšanas nolūkiem (tintes druku (*inkjet*) un fotogrāfisko druku), noskaidrots, ka mazākas krāsu koordināšu izkliedes jeb dispersijas bija novērojamas *inkjet* drukas gadījumā. Testu pārbaudot nejauši izvēlētā skolas vecuma bērnu populācijā ($n = 273$), tika iegūta augsti diagnostiskie rādītāji – jutīgums un specifiskums (ar izraudzīto kritēriju > 1 kļūda) bija attiecīgi 100% un 99,62%; ieguvām vidēji ciešu gradācijas rezultātu sakritību ar klīnikā izmantoto Richmond HRR testu – 55%. Tika secināts, ka ar psihofizikālu pseidoizohromatisku testu iespējams noteikt sarkani-zaļā krāsu redzes defekta klātbūtni un iegūt individuālu krāsu izšķirtspējas sliekšni anomālo trihromātu gadījumā. Katram dalībniekam ar zemas pakāpes krāsu redzes defektu tika atrasts individuāls krāsu izšķirtspējas sliekšnis. Piecās mērījumu reizēs tas nemainījās vairāk kā par divām CIE LAB krāsu atšķirības (ΔE) vienībām. Sliekšņa izmaiņas laikā netika novērotas. Iegūtajiem krāsu izšķirtspējas sliekšņiem ir cieša korelācija ar klīnikā izmantoto testu rezultātiem. Deiteranomālajiem dalībniekiem tika iegūta cieša pozitīva korelācija ($r = 0,92$) starp anomaloskopa AQ un izveidotā testa sliekšni, kā arī starp izveidotā testa sliekšni un pieļauto kļūdu skaitu Richmond HRR testā ($r = 0,92$). Ir izveidots uztveres modelis, kas skaidro indivīdiem ar sarkani-zaļajiem krāsu redzes defektiem neizšķiramās paraugu krāsu vērtību nobīdes no teorētiskajām konfūziju līnijām.

Atslēgas vārdi: Krāsu redze, Psihofizika, Redzes sistēma, Krāsas mērīšana, Traucēta krāsu redze, Krāsu redzes defekti, Krāsu uztvere.

ABSTRACT

Purpose: To (i) develop a printed pseudoisochromatic test for assessment of color discrimination thresholds in individuals with congenital red-green color vision deficiency; (ii) estimate the degree of the deviation of their color discrimination; (iii) predict their color discrimination performance in other color-vision diagnostic tests.

A pseudoisochromatic test was designed using psychophysical approach. Individual color vision discrimination thresholds were measured; their variability across several trials is addressed. For assessment of the test, first, cone responses for both protan and deutan deficiency types and various deficiency severity levels were modeled. Second, performance on the test was compared with that on traditional color vision diagnostic tests – Rayleigh matches (anomaloscope) and the Richmond HRR test. Performance on the test was analyzed with regards to diagnostics of the type and severity of red-green color vision deficiency.

Two printing methods, inkjet print and photographic print, for producing of the test revealed that inkjet printing has a smaller color coordinate dispersion compared to photographic print. The present diagnostic method was tested in a randomly selected school-age children population ($N = 273$) Color discrimination thresholds were specified as ΔE units in the CIELAB chromaticity diagram. For mild deuteranomalous individuals, it was found that the threshold value did not vary significantly ($< 2 \Delta E$ units) across multiple measurements; neither there were significant threshold variations within one-month testing.

Obtained color discrimination thresholds were in solid agreement with outcomes of the two broadly used clinical tests for color vision diagnostics: deuteranomals' color discrimination thresholds strongly correlated with the anomalous quotient assessed using the anomaloscope ($r = 0.92$) and the HRR error scores ($r = 0.92$).

The pseudoisochromatic test shows high diagnostic reliability: its sensitivity and specificity (with the test criterion > 1 error) was 1.0 and 0.9962, respectively. It is concluded that the novel designed pseudoisochromatic test can be reliably employed to diagnose red-green color vision deficiency and, for anomalous trichromats, to obtain individual color saturation discrimination thresholds. A model is developed specifying perceptually acceptable excursions of printed colors from protan and deutan confusion lines.

Keywords: Color vision, Visual system, Psychophysics, Color discrimination thresholds, Varied color vision, Red-green color vision deficiency.

1. IEVADS

Izmainīta krāsu redze skar aptuveni 8% vīriešu un 0,4% sieviešu no eiropeīdās rases. Lielāko daļu no visiem krāsu redzes defektu veidiem veido iedzimta vidējo (M-tipa) viļņu jutības vāļišu un garo (L-tipa) viļņu jutības vāļišu disfunkcija vai pilnīgs funkcijas trūkums (M-tipa vāļišu gadījumā – deitāna defekts, L-tipa vāļišu gadījumā – protāna defekts) (Birch, 1993; Neitz un Neitz 2011). Tā kā šajos gadījumos sadzīvē traucējums visbiežāk izpaužas kā grūtības izšķirt atsevišķas krāsas sarkanā un zaļā elektromagnētiskā starojuma spektra daļā, tad šos defekta veidus apvieno vienā grupā, apzīmējot tos kā **sarkani-zaļos krāsu redzes defektus**. Viens no izplatītākajiem testa veidiem šo traucējumu atklāšanai ir pseidoizohromatiskās (*pseudoisochromatic – PIC*) krāsu plates. Neskatoties, kāds dizains ir izmantots, visu PIC plašu darbība ir balstīta dažādu grupēšanas atbilžu stimulēšanā cilvēkiem ar normālu (trihromātisku) un izmainītu krāsu redzi. Lai varētu izgatavot pseidoizohromatisku plati, fona un stimulu krāsas ir jāizraugās tā, lai CIE *xy* krāsu diagrammā to atbilstošās vērtības atrastos uz vajadzīgā defekta veida **konfūziju līnijām** (Birch, 1993; Smith un Pokorny 1975). Precīzi izvēloties atbilstošās krāsaino simbolu un fona hromatiskās vērtības, iespējams izveidot testus, kuru veikspēju krāsu redzes defektu atklāšanai raksturo ar augstiem specifiskuma un jutības parametriem (vērtības tuvinās 1,0) (Cole, *et al.*, 2006; Cole, 2007). Dažādu defekta pakāpju klasificēšanai izmanto plates ar pieaugošu grūtības pakāpi. Jo mazāka ir pilnā krāsu atšķirība ΔE^*_{ab} (ΔE) krāsu pāriem, kas veido stimulu un fonu, jo grūtāk simbols platē būs ieraugāms. Visbiežāk testi, kas satur PIC plates, **iedala defekta pakāpi** trīs pakāpēs: vājā (*mild*), vidējā (*moderate*) un izteiktā (*severe*).

1.1. Tēmas aktualitāte

Joprojām tiek pētīta redzes uztvere izmainītas krāsu redzes gadījumā, un tiek radīti dažādi jauni testi kvantitatīvai defekta pakāpes novērtēšanai (Barbur, *et al.*, 2008; Rabin, *et al.*, 2011). Pētījumi parāda, ka, izmantojot kalibrētu tintes (*inkjet*) drukāšanas metodi, var panākt augstu PIC plašu hromatisko vērtību precizitāti (Luse, *et al.*, 2012). Meklējot jaunus paņēmienus testu radīšanai, un raksturojot to priekšrocības, nepieciešams arī analizēt izdruku atkārtojamību, kā arī novērtēt izbalēšanas dinamiku. Arī viena veida testa dažādos izdevumos hromatiskās vērtības var nozīmīgi atšķirties, kas savukārt var radīt nobīdes rezultātu interpretēšanā (Lee un Honson, 2003).

Krāsu redzes novērtēšanā zelta standarta tests ir anomaloskops, kas ne tikai diagnosticē krāsu redzes defekta veidu, bet arī klasificē tās pakāpi, raksturojot rezultātu kvantitatīvi. Citi

krāsu redzes testi parasti izmanto kļūdu skaitīšanas metodiku, ko tālāk sasaista ar defekta pakāpi. Kaut arī anomaloskops ir precīzs instruments, iepriekš ir ziņots, ka procedūras rezultāts (un defekta mērs skaitliskās vienībās) - **saskaņošanas apgabals - vāji korelē ar ikdienas uzdevumu rezultātiem** (tādiem kā krāsu izšķirtspēja un virsmu krāsu novērtējums) (Birch, 2008; Baraas, *et al.*, 2010). Tomēr ar anomaloskopu iegūts indivīda saskaņošanas apgabals (*matching range*) bieži tiek izmantots kā mērs krāsu redzes defekta pakāpei (Birch, 1993).

Tātad būtu noderīga jauna testa izveide, kas raksturo individuālo izšķirtspēju kā sliekšņa vērtību, tādu kā pilnā krāsu atšķirība CIE LAB (arī CIE L*a*b*) krāsu telpā, krāsām uz konfūzijas līnijas, kas nepieciešama, lai stimulu izšķirtu no fona. Iepriekš ir ierosināts, ka būtu noderīga tāda testēšanas metodika, kas defekta pakāpi skaitliski aprakstītu kā jutības zuduma daudzumu, salīdzinot ar normālu (trihromātisku) redzi (Smith, *et al.*, 1993).

1.2. Darba mērķis un uzdevumi

Mērķis ir izveidot drukātu **psihofizikālu** pseidoizohromatisku testu krāsu izšķirtspējas sliekšņa noteikšanai iedzimta sarkani-zaļā krāsu redzes defekta gadījumā, raksturot krāsu izšķirtspējas sliekšņa pastāvību laikā, kā arī paredzēt krāsu uztveri citu stimulu un testēšanas sistēmu gadījumos.

Darba uzdevumi:

1) Izveidot drukātu psihofizikālu pseidoizohromatisku testu balstoties uz krāsu saskaņošanas eksperimentu, novērtēt testa veikspēju tā izmantošanai klīniskām vajadzībām un krāsu izšķirtspējas sliekšņa iegūšanai.

2) Raksturot izveidotā testa spēju sīkāk iedalīt un skaitliski novērtēt dalībnieku ar vājas pakāpes krāsu redzes defektu individuālo krāsu izšķirtspēju un krāsu izšķirtspējas sliekšņu mainību laikā.

3) Novērtēt iegūto krāsu izšķirtspējas sliekšņu un citu krāsu redzes testu rezultātu korelāciju.

4) Raksturot protānu un deitānu krāsu izšķirtspējas izmaiņas dažādos attālumos no konfūzijas līnijas, kas iet cauri neitrālajam punktam CIE xy krāsu diagrammā.

1.3. Izmantotās metodes

1) Paraugu piekārtošanas eksperimenti kontrolētos apgaismojuma apstākļos jaunu krāsu redzes testu izstrādei.

2) Izstrādāto krāsu paraugu kolorimetriskie mērījumi, paraugu hromatisko vērtību analīze, multispektrālie uzņēmumi, fotometriskie mērījumi redzes uztveres modelēšanai, krāsām mainoties balēšanas rezultātā.

3) Krāsu redzes defektu diagnostikas iekārta *Oculus HMC anomaloscope* – etalons krāsu redzes novērtēšanā. Citi krāsu redzes novērtēšanas testi – Richmond HRR, Farnsworth D15, *Color Assessment and Diagnosis (CAD)* testa paveids un izstrādātais psihofizikālais pseidoizohromatiskais tests.

4) Multispektrālā iekārta un programnodrošinājums testa plašu multispektrālo uzņēmumu pārveidei par vāļišu atbilžu simulāciju, atbildes uz stimuliem modelēšana atkarībā no vāļišu defekta veida un pakāpes.

1.4. Darba novitāte

1) Ir izveidots **psihofizikāls tests**, kas krāsu redzes defektu raksturo ar izšķirtspējas sliekšņa vērtību fizikāli izmērāmās vienībās (pilnā krāsu atšķirība ΔE). Krāsu izšķirtspējas rezultāti, kas tiek attēloti pilnās krāsu atšķirības vienībās, varētu būt izmantojami un vieglāk interpretējami specifisku darba piedāvājumu gadījumos vai produktu ražošanā (rezultāti ataino krāsu jutības zudumu, salīdzinot ar krāsu izšķirtspēju normālas krāsu redzes gadījumā neitrālajām krāsām).

2) Tests tika izveidots, izmantojot krāsu piekārtošanas eksperimentu, nevis teorētiskās stimula/fona krāsu attiecības.

3) Ir iegūta **dziļāka izpratne** par krāsu uztveri sarkani-zaļā krāsu redzes deficīta gadījumā, individuālajām atšķirībām un krāsu izšķirtspējas sliekšņa nemainīgumu laikā.

1.5. Autores ieguldījums:

Krāsu pāru izveidoja un piekārtošanas eksperimentus veica autore un MSc A. Gūtmane. Abas darbā izmantotās psihofizikālā pseidoizohromatiskā testa (KAMS) versijas izveidoja autore. Testa veiktspēju skolēnu populācijā novērtēja autore ar MSc A. Paušus, BSc B. Zuteses un Dr.Phys. S. Fomina palīdzību. Darbā aprakstīto testa balēšanu analizēja autore. Vāļišu signālus modelēja un multispektrālos attēlus ieguva autore, izmantojot S. Fomina izveidotos algoritmus. Datu iegūvi ar KAMS testa 2. versiju veica BSc A. Livzāne un B. Zutere. Darbā iekļautā datu analīze, attēlu izveide un rezultātu interpretācija ir autores veikums, konsultējoties ar darba vadītāju prof. Dr.Phys. M. Ozoliņu. Publikācijas, uz kurām balstīts darbs, ir autores veikums (ar darba vadītāja palīdzību), vai arī B. Zuteses un autores kopdarbs.

1.6. Aizstāvamās tēzes

1) Balstoties uz krāsu saskaņošanas eksperimentu rezultātiem ir izveidots drukāts psihofizikāls pseidoizohromatisks tests. Tas ir izmantojams individuāla krāsu izšķirtspējas sliekšņa kvantitatīvai noteikšanai abpus neitrālajam punktam CIE xy krāsu diagrammā. Izveidotajam testam raksturīga augsta klīniskā veiktspēja (jutība 100% un specifiskums 99,62% (ar izraudzīto testa kritēriju < 1 kļūda)).

2) Izveidotais tests spēj kvantitatīvi novērtēt individuālu krāsu izšķirtspējas sliekšni zemas pakāpes sarkani-zaļā krāsu redzes defekta gadījumā. Nomērītais krāsu izšķirtspējas sliekšnis CIE LAB pilnās krāsu atšķirības (ΔE) vienībās deiteranomāliem ir laikā nemainīgs lielums.

3) Neskatoties uz pseidoizohromatisko testu un anomaloskopa izveides un darbības principu atšķirībām, nav vērojams uzlabojums defekta pakāpi raksturojošo datu korelācijā starp diviem līdzvērtīgiem pseidoizohromatiskiem testiem (Richmond HRR un jaunais tests) salīdzinot ar testu pāri anomaloskops – jaunais tests.

4) Krāsu saskaņošanas eksperimentos iegūtie rezultāti ļauj izvirzīt hipotēzi, ka stimula piesātinājumam pieaugot, gan protānam, gan deitānam samazinās neizšķiramā stimula krāsu koordināšu vērtību novirze no konfūzijas līnijas, kas iet cauri neitrālajam punktam CIE xy krāsu diagrammā.

2. LITERATŪRAS PĀRSKATS

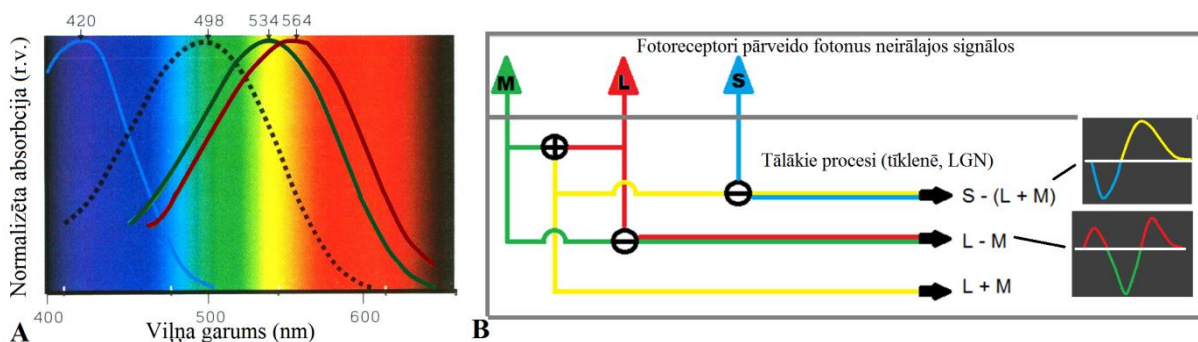
Literatūras pārskats satur sekojošas sadaļas lasītāja sagatavošanai eksperimentālajai daļai. Pirmkārt, īsu ievadu par krāsu redzi un izmantotajiem terminiem psihofizikā, kam seko sarkani-zaļo krāsu redzes defektu raksturojums. Tālāk lasītājs tiek aicināts iepazīties ar stāstījumu par krāsu redzes defektu atklāšanas vēsturi sadaļā, kas ievietota 1. pielikumā. Sekojoši aprakstīta standartizētu, uz redzes sistēmas darbību balstītu krāsu telpu izveide. Nākošā nodaļa veltīta faktoru kopai, kas ietekmē krāsu izšķirtspēju normālas trihromātiskas krāsu redzes gadījumā. Tālāk aprakstīta biežāk izmantoto krāsu redzes testu izveides vēsture un to darbības principi, īpašu uzsvāru liekot uz pseidoizohromātisko testu izveidi un to parametru analīzi. Visbeidzot, literatūras pārskats tiek nobeigts ar krāsu izšķirtspējas analīzi sarkani-zaļā krāsu redzes defekta gadījumā.

2.1. Krāsu redze

Cilvēka acs izšķir elektromagnētisko (EM) starojumu robežās no aptuveni 400 – 700 nm. Viens no parametriem, pēc kā tiek analizēts redzes uztvertais attēls, ir tā dažādu apgabalu krāsa. Par krāsu ir pieņemts saukt kopējo redzes sajūtu, to raksturo trīs ar fizikāliem lielumiem saistīti mainīgie – **tonis** (*hue*) (dominējošais viļņa garums spektrālām krāsām, dominējošais tonis nespektrālo purpura krāsu gadījumā), **piesātinājums** (*saturation*) (vai sajūta ir vairāk monohromātiska vai satur lielu klāstu dažādu viļņa garumu) un **spožums/gaišums** (*intensity/lightness*) (spožums (gaismas avotu gadījumā) ir saistīts ar izstaroto enerģijas daudzumu un gaišums (krāsainu virsmu gadījumā) ir saistīts ar no virsmas atpakaļ atstaroto gaismas daudzumu).

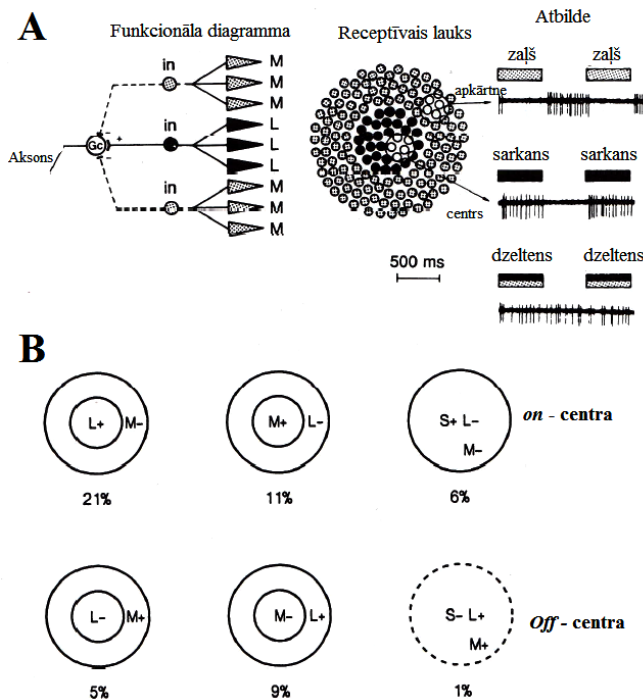
Redzes sajūtu, pirmkārt, nodrošina tīklene, kas sastāv no desmit neirālo šūnu slāņiem (Snell un Lemp, 1998). Pirmais no tiem ir fotoreceptoru slānis. Gaismas receptori ir divu veidu – nūjiņas un vāļītes, kuru nosaukumi cēlušies no to izskata atšķirībām. Krāsu redzi nodrošina trīs tipu vāļītes, nereti neprecīzi sauktas par sarkanajām, zaļajām uz zilajām vāļītēm. Faktiski vāļītes iedala pēc to pigmentu absorbcijas spektriem (2.1. A attēlā) garo viļņu, vidējo viļņu un īso viļņu jutības vāļītes (nereti apzīmētas kā L-tipa, M-tipa un S-tipa vāļītes). Katra tipa vāļīte strādā kā fotonu ķērājs jeb detektors, un tās pigmenta absorbcijas spektrs nosaka, kādas enerģijas (viļņa garuma) fotons tiks „noķerts” ar lielāku vai mazāku varbūtību. Vāļītes atbilde uz ienākošo gaismu ir jā/nē, nevis modulāra rakstura. Tīklēnes fotoreceptoru līmenī tiek nodrošināta primārā attēla apstrāde un pārveide par neirāliem stimuliem (skat. 2.1. B attēlu). Katram indivīdam ir raksturīga atšķirīga vāļīšu proporcionālā

sadalījuma mozaīka, taču vāļišu mozaīkas individuālajām atšķirībām nav būtiskas ietekmes uz krāsu izšķirtspēju.



2.1. attēls. A – relatīvie fotoreceptoru absorbcijas spektri. Ar raustītu līniju apzīmēts nūjiņu absorbcijas spektrs. Attiecīgi ar zilu, zaļu un sarkanu krāsu – īso viļņu, vidējo viļņu un garo viļņu jutības vāļišu absorbciju spektri. Vīrs attēla norādītas absorbcijas spektru orientējošās maksimumu vērtības. Fonā – EM spektra redzamais diapazons. (Snowden, *et al.*, 2012) B – shematiski parādīta vāļišu signālu salīdzināšana, oponences un luminances kanālu veidošanās. Garo viļņu un vidējo viļņu jutības vāļišu izvades summārais produkts veido luminances kanālu, to savstarpējais salīdzinājums – sarkani-zaļo oponento kanālu. Zili-dzelteno oponences kanālu veido luminances kanāla un īso viļņu jutības vāļišu izvades informāciju salīdzināšana. Grafikos attēla labajā pusē oponences mehānismi parādīti kā funkcija no viļņa garuma (300 - 700 nm). Vienādojumi, kas izmantoti funkciju ģenerēšanai ir sekojoši: $r,g(\lambda) = 2,5 S(\lambda) - 3,8 M(\lambda) + 2,5 L(\lambda)$ sarkani zaļā oponences kanāla gadījumā un $y,b(\lambda) = -5,0 S(\lambda) + 0,5M(\lambda) + L(\lambda)$. Vienādojumi no (Backhaus, *et al.*, 1998), attēls autores zīmēts.

Vāļišu atbildes tālākajos tīklenes un kortikālajos līmeņos tiek savstarpēji salīdzinātas un pārvērstas trīs atšķirīgos kanālos. Pirmkārt, dzelteni/zilajā oponences kanālā ($S - (L + M)$), otrkārt, sarkani-zaļajā oponences kanālā ($L - M$) (citos avotos $S - M + L$), un, treškārt, luminances kanālā ($L + M$) (dažos avotos $(L + M + S + N)$ (nūjiņas)), kur ar lielajiem burtiem apzīmēts attiecīgās vāļītes vai nūjiņas signāls. Šī sistēma, ko nodrošina pirmie divi uzskaitītie kanāli, ir pazīstama kā oponentā kodēšana (2.1. B un 2.2. attēli). Oponento procesu klātbūtni mūsu redzes sistēmā apstiprina vienkāršs demonstrējums – vienkāršos apstākļos mēs nevaram iztēloties krāsu, kas būtu zaļgani-sarkana, līdzīgi kā iedomājama nav dzeltenīgi-zila krāsa. Oponento šūnu darbības shēma dota 2.2. attēlā (Backhaus, *et al.*, 1998). Tīklenē atrodamas 65 – 70 dažādu tipu atšķirīgas šūnas, un liela daļa no tām īsteno oponento signālu analīzi (Chalupa, Werner, 2003). Šajā ievadā tiek aplūkota maza daļa no to darbības ganglionāro šūnu un LGN (*lateral geniculate nucleus*) līmenī (Backhaus, *et al.*, 1998).



2.2. attēls. Funkcionāla diagramma, receptīvie lauki un krāsu kodēšana makaku tīklenē. A- L-tipa vāļišu signāls ganglionāro šūnu receptīvā lauka centrā, ko aptver M-tipa vāļišu signāls receptīvā lauka apkārtnē (perifērijā). Sarkanās gaismas spīdināšana receptīvā lauka centrā palielina šūnas atbildi (šī ir *on-centra* tipa šūna, *off-centra* šūnas gadījumā signāls tiktu nomākts, ja to apgaismotu ar sarkanu gaismu). Zaļās gaismas spīdināšana perifērijā nomāc šūnas atbildi un dzeltenās gaismas spīdināšana neizsauc atbildi. B- telpiskā struktūra sešiem biežāk sastopamajiem krāsu-oponento ganglionāro šūnu veidiem un to sastopamības biežums. (Backhaus, *et al.*, 1998)

2.2. Terminoloģija psihofizikā

Psihofizika ir zinātne, kas pēta attiecības starp fizikālu stimulu un uztverto atbildi. **Uztvere** – fizikāla notikuma novērtējums, ko nodrošina viena vai vairākas maņas – process, kas notiek smadzenēs, tāpēc tiešs tās mērījums nav iespējams, ir iespējams zinātniski pētīt attiecības starp fizikālu stimulu un indivīda atbildi uz to. Stimuls ir fizikāls un aprakstāms ar kvantitatīvu parametru. (Norton, *et al.*, 2002)

Redzes uztveres sliekšnis ir visbiežāk sastopamais psihofizikālais mērījums, kas raksturo robežu starp tām stimula vērtībām, kas izsauc atbildi, un tām, kas atbildi neizsauc. Psihofizikāli novērtētā sliekšņa vērtība var mainīties paša stimula fluktuāciju, neirālās aktivitātes, uzmanības un psiholoģisko faktoru dēļ. (Norton, *et al.*, 2002)

Viena no biežāk izmantotajām un precīzākajām psihofizikālajām metodēm ir **konstanto stimulu metode** – parasti tiek izvēlēts fiksēts stimulu vērtību skaits (5 – 9), kur vismaz viens galējais stimulš tiek izvēlēts tā, lai tā vērtība būtu zem sliekšņa, bet otrs – lai būtu virs sliekšņa. Tad katrs stimulš tiek parādīts eksperimenta dalībniekam daudzas reizes jauktā secībā. Katrā stimula rādīšanas reizē no dalībnieka tiek pieprasīta atbilde par redzēto. Visvienkāršākajā gadījumā tiek jautāts, vai stimulš ir pamanīts un jāatbild ar „jā”/„nē”. Sliekšņa noteikšanai konstruē grafiku: procentuālais pareizo atbilžu sadalījums pret stimula dimensiju. Rezultāts ir „S” formas līkne - psihometriskā funkcija. Sliekšnis tiek novērtēts, kur stimulš pareizi noteikts 50% reizu. Konstruējot psihofizikālu testu, aprēķinos tiek ņemta vērā arī pareizās atbildes uzminēšanas iespēja un nejaušas kļūdīšanās iespēja. (Norton, *et al.*, 2002)

2.2.1. Krāsu izšķirtspējas psihofizikālie mērījumi

Gan normālas, gan traucētas krāsu redzes novērtēšanā izmanto gan „kritērija atbildes” mērījumus (tiek meklēts, kad divi stimuli tiek uztverti kā vienādi), gan sliekšņa mērījumus (tiek meklēts, kad divi stimuli tiek uztverti kā tikko izšķirami). Psihofizikālo mērījumu pielietojums krāsu redzes testēšanā ir visai ierobežots testa sarežģītības un nepieciešamā aprīkojuma dēļ. Otrkārt, psihofizikāli mērījumi tāpat kā to rezultāta ieguve un apstrāde ir ļoti laikietilpīgi. Minēto iemeslu dēļ psihofizikālās metodes vairāk raksturīgas zinātniskiem pētījumiem krāsu redzē, ne klīniskām vajadzībām. (Birch, 1993)

2.3. Sarkani-zaļais krāsu redzes deficīts

Iedzimti krāsu redzes defekti (KRD) aptver plašu mantotu stacionāru stāvokļu kopu, kuriem raksturīga izmainīta krāsu saskaņošana un/vai krāsu izšķirtspēja. Parasti citas redzes funkcijas (tādas kā redzes asums) ir neskartas. Mūsdienās valda uzskats, ka iedzimtus KRD izraisa punktu (*point*) mutācijas, reorganizācijas un/vai izdzēšanas opsīna gēnā, kas nosaka vāļišu redzes fotopigmentu uzbūvi un funkcijas. Iedzimtos KRD var raksturot no diviem dažādiem skatpunktiem – kvalitatīvās dimensijas (kā ir skarta krāsu redze) un kvantitatīvās dimensijas (cik lielā mērā ir skarta krāsu redze). Šajā darbā tiek analizēti tikai visbiežāk izplatītie no visiem iedzimtajiem KRD – protāna defekts un deitāna defekts. (Birch, 1993; Shevell, 2003) Ar vārdiem KRD turpmāk darbā jāsaprot tikai minētie iedzimtie defektu veidi.

Eksistē divu veidu kvalitatīvi atšķirīgi KRD, kurus izraisa ar X hromosomu saistīta iedzimtība. **Protāna defekta** gadījumā traucēta ir garo viļņu jutības jeb L-tipa vāļišu darbība, savukārt, **deitāna defekts** tiek raksturots ar izmainītu vidējo viļņu jutības jeb M-tipa vāļišu darbību. Protāna un deitāna defekti sevī ietver gan dihromātijas (protanopija un deiteranopija), gan anomālas trihromātijas gadījumus (protanomālija un deiteranomālija). Dihromātijas gadījumā jebkuras redzamās krāsas iegūšanai (saskaņošanai) skartajam indivīdam būs vajadzīgas tikai divas primārās krāsas. Izšķirtspējas samazinājums protānu un deitānu defektu gadījumos nozīmīgi atšķiras. Dihromātijas gadījumā izšķirtspēja ir nozīmīgi sliktāka nekā anomālās trihromātijas gadījumā. Tāpat jāpiemin, ka pārmantots tiek gan defekta kvalitatīvais, gan kvantitatīvais aspekts. (Birch, 1993; Shevell, 2003) Anomālo trihromātu gadījumā krāsu saskaņošana tiek veikta ar defektīvās vāļītes iesaistīšanos, piemēram, deiteranopam indivīdam normāli funkcionē īso viļņu un garo viļņu jutības vāļītes un trešā (defektīvā) vāļīte arī ir pielīdzināma garo viļņu jutības vāļītei ar nelielu fotopigmenta absorbcijas spektra maksimālās vērtības ($\delta\lambda_{\max}$) nobīdi. Šādas sistēmas gadījumā (viena īso viļņu jutības vāļīte un divas mazliet atšķirīgas garo viļņu jutības vāļītes) tiek nodrošināta ierobežota krāsu izšķirtspēja arī garo viļņu spektra daļā. (Neitz, *et al.*, 1996) Krāsu konfūzija un spektrālā jutība

protanomāliem un protanopiem indivīdiem, kā arī deiteranomāliem un deiteranopiem ir kvalitatīvi līdzīga, kas attaisno to apkopojošos jēdzienus „protāni” un „deitāni”. (Birch, 1993; Shevell, 2003) Tālāk lasītājs tiek aicināts iepazīties ar īsu stāstījumu par krāsu redzes un to defektu atklājumiem no vēsturiskā skatījuma 1. pielikumā.

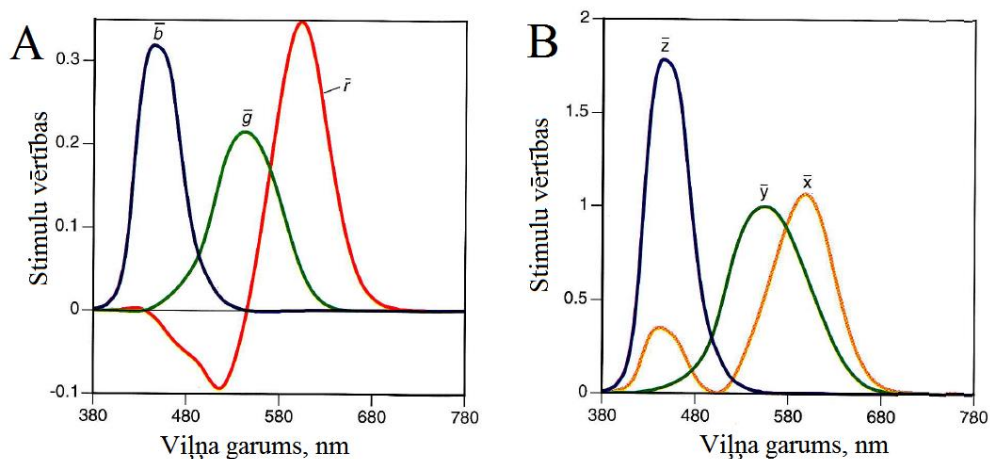
2.4. Standartizētu, uz saskaņošanas eksperimentiem balstītu krāsu telpu izstrāde

2.4.1. CIE standarta novērotājs

Pirmos krāsu saskaņošanas eksperimentus veica I. Ņūtons 1730-tajos gados. Viņš pamanīja, ka ir iespējams iegūt baltu gaismu, sajaucot dzeltenu un zilu gaismu. Jauniegtā baltā gaisma ne pēc kādām pazīmēm nebija atšķirama no baltas gaismas, kas satur visus redzamās gaismas viļņu garumus. Šādi krāsu (vai gaismu) pāri, kas izsauc vienādu krāsu uztveri, taču spektrāli ir atšķirīgi, tiek saukti par **metamēriem**. Individuālu uztveres atšķirību dēļ viena cilvēka uztverts krāsu metamēru pāris ne vienmēr tāds izskatīsies arī citiem cilvēkiem. 1920-tajos gados redzes kolorimetriskie mērījumi tika veikti standarta novērotājiem satiksmes drošības sistēmu izstrādei. 1931. gadā kolorimetriskā krāsu saskaņošana tika standartizēta, un tā kļuva par pamatu visiem turpmākajiem mūsdienu krāsu mērīšanas rīkiem un sistēmām. Divas krāsas tiek uztvertas kā vienādas, ja tās izraisa vienādas vāļišu atbildes. Standarta vāļišu atbildes dati tiek iegūti no vidējā novērotāja vāļišu jutības funkcijām un stimulu spektrālajiem mērījumiem. (Berns, 2000)

Krāsu saskaņošanas eksperimentu būtība ir panākt testa lauka un references lauka (katrs veido pusi no apļa) krāsu atbilstību, kur references laukā ir iestatīts interesējošais viļņa garums (praksē tiek saskaņotas krāsas ar 10 nm soli un dati interpolēti, lai novērtētu 1 nm soli). Testa lauku veido trīs krāsu aditīvs salikums. Vēsturiski ir iegājies, ka trīs krāsas, kas tiek izmantotas testa laukā, ir sarkana, zila un zaļa (teorētiski varētu izmantot arī citas pamata krāsu kombinācijas, galvenais, lai visas izmantotās krāsas būtu spektrāli pietiekami atšķirīgas). Krāsu uztvere mainās atkarībā no tīklenes ekscentricitātes, tāpēc ir ieviesti standarti krāsu saskaņošanas eksperimentiem pēc attēla leņķiskā izmēra uz tīklenes: 2° un 10°. Kā pamatkrāsas 1931. gadā izveidoto krāsu saskaņošanas funkciju noteikšanai tika izmantoti sekojoši monohromatiski stimuli: sarkans (700 nm), zaļš (546,1 nm) un zils (435,8 nm). Eksperimentā tika noteikts pamatkrāsu daudzums, kas nepieciešams, lai pieskaņotu stimula krāsu un iegūtas **krāsu saskaņošanas funkcijas** $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ (2.3. A attēlā). Šīs trīs saskaņošanas funkcijas pazīstamas kā trīs-stimulu vērtības (*tristimulus values*). (Berns, 2000)

Tā kā trīs-stimulu vērtībām raksturīgas gan pozitīvas, gan negatīvas vērtības (radušās tāpēc, ka neeksistē stimuli, kas izsauktu tikai vidējo viļņu jutības vāļišu atbildi, tāpēc testa laukā saskaņošanas eksperimenta laikā pie attiecīgajiem viļņa garumiem nepieciešams papildus pievienot (šajā gadījumā) 700 nm gaismu). Lai izvairītos no negatīvajām saskaņošanas funkciju vērtībām, tika piemeklēta lineāra transformācija, kura eksperimentāli noteiktās $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$ krāsu saskaņošanas funkcijas parvērta par $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ krāsu saskaņošanas funkcijām (2.3. B attēlā). (Berns, 2000)



2.3. attēls. A – 1931.gada standarta novērotāja krāsu saskaņošanas funkcijas $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$ (vidējie 17 normālu trihromātu dati, krāsu saskaņošana veikta ar 1 nm soli no 360 līdz 830 nm, izmantojot monohromatiskus stimulus ar viļņu garumiem 435,8 nm, 546,1 nm un 700 nm). (Berns, 2000) B – 1931.gada standarta novērotāja krāsu saskaņošanas funkcijas $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$. (Berns, 2000)

Transformēto sistēmu sauc par X, Y, Z sistēmu, ko nereti apzīmē kā CIE 1931. gada standarta novērotāju vai 2° novērotāju. Krāsu saskaņošanas funkcijas ir dotas un pieejamas dažādos avotos, ieskaitot vispasaules tīmekli. Lai aprēķinātu atstarojošu objektu trīs-stimulu vērtības, tiek ņemts vērā gan apgaismojuma spektrs (S_λ), gan objekta atstarotais spektrs (R_λ), gan arī krāsu saskaņošanas funkcijas $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ (Berns, 2000):

$$X = k \sum_{\lambda} S_{\lambda} R_{\lambda} \bar{x}_{\lambda} \Delta \lambda \quad (2.1.)$$

$$Y = k \sum_{\lambda} S_{\lambda} R_{\lambda} \bar{y}_{\lambda} \Delta \lambda \quad (2.2.)$$

$$Z = k \sum_{\lambda} S_{\lambda} R_{\lambda} \bar{z}_{\lambda} \Delta \lambda \quad (2.3.)$$

$$k = \frac{100}{\sum_{\lambda} S_{\lambda} \bar{y}_{\lambda} \Delta \lambda} \quad (2.4.)$$

Vienādojumos 2.1. – 2.4. Σ_λ atbilst summēšanai viļņu garumu diapazonā, k ir normalizēšanas konstante un Δ_λ ir mērījuma viļņa garuma intervāls (parasti solis ir 10 nm vai 20 nm). Šie vienādojumi aptuveni atbilst integrēšanas darbībai. (Berns, 2000)

2.4.2. CIE xy krāsu diagramma

Trīs-stimulu vērtības var iztēloties kā trīs mainīgos, kas izvēlēti par pamatu trīsdimensionālas krāsu telpas izveidei. Veicot divas secīgas projekcijas, iegūst divdimensionālu krāsu karti, ko sauc par krāsu diagrammu (*chromaticity diagram*). Trīs mainīgo pārveide par diviem liek zaudēt daļu informācijas – trīs-stimulu vērtību savstarpējās ieguldījuma vērtības pārtop par ieguldījuma proporcijām. Krāsa, ko apraksta ar CIE (*Commission Internationale de l'Eclairage*) xy krāsu diagrammu, satur trīs vērtības – krāsu koordinātas x un y , kā arī gaišuma faktoru Y . Attiecīgie pārrēķini doti formulās 2.5. – 2.8 (Berns, 2000):

$$x = X/(X + Y + Z) \quad (2.5.)$$

$$y = Y/(X + Y + Z) \quad (2.6.)$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} = 1 - x - y \quad (2.7.)$$

$$X = \frac{x}{y} Y, \quad Z = \frac{z}{y} Y = \frac{1 - x - y}{y} Y \quad (2.8.)$$

Kā redzams, X, Y un Z vērtības var viennozīmīgi iegūt no x, y (krāsu) un Y (gaišuma) koordinātēm.

2.4.3. Uztveres ziņā viendabīgāku sistēmu izveide

CIE xy 1931. gadā izveidotās krāsu telpas galvenais trūkums ir uztveres neviendabīgums tās ietvaros (skat. 2.5.7. sadaļu). Ņemot vērā, ka primāro vērtību izvēle bija patvaļīga, tas bija sagaidāms rezultāts. Līdz mūsdienām turpinās centieni izstrādāt krāsu telpas, kas nodrošinātu vienmērīgu krāsu atveidi un to korelāciju ar krāsu uztveri. Šo mērķi traucē sasniegt individuālās uztveres atšķirības un krāsu uztveres sarežģītā daba. Krāsu telpas parasti ir trīsdimensionālas, tomēr ar trīs dimensijām nepietiek, lai attēlotu visus krāsu uztveres aspektus. (Berns, 2000)

Lai izveidotu modeļus, kuros tiktu uzlabots uztvertās krāsas vienmērīgs sadalījums, iespējamas ir divu tipu CIE X, Y, Z telpas transformācijas: lineāras un nelineāras. Tika piedāvātas dažādas lineārās transformācijas, viena no tām - *MacAdams UCS (uniform chromaticity scale)*, ko 1960. gadā pieņēma CIE un turpmāk dēvēja par u, v krāsu diagrammu.

Tā joprojām tiek izmantota korelētās krāsu temperatūras aprēķiniem. Viens no u, v telpas trūkumiem bija tās sliktā savienojamība ar Munsell krāsu sistēmu, kas tika uzlabota, y koordinātas vērtības palielinot par 50%. 1976. gadā CIE pieņēma šīs izmaiņas un pārdēvēja jauno telpu par u', v' UCS diagrammu. Tā ir pamata krāsu telpa, kas tiek izmantota televīzijas industrijā un CRT displeju krāsu aprēķinos. Nopietns u', v' telpas trūkums ir tās viendabīguma trūkums kā funkcijai no luminances faktora. CIE 1976.gada krāsu koordināšu aprēķini un pārrēķini doti 2.9. – 2.12. formulās (Berns, 2000):

$$u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} = \frac{4x}{-2x + 12y + 3} \quad (2.9.)$$

$$v' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z} = \frac{9y}{-2x + 12y + 3} \quad (2.10.)$$

Atgriezeniskie vienādojumi ir (Berns, 2000):

$$x = \frac{9u'}{6u' - 16v' + 12} \quad (2.11.)$$

$$y = \frac{4v'}{6u' - 16v' + 12} \quad (2.12.)$$

2.4.4. Oponentās krāsu sistēmas

Izpratne par krāsu izmaiņu un dažādu gaišuma līmeņu krāsu izmaiņu nelinearitāti radās, analizējot Munsell krāsu sistēmu. 1930-tajos gados parādījās pirmās nelineārās krāsu sistēmas, kurās centrā tika izvietota ahromātiskā krāsa un novirze no centra atbilstu pieaugošam piesātinājumam (*chroma*), savukārt virzība vienādā attālumā no centra azimutāli atbilstu dažādiem toņiem (*hue*). Vispirms tika izveidota ANLAB oponentā krāsu telpa, kas tiek plaši izmantota tekstilindustrijā. 1973. gada CIE komitejas sanāksmē tika ierosināts, ka uz ANLAB krāsu telpas bāzes būtu jārada jauna krāsu telpa vienkāršākiem pārrēķiniem. Sekojoši tapa divas krāsu telpas ar augstu krāsu attēlošanas veikspēju un lielāku uztveres vienmērību: CIELAB (CIE 1976 L^*, a^*, b^*) un CIELUV (CIE 1976 L^*, u^*, v^*). Abas šīs sistēmas ir definētas CIE 1931. gada standarta novērotājam pie standarta apgaismojuma C, taču praksē tās tiek izmantotas plašam apgaismojumu veidu klāstam, ieskaitot tādus, kas stipri atšķiras no standarta C apgaismojuma. (Berns, 2000) Vienādojumi CIELAB krāsu telpas koordināšu aprēķinam doti 2.13. – 2.17. formulās (Berns, 2000):

$$C_{ab}^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2} \quad (2.13.)$$

$$h_{ab} = \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (2.14.)$$

Šajos vienādojumos X_n, Y_n un Z_n ir trīs-stimulu vērtības references baltajam.

$$L^* = 116 \left[f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - \frac{16}{116} \right] \quad (2.15.)$$

$$a^* = 500 \left[f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \right] \quad (2.16.)$$

$$b^* = 200 \left[f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) \right] \quad (2.17.)$$

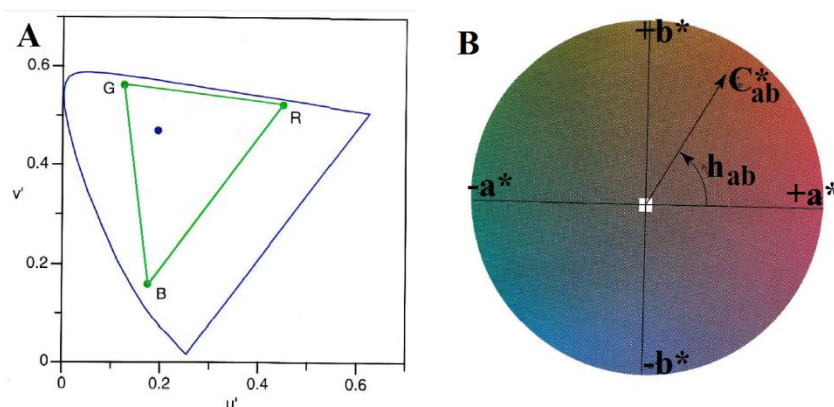
Vienādojumos $f(Y/Y_n) = (Y/Y_n)^{1/3}$, ja $Y/Y_n > 0,008856$ un $f(Y/Y_n) = 7,787(Y/Y_n) + 16/116$, ja $Y/Y_n \leq 0,008856$; $f(X/X_n)$ un $f(Z/Z_n)$ tiek definēti līdzīgi. Atgriezeniskie vienādojumi (ja $Y/Y_n > 0,008856$) ir šādi 2.18. – 2.20. (Berns, 2000):

$$X = X_n \left(\frac{L^* + 16}{116} + \frac{a^*}{500} \right)^3 \quad (2.18.)$$

$$Y = Y_n \left(\frac{L^* + 16}{116} \right)^3 \quad (2.19.)$$

$$Z = Z_n \left(\frac{L^* + 16}{116} - \frac{b^*}{200} \right)^3 \quad (2.20.)$$

2.4. attēlā parādītas u', v' un CIELAB krāsu telpas.



2.4. attēls. A - $u'v'$ UCS krāsu telpa. B – CIELAB krāsu telpas projekcija (krāsas ir vienāda gaišuma līmeņa $L^* = 60$). CIELAB tonis (*hue*) tiek mērīts grādos, sākot ar $h_{ab} = 0$ uz $+a^*$ ass (sārtās skalas virziens) un pieaug pretēji pulksteņa rādītāja virzienam. CIELAB piesātinājums (*chroma*) jeb hroma tiek mērīts kā līnijas garums no neitrālā punkta ($a^* = b^* = 0$) līdz parauga punktam.

2.5. Krāsu izšķirtspējas mainīgums normālas krāsu redzes gadījumā

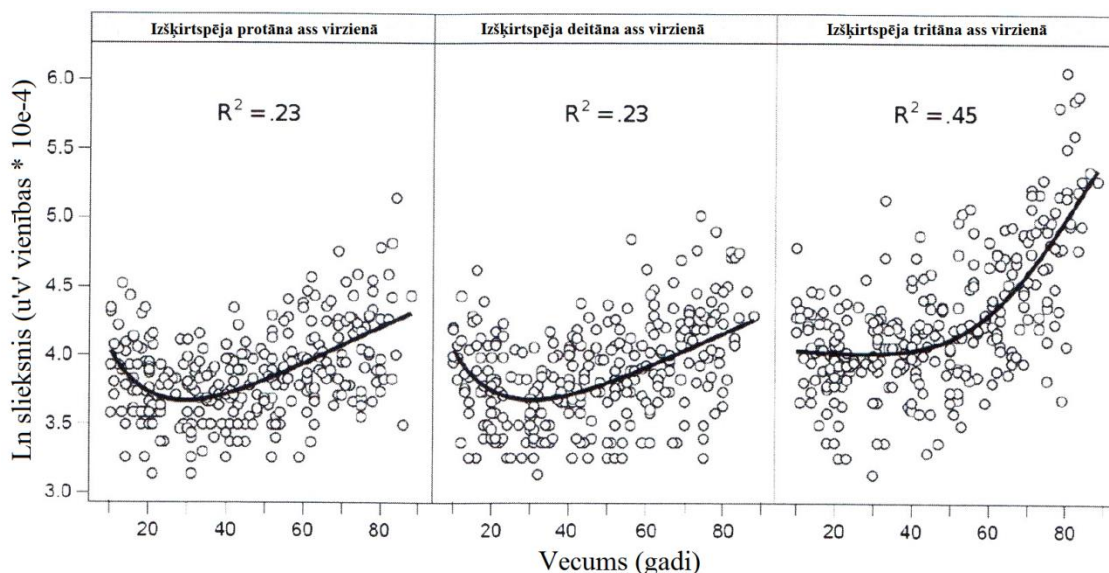
2.5.1. Preretinālie filtri - makulas pigments, acs lēcas dzeltēšana un šūnu novecošana

Galvenie faktori, kas ietekmē krāsu izšķirtspēju neizmainītas krāsu redzes gadījumā ir selektīvā redzamā spektra īso viļņu absorbcija, pirmkārt, **acs lēcā** un, otrkārt, inertajā dzeltenajā pigmentā, kas klāj tīklenes centrālo daļu makulu (saukts par **makulas pigmentu**, ko veido tīklenes karotinoīdi luteīns, zeaksantīns un mezo-zeaksantīns). Krāsu izšķirtspēja dzīves laikā nozīmīgi mainās – pēc 50 gadu sliekšņa sasniegšanas acs lēca dzeltē un tās blīvums mainās, kas izraisa nozīmīgu krāsu izšķirtspējas samazināšanos un izšķirtspējas sliekšņa vērtības paaugstināšanos īso viļņu diapazonā. Kataraktas veidošanās gadījumā jutības zudums kļūst vēl vairāk izteikts. Dzeltenais makulas pigments iespiežas tīklenes centrālās daļas neirālajā slānī (tas atrodas ganglionāro šūnu un iekšējā pleksiformā slāņa līmeņos, kas ir pirms fotoreceptoriem) un aizņem no 5° līdz 10° lielu apgabalu horizontālajā virzienā un no 3° līdz 5° lielu apgabalu vertikālajā virzienā. Makulas pigmentam ir liela nozīme acs tīklenes pasargāšanā no ultravioletā starojuma, kā arī, pateicoties tā antioksidējošajām īpašībām, tas daļēji pasargā tīklieni no brīvo radikāļu ietekmes uz tīklenes funkcijām (samazinot tādas slimības kā makulas deģenerācija veidošanās risku). Pigmenta optiskais blīvums ir iedzimts un individuāli mainīgs lielums, tā daudzums dzīves laikā būtiski nemainās. Makulas pigmenta atšķirīgā blīvuma dēļ, visu vecumu neizmainītas krāsu redzes populācijā atšķiras īso viļņu spektra izšķirtspēja apgabalā no 450 līdz 490 nm, kas padara grūtāku tritānu (īso viļņu jutības vāļīšu) krāsu redzes defektu atklāšanu. Interesanti, ka aptuveni 20% cilvēku makulas pigmentu nenovēro. (Snodderly, *et al.*, 1984; Birch, 1993; Algvere, *et al.*, 2006; Kim, *et al.*, 2006; Kinkelder, *et al.*, 2011) Tāpat krāsu izšķirtspējas samazinājumu pēc 50 gadu sliekšņa sasniegšanas izraisa ar vecumu saistītas izmaiņas fotoreceptoros, ganglionāro šūnu un kortikālo šūnu līmeņos (Werner, 1996; Knoblauch, *et al.*, 2001; Paramei, Oakley, 2014).

2.5.2. Krāsu izšķirtspējas izmaiņas dzīves laikā

Krāsu izšķirtspējas sliekšņi dzīves laikā mainās „U” veida līknes veidā. Agrā bērnībā un pusaudža gados, redzes sistēmai nobriestot, krāsu izšķirtspējai ir tendence uzlaboties (attiecīgi sliekšņa vērtība samazinās). Vēlīnā pusaudžu vecumā un jauna pieaugušā vecumā vidējie krāsu izšķirtspējas sliekšņi sasniedz savu minimālo vērtību un sāk paaugstināties. Atkarībā no testēšanas sistēmas, minimālā vērtība tiek novērota vecuma diapazonā no 18 līdz 30 gadiem. Paramei un Oakley savā 2014. gada pētījumā vērtēja normālu trihromātu krāsu izšķirtspēju, izmantojot CCT (*Cambridge Colour Test*). CCT ir datorizēts psihofizikāls, pseidoizohromatisks tests, kas ne tikai konstatē krāsu redzes defektu, iedala tā veidu un

pakāpi, bet arī sniedz kvantitatīvu krāsu izšķirtspējas novērtējumu. CCT sniedz, pirmkārt, visu trīs vāļišu veidu darbības izvērtējumu (izšķirtspēju protāna, deitāna un tritāna konfūzijas līniju virzienā) (trivektora tests) un, otrkārt, CCT rezultāts ir trīs individuālas krāsu izšķirtspējas elipses (MakAdamsa elipses) uz tritāna konfūzijas ass (Elipšu tests). Pētījumā piedalījās dalībnieki vecumā no 10 līdz 88 gadiem. Tika izmantoti 291 dalībnieka dati. 2.5. attēlā parādīti dalībnieku trivektora testa rezultāti. (Paramei, Oakley, 2014)

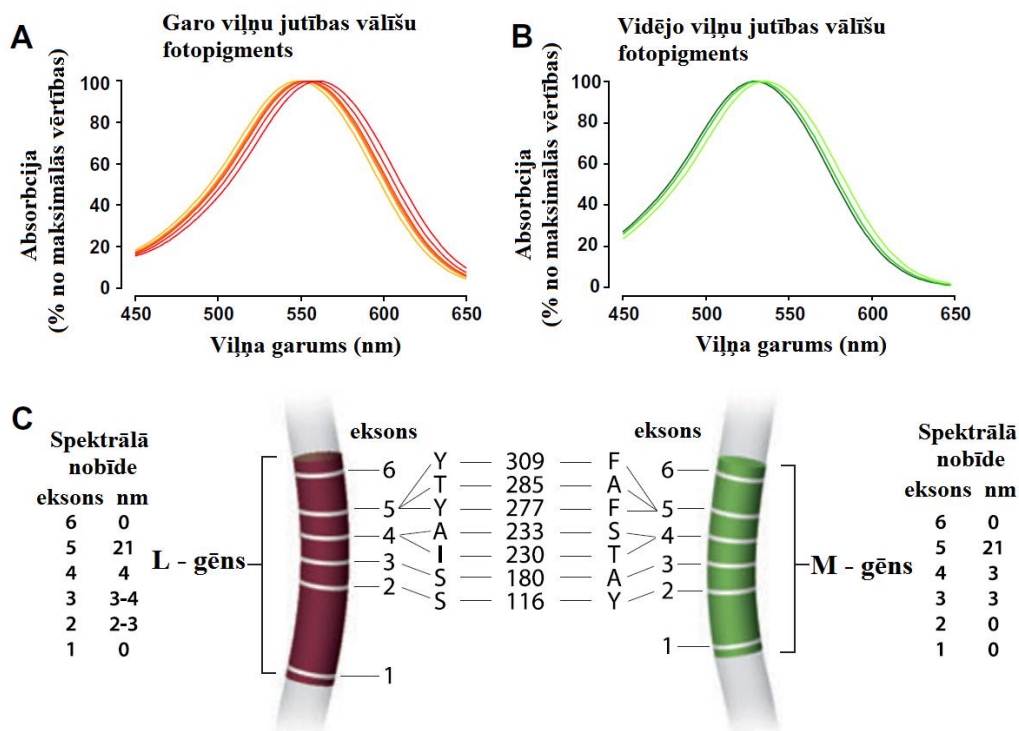


2.5. attēls. CCT Trivektora testa rezultāti 291 dalībniekam ar normālu krāsu redzi: naturālais logaritms (ln) iegūtajiem krāsu izšķirtspējas sliexņiem uz protāna (pa kreisi), deitāna (centrā) un tritāna (pa labi) konfūzijas asīm kā funkcija no vecuma. Ar melno līniju attēlota labākā iegūtā tendences līkne. (Paramei, Oakley, 2014)

2.5.3. Fotopigmenta spektrālās jutības mainīgums normālas krāsu redzes gadījumā

2.6. attēls apkopo informāciju par cilvēka vidējo un garo viļņu jutības vāļišu spektrālās jutības novietojuma ģenētisko kodēšanu, ko nodrošina attiecīgi M-gēns un L-gēns. L- (OPN1LW) un M- (OPN1MW) opsīna gēniem katram ir seši eksoni. Eksoni nr. 1 un nr. 6 parasti nemaina savu novietojumu ne L-, ne M-gēna gadījumā. Eksons nr. 5 kodē aminoskābju dimorfismu gēna novietojumos 277 un 285, kas abi kopā ir atbildīgi par vairumu variāciju cilvēka garo viļņu un vidējo viļņu jutības vāļišu spektrālā maksimuma novietojumos. Eksoni nr. 2, 3 un 4 arī kodē aminoskābju dimorfismus, kas veido papildu mazākas spektrālās nobīdes. Ir vairākas normālas garo viļņu un vidējo viļņu jutības vāļišu kodējošo gēnu aminoskābju secības, kas rada normālas absorbcijas spektru variācijas (2.6. attēls A un B). Vidējo viļņu jutības vāļišu gadījumā visbiežāk sastopamā variācija ir spektra novietojums ar jutības maksimumu pie mazākās vērtības (2.6. attēlā B iezīmēts ar treknāku līniju). Garo viļņu

jūtības vāļišu gadījumā ir lielāks skaits variāciju un divas no tām ir sastopamas ļoti bieži (ar maksimumu vērtībām pie 559 nm (biežāk sastopams) un 555,5 nm (mazliet retāk sastopams)). (Neitz, Neitz, 2011)



2.6. attēls. Cilvēka vidējo viļņu un garo viļņu jutības vāļišu fotopigmentu spektrālā iestatīšana. A – garo viļņu jutības vāļišu absorbcijas spektru normālās variācijas, vidēji absorbcijas spektra maksimums ($\delta\lambda_{\max}$) ir pie aptuveni 560 nm; B – vidējo viļņu jutības vāļišu absorbcijas spektru normālās variācijas. Vidējo viļņu jutības vāļišu $\delta\lambda_{\max}$ ir pie aptuveni 530 nm. C – Gēni (OPN1LW un OPN1MW), kas kodē minēto vāļišu fotopigmentus (opsīnus), katrs no tiem satur sešus eksonus, kas attēlā apzīmēti ar baltu krāsu un to numerācija ir no 1 – 6. Ar sarkanu un zaļu krāsu apzīmēti gēnu introni. Gēni ir attēloti, ievērojot mērogu. Kodoni, kas specificē aminoskābes, kas iesaistītas spektrālajā iestatīšanā, apzīmēti, izmantojot vispārpieņemto aminoskābju kodu. Kodona numurs/aminoskābes novietojums ir norādīti ar skaitli C attēla centrā. Aminoskābju apzīmējumi: Y – tirozīns, T – treonīns, A – alanīns, I – izoleicīns, S – serīns, F – fenilalanīns. Spektrālās nobīdes lielums (nm), ko izraisa konkrētās aminoskābes novietojuma izmaiņas katra eksona gadījumā, ir norādīts tabulās attēla malās. (Neitz, Neitz 2011)

2.6. attēlā C ir precīzi parādīti tie septiņi kodoni (katra gēna gadījumā), kas jutības maksimuma novietojuma ziņā spektrāli iestata garāko normālo garo viļņu jutības vāļišes pigmentu un īsāko normālo vidējo viļņu jutības vāļišes pigmentu. Tabulās abās pusēs parādīts, kādas sekas jutības maksimuma novietojumā būtu tad, ja kļūdainas transkripcijas rezultātā attiecīgo L-gēna eksonu aizvietotu ar M-gēna eksonu un otrādi. Aizvietojot M-gēna eksonus

ar L-gēna eksoniem, rodas mazākas spektrālās nobīdes, nekā aizvietojojot L-gēna eksonus ar M-gēna eksoniem. Tātad protānam visticamāk būs mazāka nobīde starp abiem vidējo viļņu jutības vāļišu fotopigmentu absorbcijas spektriem (neskarto/normālo garo viļņu jutības vāļiti un defektīvo, kuras maksimuma nobīde to ir pielīdzinājusi otrai garo viļņu jutības vāļitei), nekā deitānam, kura abi garo viļņu jutības pigmenti ar lielāku varbūtību būs ar lielāku savstarpējo $\delta\lambda_{\max}$ nobīdi. Tas izskaidro, kāpēc caurmērā protānu KRD grupas krāsu izšķirtspēja ir zemāka, nekā deitānu – lielāka savstarpējā $\delta\lambda_{\max}$ nodrošina augstāku iegūstamo izšķirtspēju. (Neitz, Neitz, 2011)

2.5.4. Apkārtējās vides un eksperimenta apstākļu ietekme uz krāsu izšķirtspēju

Krāsu izšķirtspēju nozīmīgi ietekmē tīklenes apgaismojuma daudzums, stimula rādīšanas ilgums, stimula attēla novietojums un izmērs uz tīklenes, kā arī citi faktori.

Attēla izmērs un novietojums uz tīklenes: Krāsu izšķirtspēja uzlabojas aptuveni divas reizes, ja objekta attēls uz tīklenes no 2° tiek palielināts līdz 10°. Krāsu izšķirtspēja samazinās, ja attēla izmērs kļūst mazāks par 1°. Krāsu izšķirtspēja ir iespējama arī pie 3' maziem stimuliem, taču jāņem vērā, ka tīklenes centrālajā bedrītē foveolā nav atrodamas īso viļņu jutības vāļites, tāpēc stimuli, kuru izmērs ir mazāks par 20', izraisīs tritanopijas efektu arī normālas krāsu redzes gadījumā. Tāpat, stimulu rādot ekscentriski (perifērijā), izšķirtspēja samazināsies nūjiņu iesaistīšanās redzes uztverē dēļ. (Shevell, 2003)

Tīklenes apgaismojums: 100 – 3500 Td tīklenes apgaismojuma diapazonā krāsu izšķirtspējas funkcijas mainās maz. Apgaismojuma līmenim samazinoties, arī krāsu izšķirtspēja samazinās, īpaši to novēro īso viļņu jutības vāļišu gadījumā. (Shevell, 2003)

Stimula rādīšanas ilgums: Ilgāka stimula prezentācija uzlabo izšķirtspēju. Vienlaicīgas divu stimulu rādīšanas gadījumā (ja nolūks ir divus stimulus salīdzināt) izšķirtspēja ir augstāka nekā tos rādot secīgi. (Shevell, 2003)

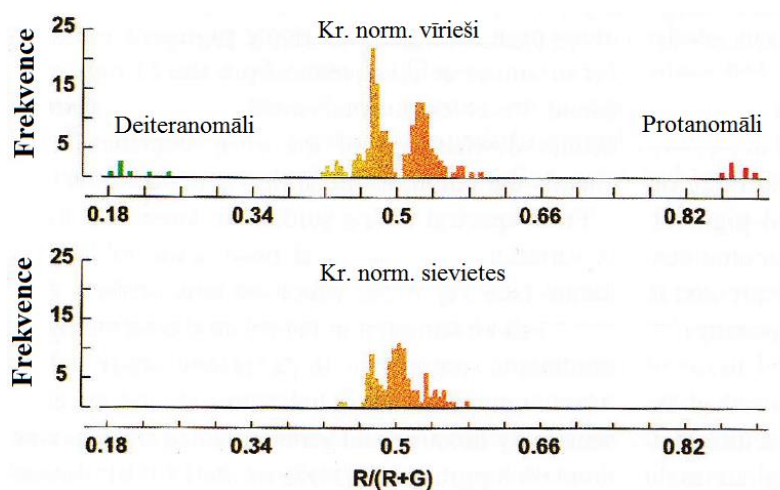
Apkārtējās vides parametri: grupa redzes ilūziju parāda, cik liela ietekme uz krāsu uztveri ir kontekstam (apkārtējo objektu krāsām), metamērismam un adaptācijai. Šajā darbā netiek analizētas tādas parādības un procesi kā krāsu pastāvība un krāsu konteksta ietekme uz krāsu uztveri, autore tikai piemin, ka vēlams šos faktorus eksperimentu gaitā ja ne izslēgt pilnībā, tad vismaz turēt konstantā līmenī.

Tātad individuālo krāsu izšķirtspēju ietekmē vesela faktoru kopa. Vislielākā ietekme uz krāsu izšķiršanu ir filtriem pirms tīklenes jeb preretinālajiem filtriem - secīgi makulas pigmenta blīvumam, acs lēcas pigmentam un tā blīvumam. Treškārt, krāsu izšķirtspēju normālas krāsu redzes gadījumā ietekmē garo viļņu, vidējo viļņu un īso viļņu jutības vāļišu fotopigmentu $\delta\lambda_{\max}$ vērtības. Secīgi nākamais faktors, kas ietekmē individuālo krāsu

izšķirtspēju, ir fotopigmentu blīvums vāļītē (optiskais blīvums, kas sīkāk aprakstīts 2.7.2. nodaļā) un nūjiņu signālu proporcionālā iesaistīšanās redzes nodrošināšanā. (Webster, MacLeod, 1988; Díaz, *et al.*, 1998) Krāsu izšķirtspēja dzīves laikā mainās, un to ietekmē arī apkārtējā vide un eksperimenta apstākļi.

2.5.5. Dzimums un krāsu uztvere

Krāsu saskaņošanas rezultāti (skat. 2.5.7. un 3.2. sadaļas par anomaloskopa uzbūvi un darbību) sieviešu un vīriešu grupās uzrāda atšķirības normālas trihromātiskas redzes gadījumā. Abu dzimumu iegūtie Releja saskaņošanas rezultātu viduspunkti ir parādīti attēlā 2.7.



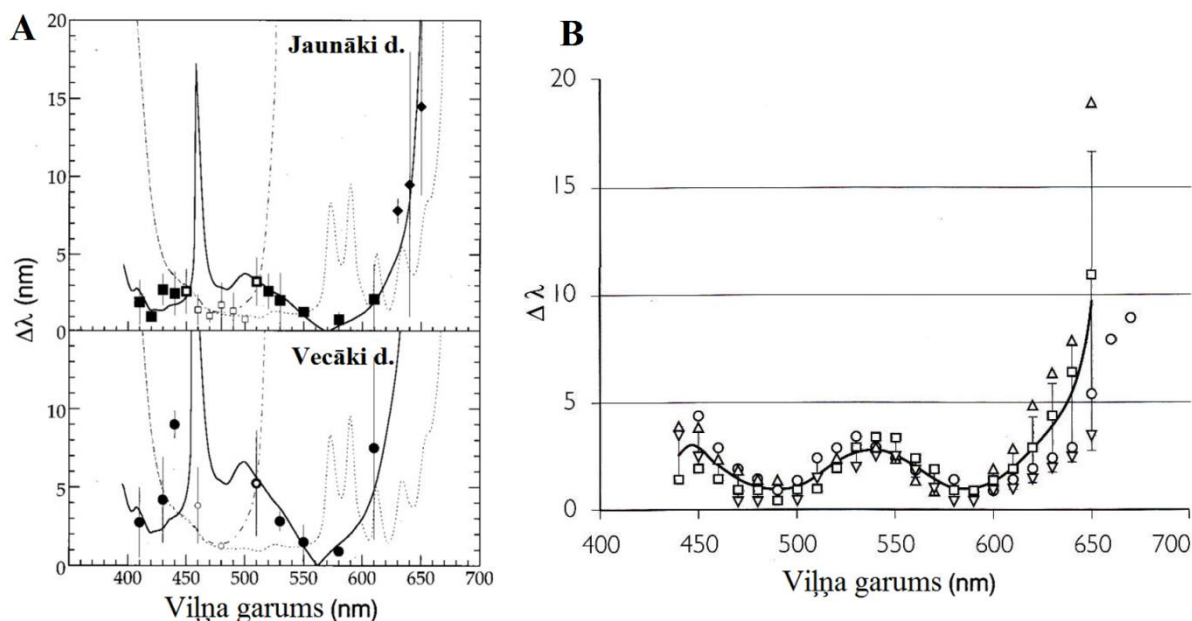
2.7. attēls. Releja saskaņošanas apgabali vīriešiem ($n = 160$) un sievietēm ($n = 100$). Augšējā diagramma uzrāda sadalījumu normāliem trihromātiskiem, deiteranomāliem un protanomāliem vīriešiem. Deiteranomālo un protanomālo dalībnieku rezultāti ievietoti, lai uzsvērtu, ka, kaut arī normālas trihromātiskas krāsu redzes gadījumā raksturīga rezultātu izkliede, tie vienalga ir stingri nošķirami no anomālā trihromātisma gadījuma. Apakšējā diagramma attēlo krāsu saskaņošanas rezultātu viduspunktus 100 sievietēm ar normālu krāsu redzi. Stabiņi ir iekrāsoti tādās krāsās, kā pieņemamais saskaņošanas rezultāts testa laukā izskatītos kādam, kura krāsu saskaņošanas viduspunkts iekrīt 0,5 $R/(R+G)$ (oranžāks un sarkanāks no 0,5 atzīmes pa labi un dzeltenāks un zaļāks no 0,5 atzīmes pa kreisi). (Backhaus, *et al.*, 1998)

2.7. attēlā normālu trihromātisku vīriešu saskaņošanas apgabalu viduspunkti ir multimodāli sadalīti. L-pigmenta un M-pigmenta gēnu analīzes korelē ar šiem rezultātiem – serīna vai alanīna (S vai A) novietojums 180. pozīcijā L-pigmentu un M-pigmentu kodējošajos gēnos. Tātad S/A polimorfisms ietekmē Releja saskaņošanas apgabalus, izraisot divus (pēc dalībnieku skaita) līdzīgus datu sadalījumus, kas abi ir raksturīgi normālai krāsu

redzei (tuvākie saskaņošanas apgabali deiteranomālu un protanomālu gadījumos novietoti ar izteiktu R/(R/G) novirzi (skat. 2.7. attēlu)). Savukārt, vidējie sieviešu saskaņošanas apgabali novietojas tieši pa vidu starp tām divām rezultātu grupām, ko saskaņojuši vīrieši. Teorētiski tam ir izskaidrojums no fotopigmentu spektrālā sadalījuma viedokļa. Vīriešu gadījumā divi biežāk sastopamie gēnu sadalījumi ir L-S180 un L-A180, kas izraisa attēlā redzamo saskaņošanas apgabalu viduspunktu multimodālo sadalījumu. Tā kā sievietēm ir divas X hromosomas, tad varbūtība, ka sievietei abās no tām būs sastopams L-A180 gēns, ir 26,5%. Varbūtība, ka sievietei būs L-A180 gēns vienā hromosomā un L-S180 gēns otrā, ir gandrīz 50%, kas, savukārt, paredz, ka sievietes tīklenē būs sastopami divi spektrāli atšķirīgi L-tipa pigmenti (L-S180 un L-A180). 2.7. attēlā redzams, ka 28% sieviešu bija nepieciešams mazāks sarkanās gaismas daudzums Releja vienādojuma iegūšanai (abās hromosomās L-A180 gēni), 52% sieviešu bija nepieciešams vidēja abu gaismu proporcija (katrā hromosomā atšķirīgs gēns: L-S180 un L-A180) un 20% - lielāks sarkanās gaismas daudzums (abās hromosomās L-S180 gēni). (Backhaus, *et al.*, 1998)

2.5.6. Spektrālo krāsu (viļņa garumu) izšķirtspēja

Viļņa garumu izšķirtspēju definē kā mazāko viļņa garuma izmaiņu, kas tiek atšķirta pie noteiktas gaismas viļņa garuma vērtības. Mērījums notiek 2° redzes laukā, kas tiek sadalīts divos vienādos sektoros – viens ir references lauks, kurā tiek rādīta interesējošā gaismas viļņa garuma vērtība, un otrs ir testa lauks, kurā sākotnēji tiek rādīta identiska gaismas viļņa garuma vērtība. Tā tiek mainīta tikmēr, kamēr tiek uztverta krāsu atšķirība neatkarīgi no lumināces atšķirības. Luminānce arī tiek manuāli mainīta līdz abi sektori vairs nav iegūstami kā vienādi. (Birch, 1993; Shevell, 2003) Rezultējošā viļņa garumu atšķirība tiek izteikta kā starpība starp iegūto testa lauku un references lauku ($\Delta\lambda$) (Shevell, 2003). Procedūru atkārto visā redzamajā spektrā. Rezultātus var attēlot divējādi – $\Delta\lambda$ no references lauka vienā virzienā (piemēram, tikai garo viļņa garumu virzienā), vai arī kā vidējo $\Delta\lambda$ references laukiem abos virzienos. (Shevell, 2003) 2.8. A attēlā ir parādīti $\Delta\lambda$ četriem jaunākiem (vid. 30,9 g.v.) un trīs vecākiem (vid. 72,5 g.v.) dalībniekiem, kā arī skaidroti rezultāti no S-tipa vāļišu kanāla un L/M-vāļišu oponentā kanāla darbības viedokļa. (Shinomori, *et al.*, 2001). 2.8. B attēlā ir parādīti citu autoru dati bez kanālu darbības skaidrojuma vieglākai $\Delta\lambda$ mainīguma tendences uztveršanai.

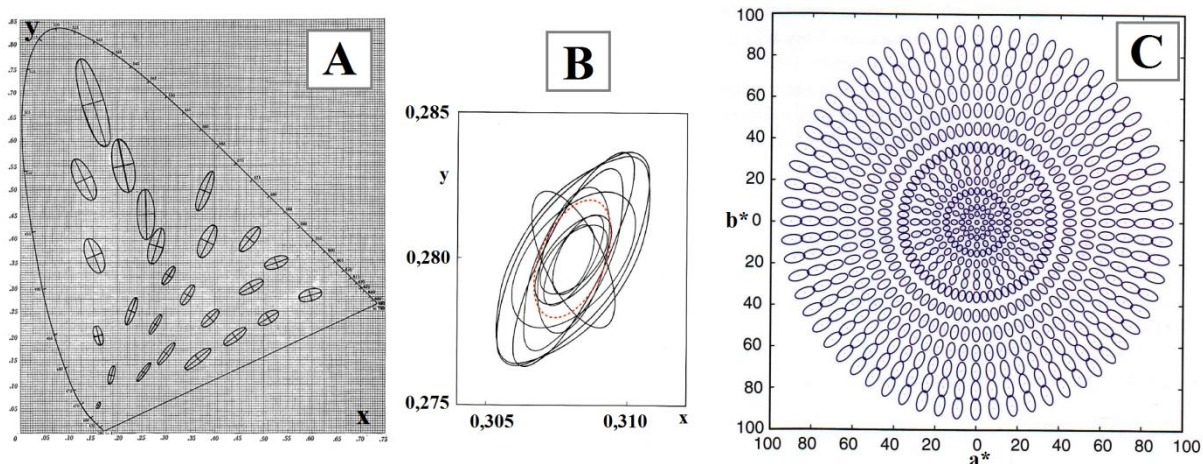


2.8. attēls. A - Spektrālo krāsu (viļņu garumu) izšķirtspējas sliekšņi ($\Delta\lambda$) kā funkcija no viļņa garuma četriem jaunākiem (augšā) un trijiem vecākiem (apakšā) dalībniekiem. Mazāki un lielāki simboli atbilst sliekšņu vērtībām, ko autori skaidro kā iegūtus ar S-tipa vāļišu kanālu (mazāko simbolu gadījumā) un L/M vāļišu oponento kanālu (lielāko simbolu gadījumā). Svītroti-punktotās un punktotās līknes atbilst teorētiski aprēķinātajām sliekšņu vērtībām attiecīgi ņemot vērā un izslēdzot S-tipa vāļišu kanāla radīto troksni. Nepārtrauktās līnijas atbilst teorētiski aprēķinātajām sliekšņu vērtībām L/M-vāļišu oponentā kanāla darbības rezultātā. (Shinomori, *et al.*, 2001) Attēlos redzams, ka gan jaunāko, gan vecāko dalībnieku viļņu garumu izšķirtspējas sliekšņi dažādās spektra daļās atšķiras – ir novērojami trīs minimumumi (ap 420 nm, 480 nm un 600 nm vērtībām), kam raksturīga visaugstākā izšķirtspēja. Tie novērojami pie viļņa garumiem, kuros tiek atšķirīgi stimulēti divu dažādu grupu fotoreceptori un dominējošā fotoreceptora veids mainās (Birch, 1993). Otrkārt, redzams, ka vecāko dalībnieku sliekšņu vērtības ir augstākas, īpaši lielāko simbolu (L/M – oponentā vāļišu kanāla medītēto simbolu) gadījumā (Shinomori, *et al.*, 2001). B – Smith un Pokorny (1970) iegūtie dati (līkne parāda vidējo sliekšņu vērtības no četriem dalībnieku datiem (Shevell, 2003)). Gan A, gan B attēlos saglabājas aprakstītās tendences.

2.5.7. MakAdamsa un krāsu tolerances elipses

Ir aprēķināts, ka normāls trihromāts spēj izšķirt aptuveni 3 miljonus atšķirīgu krāsu, ja tiek saskaitītas visas variācijas, mainot trīs krāsu raksturojošos parametrus – luminanci, toni un piesātinājumu. Normāla trihromāta nespektrālo krāsu izšķirtspēja var tikt attēlota kā elipšu kopa CIE xy krāsu diagrammā, kā arī citās krāsu telpās (skat. 2.9. A un C attēlu). Katras elipses izmērs attēlo hromatisko vērtību kopu, kas standarta novērotājam nav izšķiramā, pie nosacījuma, ka luminance nemainās). MakAdams (MacAdam, 1942) pirmais mēģināja un aprakstīja neizšķiramās elipses. To pielietojums galvenokārt saistīts ar pieļaujamo krāsu

atšķirību aprēķiniem krāsu specifiskācijā un krāsu atveidē. (Birch, 1993) Kaut arī krāsu izšķirtspēja ir individuāls raksturlielums, krāsu tehnoloģijās un raksturošanā pieņemts par pamatu lietot vidējos datus. 2.9. B attēlā parādītas iegūtās elipses 12 dažādiem dalībniekiem ar normālu krāsu redzi. Redzams, ka atšķiras ne tikai tolerances elipses izmērs (visbiežāk), bet īpašos gadījumos pat elipses vērsums.

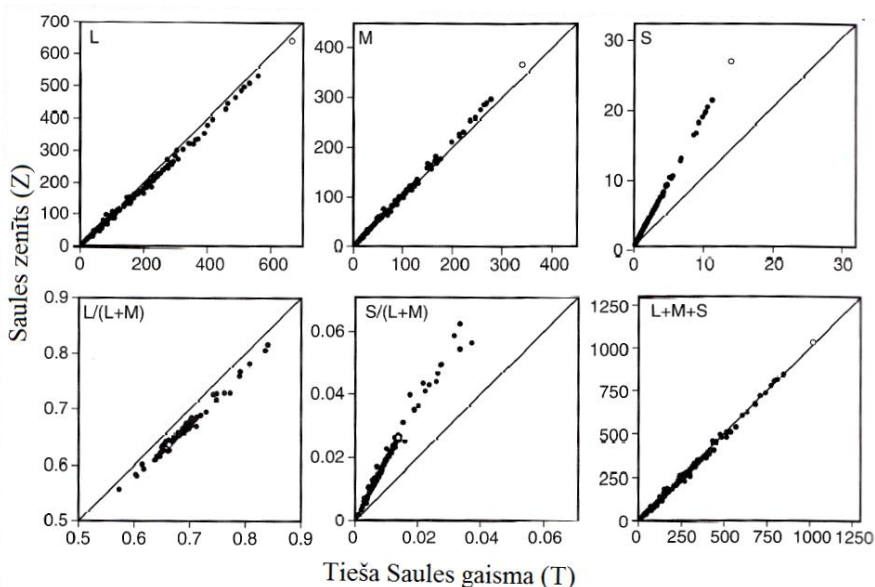


2.9. attēls. A - Krāsu neizšķiršanas (MacAdamsa) elipses CIE xy 1931.g. krāsu diagrammā. Elipses palielinātas 10 reizes. (MacAdam, 1942). Elipsu izmēru nekoncekvence (diagrammas dažādās vietās nav novērojamas vienādas uztveres atšķirības) ir CIE xy diagrammas viens no būtiskākajiem trūkumiem. B – 12 dalībnieku individuālās krāsu tolerances elipses. Ar sarkanu parādīta vidējotā elipse, taču katra dalībnieka individuālā tolerance no tās ievērojami atšķiras. (Brown, 1957) C – krāsu tolerances elipses CIELAB krāsu telpā. Salīdzinot ar elipsu izmēru atšķirībām CIE xy diagrammā, redzams, ka elipsu izmēri ir savā starpā samērojāmāki. (Berns, 2000)

2.5.8. Krāsu redze un apgaismojums

Lielākajā daļā gadījumu, kad vienu un to pašu objektu krāsas tiek uztvertas kā dažādas, izraisa apgaismojuma maiņa. **Krāsu konstantums** ir redzes sistēmas īpašība, kas nodrošina relatīvi nemainīgu krāsu uztveri dažādos apgaismojuma apstākļos. No neirālo atbilžu skatupunkta krāsu konstantums tiek īstenots, ja kādā redzes sistēmas darbības līmenī neirāli pārveidotie dažādi apgaismoto objektu krāsu signāli atšķiras mazākā mērā nekā minimāli izšķiramā krāsu atšķirība. Analizējot krāsu konstantumu no neironu darbības viedokļa, vispirms jāanalizē apgaismojuma izmaiņu izsauktās atšķirības neirālajos signālos (2.10. attēls). Attēlā parādītas trīs vāļišu veidu aktivācijas izmaiņas un kardinālie mehānismi 170 dabīgu un cilvēka veidotu objektu krāsu uztverē. 2.10. attēlā parādīts ekstrēmo signālu gadījumu salīdzinājums – gadījums, kad objekts tiek apgaismots tiešā Saules gaismā (T) salīdzināts ar gadījumu, kad objekts ievietots ēnā un apgaismots netieši (no debesīs izkliedētās gaismas) (Z). Visu grafiku gadījumā parādīta viduslīnija – gadījums, kad atbilstošo

fotoreceptoru un signālu atbilde abos apgaismojumos būtu vienāda. Katrs punkts atbilst vienam objektam. Tukšais aplis grafikos (L), (M), (S) apzīmē tiešo vāļišu pigmentu absorbcijas daudzumu katra apgaismojuma gadījumā. Visu trīs augšējo grafiku gadījumā, punkti izvietojas taisnās līnijās un savstarpēji cieši korelē kvantu daudzums, kas pie dažādajiem apgaismojumiem tiek absorbēts katrā vāļītes veidā dažādu objektu gadījumā ($r^2 > 0,998$). (S) grafika gadījumā Releja izkliedes atmosfērā dēļ netieša dienas gaisma efektīvāk ierosina īso viļņu jutības vāļīti un tiešas Saules gaismas gadījumā spektrs satur daudz mazāku īso viļņu proporciju šīs vāļītes ierosināšanai. Apakšējā kreisajā grafikā uz L/(L+M) asīm tiek attēloti objektu toņi no zaļganajiem līdz sārtajiem (no kreisās uz labo pusi un no apakšas uz augšu). Visi punkti, kas apzīmē objektus, ir novietoti zem diagonāles. Tas nozīmē, ka Z apgaismojuma gadījumā visi objekti izskatījies zaļganāki, salīdzinot ar apgaismojumu T. (S)/(L+M) asis apzīmē toņus no dzeltenīgiem līdz violetiem (no kreisās uz labo pusi un no apakšas uz augšu). Apgaismojuma izmaiņas pārbīda visas uztvertās hromatiskās vērtības ar līdzvērtīgu reizinājuma faktoru, visvairāk mainot violetās hromatiskās vērtības. Tas sasaucas ar ikdienas novērojumiem – zāle un ķieģeļi izskatās zilāki ēnā un dzeltenāki tiešā Saules gaismā. (Gegenfurtner, Sharpe, 2000)



2.10. attēls. L-tipa vāļišu, M-tipa vāļišu un S-tipa vāļišu aktivācija (augšējie trīs grafiki) un hromatisko un luminances mehānismu aktivācija sarkani-zaļajās (RG), dzeltenī-zilajās (YB) un luminances kardinālajās asīs (apakšējie trīs grafiki) katram no 170 objektiem apgaismojumos T (x-ass) un Z (y-ass). Atvērtie apli apzīmē apgaismojuma veidus. (Gegenfurtner, Sharpe, 2000)

Tomēr krāsu uztvere ir atkarīga ne tikai no fizikālās absorbcijas, bet arī neirālajām transformācijām. Ir veidoti dažādi modeļi, kas ņemtu vērā apgaismojuma izmaiņas,

nodrošinot neizmainītu gala krāsu uztveri. Šos procesus (bez nepieciešamības analizēt atstarošanās spektru vai apgaismojuma spektrālo sastāvu) nodrošina **adaptācija**. Vienkāršākie adaptācijas modeļi paredz, ka signāli dažādos apstrādes ceļu līmeņos būtu jātransformē tā, lai tiktu nodrošināta visu punktu atrašanās uz attēlā parādītajām diagonālajām līnijām. Vienkāršākais mehānisms šādu uzdevumu nodrošināšanai nosaka, ka katra fotoreceptora signāla ieguldījumu kontrolē paša fotoreceptora laikā integrētais signāls. Katram objektam L-, M- un S-tipa vāļišu signāli tiek pārveidoti kā vienādojumos 2.21. (Gegenfurtner, Sharpe, 2000):

$$\left(\frac{L}{\int Ldt/L_E}, \frac{M}{\int Mdt/M_E}, \frac{S}{\int Sdt/S_E} \right). \quad (2.21.)$$

Nekustīga viendabīga lauka gadījumā katra integrāļa vērtība ir vienāda ar vāļītes absorbciju no šī lauka. Vāļīšu absorbciju proporcijas integrētajai vērtībai tiek pārveidotas, lai tās būtu vienādas ar enerģijas spektra gaismas proporcijām ($L_E:M_E:S_E$). Šāda transformācija varētu vienkāršāk skaidrot to, ka ilglaicīgi skatoties uz vienmērīgi krāsotu laukumu, uztvertās krāsas piesātinājums samazinās. (Gegenfurtner, Sharpe, 2000)

2.6. Krāsu redzes testu vēsture

Jaunu krāsu redzes testu izveide visdrīzāk nebeigsies nekad, taču galvenie principi krāsu redzes testēšanai tika aprakstīti līdz 1930-tajiem gadiem. Industriālās revolūcijas rezultātā arvien palielinājās motorizētu transportlīdzekļu skaits un līdz ar tiem arī satiksmes negadījumu skaits. Tos nereti izraisīja atbildīgo darbinieku nespēja pareizi interpretēt gaismas signālus krāsu neizšķiršanas dēļ. 1875. gadā notika divi satiksmes negadījumi ar cilvēku upuriem, kad desmit cilvēki gāja bojā velkoņa un tvaikoņa sadursmē Norfolkas pilsētā (Virdžīnijas štats, ASV). Vēlāk izrādījās, ka kapteinis jauca navigācijas gaitas zīmes (iekšējo ūdeņu labajā krastā un kreisā krasta diferencējošās zīmes, ko diennakts tumšajā laikā apzīmē ar attiecīgi pastāvīgi degošu sarkanās gaismas vai zaļās gaismas uguni (*aut. piez.*)). Tā paša gada novembrī saskrējās divi vilcienu sastāvi, kas pārvadāja pasažierus, netālu no Lagerlundas pilsētas Zviedrijā. Gāja bojā abi vadītāji un septiņi pasažieri, un par avārijas iemeslu pieņēma avāriju izraisošā vilciena vadītāja krāsu redzes defektu. Krāsu redzes pārbaudei dzelzceļa darbiniekiem un militārajās struktūrās sāka izmantot Holmgren **vilnas dziju testu** (2.11. attēls), kas gan ne vienmēr bija efektīvs krāsu redzes defekta atrašanai. Citi arodārsti krāsu redzes defekta atrašanai sāka izmantot testus, kas satur krāsu nosaukšanu, kas

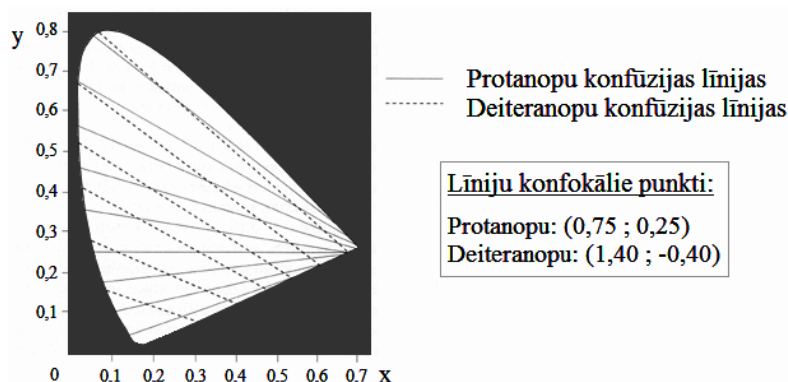
sekmēja **laternu testu** izveidi (*lantern tests*). (Birch 1993; Shevell 2003; Birch un Rodriguez-Carmona, 2014)



2.11. attēls. Holmgren vilnas dziju tests. (Birch, 1993)

2.6.1. Konfūzijas līnijas CIE *xy* krāsu diagrammā

Pieņēmums, ka protanopiem un deiteranopiem iztrūkst viena no fundamentālo vāļišu funkcijām, ļauj dihromātu saskaņošanas rezultātus attēlot trihromātu krāsu diagrammā (skat. 2.12. attēlu). Atrodot divas krāsas, kas ir savstarpēji neizšķiramas novērotājam ar noteikta veida KRD, un savienojot tām atbilstošos punktus krāsu diagrammā, ir iespējams iegūt līnijas. Šīs līnijas dēvē par *konfūzijas, izohromatiskajām*, kā arī (visprecīzāk būtu teikt) *pseudo-izohromatiskajām* līnijām, kas norāda uz to, ka faktiski krāsas uz līnijas ir atšķirīgas, bet novērotājam ar KRD tās būs izohromatiskas – ar vienādu krāsu.



2.12. attēls. CIE *xy* krāsu diagrammā attēlotas konfūzijas līnijas protanopiem un deiteranopiem, kā arī doti atbilstošie konfokālie punkti.

CIE *xy* krāsu diagrammā konfūzijas līnijas konverģē vienā punktā – konfokālajā punktā (katra KRD veidam šī punkta koordinātas atšķiras). Protanopijas un tritanopijas (īso viļņu jutības vāļišu funkcijas iztrūkuma) defektu gadījumos konfokālā punkta atrašanās vieta sakrīt

ar atbilstošajiem redzamā spektra galapunktiem. Individuālās atšķirības makulas pigmenta blīvumā ietekmē individuālo konverģences punktu atrašanās vietas. Makulas pigmentam ir īpaši liela ietekme uz deiteranopu konfūzijas līniju (un atbilstošo konverģences punktu) atrašanās vietām, kam raksturīga plaša individuālā dažādība. (Birch, 1993; Shevell, 2003)

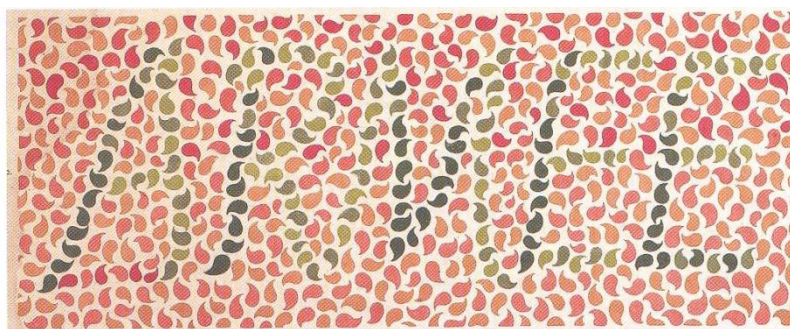
Katram KRD veidam ir viena tāda līnija, kas iet cauri „neitrālajam punktam” CIE xy krāsu diagrammā. Krāsas uz šīs līnijas sauc par neitrālajām krāsām un šo līniju krustpunktu – par neitrālo punktu. Standarta apgaismojuma C gadījumā vidējā neitrālā punkta atrašanās vieta atbilst 494,3 nm protanopiem un 498,4 nm deiteranopiem. Makulas pigmenta blīvuma atšķirību dēļ neitrālā punkta vērtību diapazoni abu KRD gadījumos pārklājas, un individuālā neitrālā punkta mērījumi KRD klasificēšanai nav uzticama metode. Izohromatiskie apgabali anomālās trihromātijas gadījumā saglabā līdzīgu raksturu kā atbilstošajam dihromātisma veidam, tikai apgabalu izmēri atšķiras. (Birch 1993; Shevell, 2003). Piemērs, kā izskatās neizšķiršanas elipses divu dažādas pakāpes deiteranomālu brāļu gadījumā, ievietots 2. pielikuma P.2.1.attēlā. (Jordan, Mollon, 1993) Izohromatiskās līnijas, kas definē neizšķiršanas elipses garāko asi, ir īsākas, bet saglabā tādu pašu virzienu. Izohromatiskās līnijas garums ir atkarīgs no fotopigmenta anomālijas apmēra un, tātad, arī defekta pakāpes. Neitrālajām krāsām ir tie paši dominējošie viļņu garumi, tikai jauktas tiek mazāk piesātinātas krāsas. Neitrālās krāsas izmanto pseidoizohromatisko testu izveidē. Dažādu piesātinājuma līmeņu krāsu izvēle ļauj novērtēt KRD pakāpi. (Birch 1993; Shevell, 2003).

2.6.2. Pseidoizohromatisko plašu izveide

Pirmās pseidoizohromatiskās plates (nereti apzīmētas kā PIC plates) tika izgatavotas ap 1876. gadu Vācijā, to autors bija Stillings (*J. Stillings*). Galvenais pirmo plašu trūkums bija krāsu izmaiņas balēšanas procesā. Simbols (visbiežāk tas ir burts vai cipars), kas veidots no vienas krāsas, bija novietots uz citas krāsas fona. Sākotnēji tika mēģināts drukāt vienas krāsas simbolu uz citas krāsas fona, taču ātri tika secināts, ka stratēģija jāmaina, jo, lai arī cik precīzi tika izvēlēti abu krāsu gaišuma līmeņi un toņi, nebija iespējams izvairīties no nevēlamu artefaktiem. Vēl jo vairāk – ja vienam indivīdam ar krāsu redzes defektu izvēlētie simbola un fona krāsu gaišuma līmeņi bija pieņemami kā vienādi, citam tie varēja izskatīties atšķirīgi. Stillings atrisināja radušās problēmas, ieviešot sekojošus jauninājumus. Pirmkārt, viņš sadalīja visu plati (gan stimulu, gan fonu) mazos gabaliņos tā, lai katram no tiem būtu sava kontūra. Otrkārt, tā vietā, lai mēģinātu stimula un fona krāsas padarīt vienādas, viņš katra individuālā gabaliņa gaišuma līmeņus dažādoja. Tādējādi testējamais dalībnieks stimula ieraudzīšanai un atpazīšanai nevar izmantot ne malas artefaktus, ne gaišuma līmeņu izmaiņas. Novērotājam ir uzdevums atrast objektu, izmantojot tikai krāsas pazīmi, līdzinoties situācijai,

kāda tā ir dabīgā vidē (augļa atrašana, ko maskē dažādu gaišuma līmeņu lapu fons). (Shevell, 2003)

Sākotnēji visas pseidoizohromatiskās plates bija tā saucamā „izzūdošā veida” (*vanishing type*), kur nosaukums norāda uz to, ka simbols kļūst neredzams novērotājam ar attiecīgo KRD. Mazliet vēlāk tika izveidotas arī „pārvēršanās veida” (*transformation type*) plates, kurās novērotāji ar neizmainītu un traucētu krāsu redzi veic divas dažādas grupēšanas un rezultātā sniedz dažādas atbildes (2.13. attēls). 1917. gadā japāņu oftalmologs Išihara (S. Ishihara, 1879 - 1963) izlaida pirmo Ishihara plašu izdevumu. To vidū bija gan abu minēto dizainu plates, gan tādas, kur novērotājs ar normālu krāsu redzi simbolu neredz, bet ar attiecīgo defektu redz. Līdz mūsdienām Išihara plates ir saglabājušas savu nozīmi un ir visplašāk izmantotā metode krāsu redzes skrīningā. (Shevell, 2003)



2.13. attēls. *Podestà* 1916. gadā izstrādātā pārvēršanās veida plate. Normāls trihromāts nolasa *Armee* (armija), dihromāts nolasa vārda armija antonīmu *Zivil* (civils). (Shevell, 2003)

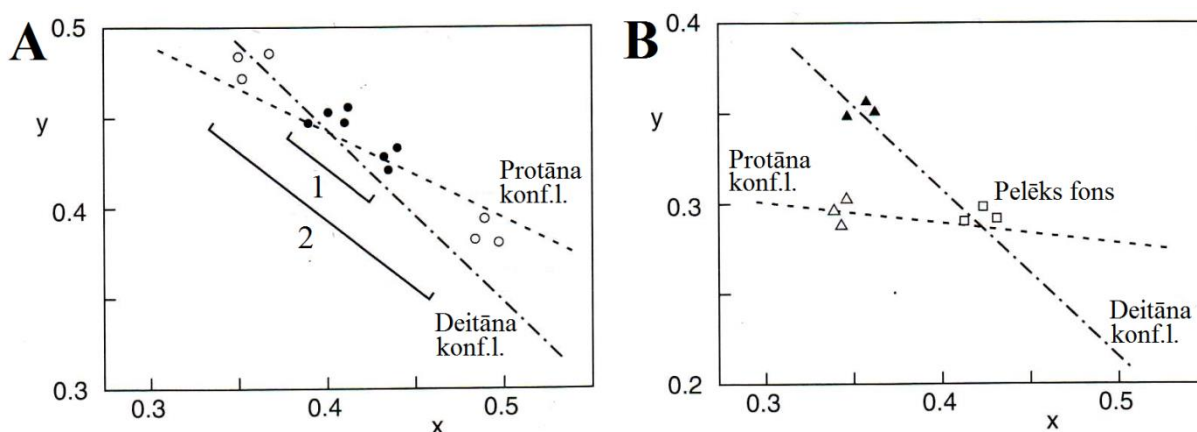
2.6.3. Pseidoizohromatisko plašu darbības principi

Lai varētu izgatavot pseidoizohromatisku plati, fona un stimulu krāsas ir jāizraugās tā, lai CIE xy krāsu diagrammā to atbilstošās vērtības atrastos uz vajadzīgā defekta veida **konfūziju līnijām** (Birch, 1993; Smith, Pokorny, 1975). Precīzi izvēloties atbilstošās krāsaino simbolu un fona hromatiskās vērtības, iespējams izveidot testus, kuru veikspēju krāsu redzes defektu atklāšanai raksturo ar augstiem specifiskuma un jutības parametriem (vērtības tuvinās 1,0) (Cole, *et al.*, 2006; Cole, 2007). Dažādu defekta pakāpju klasificēšanai izmanto plates ar pieaugošu grūtības pakāpi. Jo mazāka ir pilnā krāsu atšķirība ΔE^*_{ab} (ΔE par kuru sīkāk aprakstīts 3.4. nodaļā) krāsu pāriem, kas veido stimulu un fonu, jo grūtāk simbols platē būs ieraugāms (2.14. A attēls). Visbiežāk testi, kas satur PIC plates, **iedala defektu** trīs pakāpēs: vājā (*mild*), vidējā (*moderate*) un izteiktā (*severe*). Sarkani-zaļā defekta gadījumā ieteicamās ΔE vērtības rēķinātas viendabīgajā CIE LAB krāsu telpā ir šādas:

- 15 – 22 vienības vājas pakāpes defektam (izmanto skrīningā),
- 30 – 40 vienības vidējas pakāpes defektam un

- 50 – 60 vienības izteiktas pakāpes defekta gadījumā. (Birch, 1993)

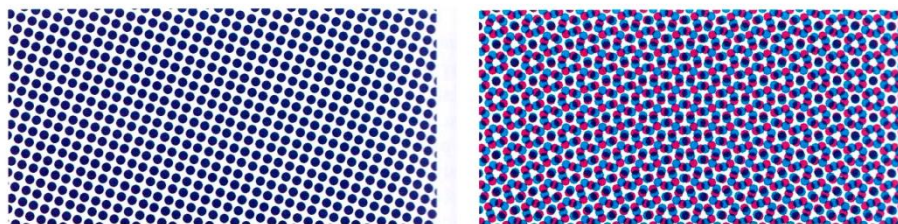
Klasifikācijas plates deitānu un protānu defektu diferencēšanai izmanto neitrālās krāsas - fona punktu matrica sastāv no dažādu gaišuma līmeņu pelēkiem punktiem un defekta veidam atbilstošās neitrālās krāsas (2.14. B attēls). Sārti-violetiem toņiem tiek dota priekšroka, salīdzinājumā ar zaļganajiem, jo starp atbilstošajiem toņiem, kas pieņemami katram no defektu veidiem, ir lielāka hromatisko vērtību atšķirība. Jebkurā gadījumā uztveri var ietekmēt individuālais makulas pigmenta blīvums – ja tas ir izteikti augsts, dalībnieks var neizšķirt abiem defektu veidiem paredzētos stimulus. (Birch, 1993)



2.14. attēls. Krāsas, kas tiek izvēlētas pseidoizohromatisko testu izveidei CIE xy krāsu diagrammā. A – krāsu koordinātes krāsām, kas tiek izvēlētas fona punktu matricai un „izzūdošajam” simbolam atrodas vajadzīgā KRD veida izohromatisko apgabalu ietvaros. Mazas krāsu atšķirības (1) tiek izmantotas sarkani-zaļā krāsu redzes defekta klātbūtnes noteikšanai (skrīningam) un lielas krāsu atšķirības (2) – izteiktas pakāpes defekta diferencēšanai. B – Neitrālās krāsas (krāsas, kas tiek jauktas ar pelēkajām) tiek izmantotas, lai izšķirtu protāna defektu no deitāna defekta. Fons sastāv no pelēkiem punktiem (atbilstošās koordinātes apzīmētas ar \square). Diagnostiskās krāsas šajā gadījumā ir zaļganas deitāna gadījumam (\blacktriangle) un zili-zaļganas protāna gadījumam (\triangle). (Birch, 1993)

Krāsu pāri izohromatiskajos apgabalos izskatās neizšķirami tikai tad, ja atbilstoši ir piemeklēts arī to gaišuma līmenis. Relatīvā luminances efektivitāte protāna un deitāna defektu gadījumos atšķiras. Plates, kuru dizains veidots abu defekta veidu skrīningam, satur vairāku gaišuma līmeņu krāsu pārus. Vēl viens faktors, kas nosaka, vai PIC plates būs veiksmīgas, ir to druka. Ja drukas rezultātā veidojas, piemēram, krāsu slāņu savstarpējā nobīde, punkti, kas nevēlami pārklājas vai spraugas, kas rodas starp tiem, var izsaukt simbolu nevēlamu pamanīšanu (skat. 2.15. attēlu). PIC plašu izveidei tiek izmantotas gan nejauši izveidotas, gan regulāras punktu matricas. Plati veidojošo punktu (te domāti vienas krāsas laukumi, nevis

drukas pilienu punkti) izmēri dažādiem testiem atšķiras. Attiecīgi atšķiras arī minimālais nepieciešamais redzes asums testa veikšanai. (Birch, 1993)



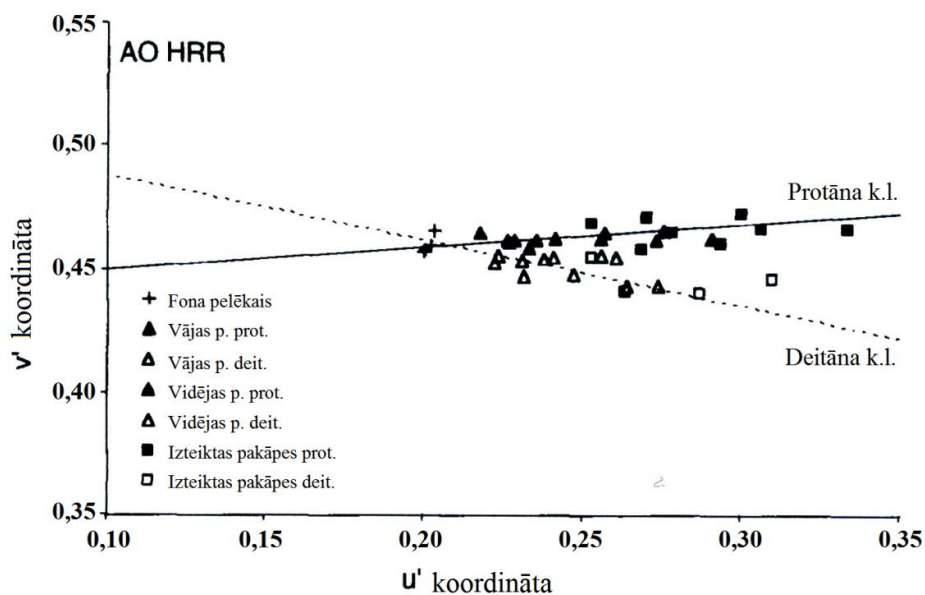
2.15. attēls. Paraugos pa labi un pa kreisi parādīts, kādas sekas var būt nelielai drukas parametru maiņai uz rezultējošo krāsu uztveri. Abos taisnstūros izmantotās ciāna un magentas tintes daudzumi ir konstanti, taču, aplūkojot attēlus no lielāka attāluma, redzams, ka uztvertie zilās krāsas toņi atšķiras. (Berns, 2000)

Tāpat pseidoizohromatisko testu izveides pamatā ir to krāsu izvēle, kas atrodas uz konfūzijas līnijām vai konfūziju apgabalu ietvaros, papildus ieviešot dažādus gaišuma līmeņus, lai maskētu luminances ietekmi uz stimula atpazīšanu (Dain, 2004^b). Testi ir pieejami gan drukātā formā (*Richmond HRR, Ishihara*), gan veicami uz datora monitora (*Cambridge Colour Test, Color Assessment and Diagnosis*). Pretstatā ir arī testi, kuros izmanto citus krāsu uztveres mehānismus vai vairāku mehānismu sajaukumu, piemēram, Releja vienādojumu (anomaloskops), relatīvo gaišuma uztveri un konfūzijas līnijas (Farnsworth Munsell 100-hue) u.c.

Vairākos pētījumos (Lee, Honson, 2002; Dain, 2004a; Dain, 2004b) ir analizētas PIC testu hromatiskās vērtības un to novietojums attiecībā pret konfūzijas līnijām. (Lee, Honson, 2002; Dain, 2004a) Ir analizētas plašu hromatiskās vērtības, lai izvērtētu, kā krāsu izmaiņas, kas radušās gan identiskos, gan dažādos testa izdevumos, ietekmē testa veiktspēju. Lee un Honson pētījumā tik secināts, ka dažādu Ishihara PIC testu krāsas nozīmīgi atšķiras, kam sekas var būt pat kļūdaina klīniskā diagnoze. Kolorimetriski nosakot PIC plašu krāsu vērtības, tika secināts, ka to novietojums attiecībā pret konfūzijas līnijām nozīmīgi atšķiras, kā arī relatīvie gaišumi neatbilst to vajadzīgajām vērtībām (Lee, Honson, 2003). Dain 2004a pētījumā tika salīdzināti četri HRR testu izdevumi. Rezultāti bija līdzīgi – pat vienas plates ietvaros hromatiskās vērtības nozīmīgi atšķīrās vairāku izdevumu gadījumā. Richmond 3. izdevuma hromatiskās vērtības bija vāji savietojamas ar konfūziju līnijām (Dain, 2004a).

Savukārt, Dain analizēja, kā tiek veikta krāsu izvēle dažādu PIC plašu dizainu izstrādei un diferencēšanai starp dažādu tipu un smaguma pakāpi KRD. Piemēram, 2.16. attēlā parādītas trīs AOHRH plašu hromatiskās vērtības. Plates paredzētas trīs dažādu smaguma

pakāpju defektu atklāšanai gan protānu, gan deitānu gadījumā. Redzams, ka izvēlētās krāsas ne vienmēr sakrīt ar konfūziju līnijām. (Dain, 2004b) Nevienā no šiem pētījumiem nav analizēts, kāds ir vidējais hromatisko vērtību nobīdes apmērs no konfūziju līnijām, kā arī nav veikti aprēķini vai salīdzinājumi ar datiem no krāsu uztveres pētījumiem. Piemēram, 2.16. attēlā hromatiskās vērtības izteiktas pakāpes deitāna defekta noteikšanai ir lielā mērā nobīdītas no attiecīgās konfūziju līnijas, un būtu lietderīgi noskaidrot, vai šāds attālums nav pārāk liels PIC plates veiksmīgai izmantošanai klīnikā.



2.16. attēls. Krāsas trīs AO HRR testa platēm. Katra plate satur divus stimulus – vienu protāna un otru deitāna defekta veidam, katras plates simboli paredzēti dažādas pakāpes defektu atklāšanai (vājas, vidējas un izteiktas pakāpes). Krāsas attēlotas CIELUV krāsu sistēmā. (Dain, 2004b)

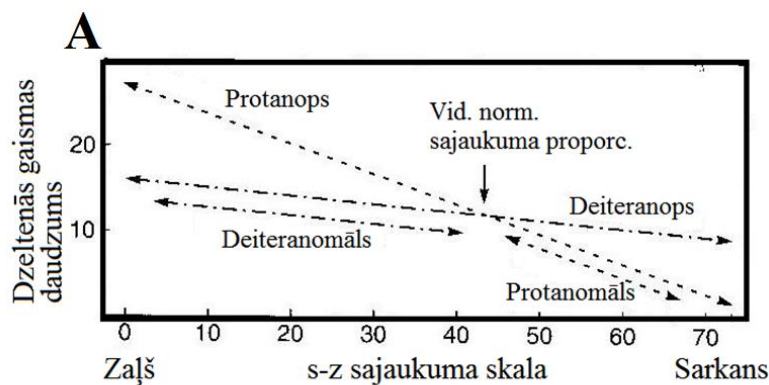
2.6.4. Pseidoizohromatisko plašu lietojums dažādos apgaismojuma apstākļos

Krāsu atveide, kas iegūta ar pigmentu palīdzību, testiem mainās dažādos apgaismojuma apstākļos. Normāla dienasgaisma (Rietumu virzienā Ziemeļu puslodē), CIE standarta apgaismojums C vai *MacBeth* lampa tiek ieteikti kā labākie iespējamie apgaismojumi PIC (un citu pigmentu testu) veikšanai. Fluorescentās spuldzes ar augstu krāsu atveidi vai gaismas kastes ir labas alternatīvas. Fluorescento gaismas avotu krāsu atveides indeksam būtu jābūt > 90 un krāsu temperatūrai ap 6500 K. 250 – 650 lx apgaismojuma diapazonā tiek nodrošināts krāsu konstantums. *MacBeth* lampa tika izstrādāta PIC testu veikšanas vajadzībām – tā sastāv no 100 W Volframa spuldzes, kam pievienots sfēriska zils filtrs, kas lampas spektru pietuvina C apgaismojuma spektram. *MacBeth* lampa nodrošina 300-400 lx apgaismojumu uz testa plates virsmas. Diemžēl *MacBeth* lampas vairs netiek ražotas. (Birch, 1993)

Dain 2006. gada pētījumā vērtēja, kāda ietekme ir spektrāli atšķirīgiem apgaismojumiem uz četrpaužu izdevumu HRR PIC testu krāsu atveidi. Tika novērtēta gan hromatisko vērtību novirze, gan modelēts vāļišu kontrasts ahromatiskajam fonam un hromatiskajam stimulam gan normālas trihromātiskas redzes, gan protāna un deitāna redzes gadījumā. Pētnieks secināja, ka līdzšinējie pieņēmumi, ka apgaismojums stipri ietekmē PIC testu rezultātus, neizrādījās pamatoti, it īpaši sarkani-zaļā KRK plašu gadījumā. Gan apgaismojuma, gan novērotāja metamēriska efekti bija ļoti zemi. Krāsu atšķirības, kas radušās dažādos plašu izdevumos, bija lielākas nekā apgaismojuma izmaiņu ieviestais metamērisms. Vislabākā krāsu atveide tika novērota D65, C, *MacBeth* lampu gadījumā. Nebūtiski sliktāka tā bija dažādu izmantoto fluorescento spuldžu gadījumā (krāsu temperatūra septiņiem izmantotajiem fluoriscentajiem avotiem bija no 4000 K līdz 7036 K, un krāsu atveides indekss no 65,6 līdz 93,5). Salīdzinoši sliktāko krāsu atveidi nodrošināja CIE standarta apgaismojums A (ekvivalents Planka melnā ķermeņa starotājam ar $T = 2856$ K). (Dain, 2006) Līdzīgus rezultātus uzrādīja arī pētījums, kur tika novērtēta dažādu apgaismojuma veidu ietekme uz Ishihara testa rezultātiem (Dain, *et al.*, 1993)

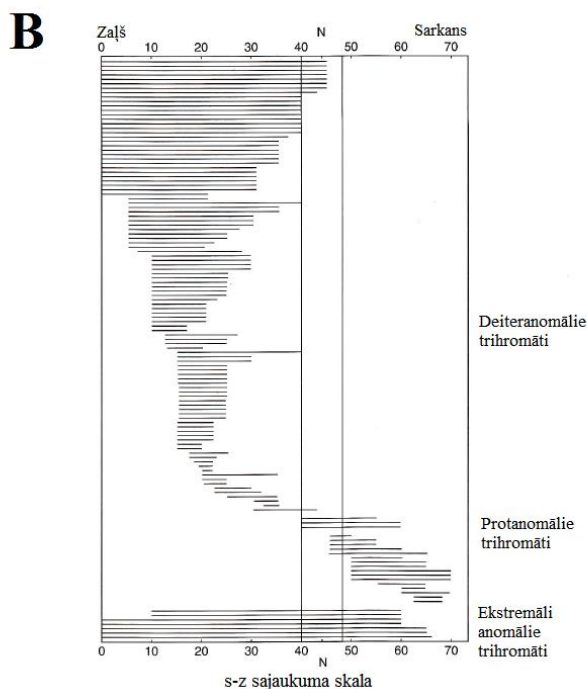
2.6.5. Anomaloskopa darbības principi

Nagels (*W. A. Nagel*) 1907. gadā izgudroja **anomaloskopu** – ierīci krāsu redzes defekta klasificēšanai. Mūsdienās anomaloskopa testēšanas procedūra ir nozīmīgākais posms (etalona tests) krāsu redzes defekta diagnostikai. Anomaloskopa uzbūves pamatā ir spektroskopija atpakaļgaitā – gaismas no trim spraugām tiek laistas cauri prizmai, un optiska lēca tās fokusē uz novērotāja tīklenes. Tiek izmantoti Dondersa definētie viļņu garumi Releja vienādojuma iegūšanai (sīkāk aprakstīti 1. pielikumā). Novērotājs redz apaļu lauku, kas sadalīts divās daļās. Viens sektors ir testa lauks (sarkanās un zaļās gaismas sajaukums) un otrs ir references lauks (oranžas krāsas gaisma). Ar vienu pogu iespējams mainīt sarkanās/zaļās gaismas proporciju, un ar otru pogu tiek mainīts oranžās gaismas spilgtums. Dihromātiskas redzes gadījumā novērotājam ir pieņemama plaša sarkani/zaļā attiecību amplitūda. Anomālā trihromātisma gadījumā atšķiras, vai novērotājs tiks klasificēts kā protanomāls (kuram vajadzēs lielāku sarkanās gaismas daudzumu), vai deiteranomāls (kuram vajadzēs lielāku zaļās gaismas daudzumu pieņemama saskaņošanas lauka iegūšanai) (2.17. attēls). (Birch, 1993; Shevell, 2003)



2.17. attēls.

A - Krāsu piekārtošana Nagela anomaloskopa testēšanas procedūrā - parādītas atšķirības krāsu proporciju un gaišuma līmeņu izvēlē neizmainītas krāsu redzes, kā arī protānu un deitānu defektu gadījumos.



B – saskaņošanas apgabali 127 anomāliem trihromātiem. Normāla trihromātisma gadījumā saskaņošanas apgabals ir ap 44 (SD \pm 2 skalas vienības). Dati gan protanomāliem, gan deiteranomāliem drīzāk norāda uz nepārtrauktu defekta pakāpju diapazonu nekā fiksētu skaitu apakšgrupu. (Birch, 1993)

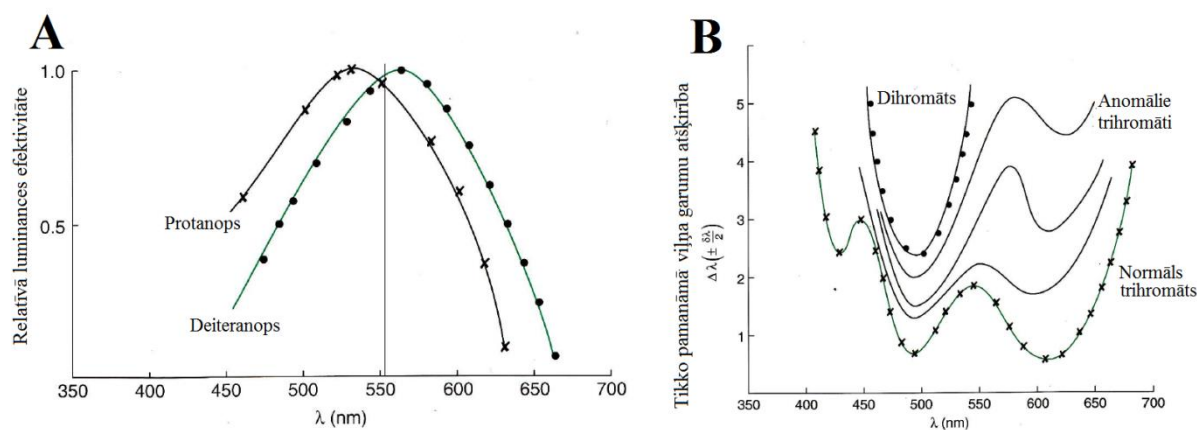
2.7. Krāsu izšķirtspēja sarkani-zaļā krāsu defekta gadījumā

2.7.1. Relatīvā luminances jutība un viļņu garumu izšķirtspēja sarkani-zaļā KRD gadījumā

Relatīvās luminances efektivitātes maksimumi (mērīti ar flikera fotometriju 25 Hz) atšķiras protānu un deitānu defektu gadījumos. No normālas krāsu redzes gadījuma visvairāk atšķiras protānu relatīvā luminances efektivitāte – tās maksimums ir novērojams pie aptuveni 535 nm (salīdzinājumam, normālas krāsu redzes gadījumā tas ir ap 555 nm). Protānu krāsu izšķirtspēja strauji samazinās virs 600 nm. Krāsu izšķirtspējas zudumu protānam virs 630 nm bieži sauc par „sarkanās spektra daļas saīsināšanos” (skatīt 2.18. A attēlu). Deitānu defektu gadījumos jutības maksimuma nobīde ir ietekmēta daudz mazākā mērā. Deiteranopijas gadījumā relatīvās luminances efektivitātes maksimums atrodas pie aptuveni 565 nm. Anomālā trihromātisma gadījumā relatīvās luminances efektivitātes maksimums ir mazāk nobīdīts nekā attiecīgā dihromātisma gadījumā. (Birch, 1993)

Uztveres sliekšņi, mērot ar baltu adaptācija lauku, uzrāda **sarkani-zaļās oponentās krāsu sistēmas** darbības samazinājumu protanopijas un deiteranopijas gadījumos. Uztveres sliekšņi, tos mērot ar krāsainiem foniem (*Wald – Marré* metode), uzrāda, ka dihromātisma gadījumā viens no trim krāsu mehānismiem iztrūkst un viens no trim krāsu mehānismiem ir traucēts vai ar mazāk izteiktu darbību anomālā trihromātisma gadījumā. (Birch, 1993)

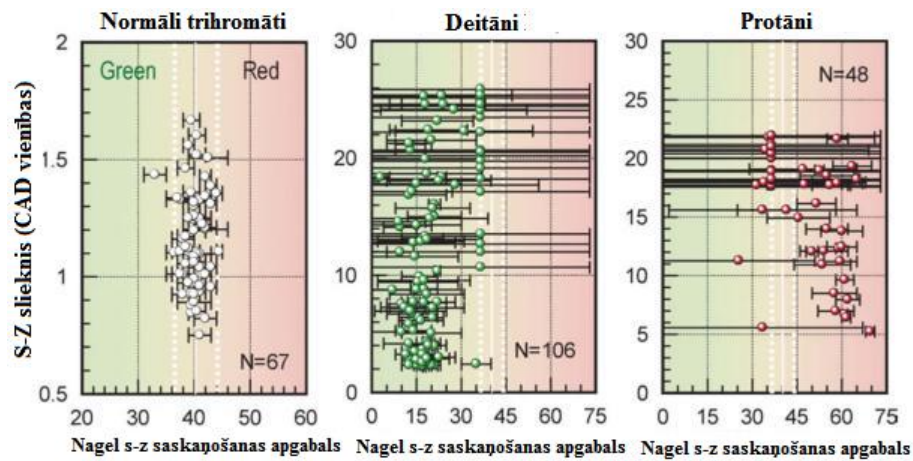
Krāsu (viļņa garumu) izšķirtspēja protanopijas un deiteranopijas gadījumos ir līdzīga. Pie 495 nm viļņa garuma visiem trim dihromātu veidiem ir novērojams izšķirtspējas minimums. Arī virs 520 nm visiem dihromātiem ir novērojams izšķirtspējas zudums – neviens no dihromātiem nespēj izšķirt atbilstošos viļņu garumus. Spektrālo krāsu skaits, ko var izšķirt, samazinās līdz aptuveni 30, salīdzinot ar 150 dažādiem viļņu garumiem, ko bez grūtībām izšķir normāli trihromāti. Anomālā trihromātisma gadījumā vērojama liela individuālo datu izkliede. Krāsu (viļņa garumu) izšķirtspējas dažādība var tikt demonstrēta kā līkņu kopa starp normālu trihromātisma gadījumu un dihromātismu. Dažu anomālo trihromātu krāsu izšķirtspēja ir tik tuva dihromātu gadījumam, ka vienīgā atšķirība ir nelielas izšķirtspējas saglabāšanās pie viļņu garumiem, kas pārsniedz 540 nm. Deiteranomālajiem trihromātiem novērojama izšķirtspējas nobīde dzeltenajā spektra daļā – normāliem trihromātiem novērojams minimums pie 590 nm, taču deiteranomāliem tas novērojams pie aptuveni 610 nm (skatīt 2.18. B attēlu). (Birch, 1993)



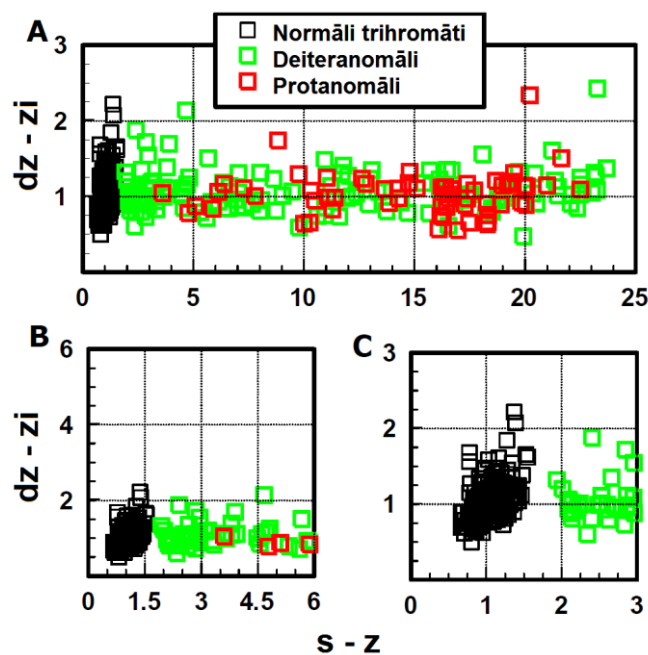
2.18. attēls. A - Relatīvā luminances efektivitāte protanopiem un deiteranopiem, salīdzinot ar normālu trihromātismu (salīdzinājumam ar taisnu līniju parādīts tikai līknes maksimums pie 555 nm). Līknes iegūtas ar flikera fotometriju (V_λ) (25 Hz, 2° redzes laukam). (Birch, 1993) B – viļņu garumu izšķirtspēja normālas krāsu redzes un dažādu veidu KRD gadījumā. Krāsu izšķirtspēja protanopiem un deiteranopiem sasniedz minimumu pie aptuveni 495 nm atzīmes, kā arī izšķirtspēja nav novērojama virs 540 nm. (Birch, 1993) Citu autoru modelētās (nevis eksperimentāli iegūtās) viļņu garumu izšķirtspējas līknes apskatāmas P.3.1. attēlā 3. pielikumā. (Nathans, 1999)

2.7.2. *L-tipa un M-tipa vāļišu fotopigmenta ģenētiskās variācijas un krāsu izšķirtspēja*

Zināms, ka Nagel ieviestie katram dalībniekam pieņemamie sarkani-zaļo krāsu saskaņošanas apgabali un to vidējās vērtības stipri atšķiras gan normāliem trihromātiem, gan indivīdiem ar KRD. Sarkani-zaļo KRD gadījumā daži dalībnieki pieņem plašu saskaņošanas apgabalu, turpretī citi pieņem šauru saskaņošanas apgabalu, taču izmantotā sarkani/zaļā gaismas proporcija nozīmīgi atšķiras no normāla trihromāta izmantotās. Vēl citu dalībnieku gadījumā saskaņošanas apgabalu galapunkti novietojas tikai nedaudz aiz normāla trihromāta definētā apgabala robežas. Literatūrā ir pat ziņots par gadījumiem, kad deiteranomāli dalībnieki veic Nagel saskaņošanu gluži tāpat kā normāli trihromāti (krāsu izšķirtspējas zudumu uzrāda citi testi, tādi kā CAD). (Barbur, *et al.*, 2008) Kā jau iepriekš tika minēts (skat. 2.17. B, 2.19. un 2.20. attēlus), deiteranomālu un protanomālu anomaloskopa saskaņošanas apgabalu un krāsu izšķirtspējas rezultātu daudzveidības dēļ tiek uzskatīts, ka defektu izpausme ir izšķirtspējas ziņā drīzāk individuāla, nekā veido fiksētu grupu skaitu. (Birch, 1993; Barbur, *et al.*, 2008) 2.20. attēlā redzams, ka protānu defektu gadījumā zemākie izšķirtspējas sliekšņi ir augstāki nekā veselai grupai deiteranomālo dalībnieku. Abu sarkani-zaļo KRD gadījumā novērojama liela sarkani-zaļo sliekšņa vērtību izkliede, kur vājāk izteiktā defekta gadījumā sliekšnis ir tikai nedaudz augstāks nekā normāla trihromāta gadījumā, savukārt, izteikta defekta gadījumā izšķirtspēja var būt pat 25 reizes sliktāka nekā normālam trihromātam (vidēji deiteranomālie dalībnieki sasniedz 50% no normālo dalībnieku s-z izšķirtspējas, turpretim protanomālo dalībnieku sniegums ir tikai ~ 20% no normālo dalībnieku snieguma) (Barbur, *et al.*, 2008). Tā kā dzeltenī-zilā kanāla darbība nav skarta, izšķirtspēja dzeltenī-zilās ass virzienā nav samazināta nevienai no aplūkotajām dalībnieku grupām (Birch, Rodríguez-Carmona, 2014).



2.19. attēls. CAD testa sarkano-zaļo (s-z) sliekšņu un anomaloskopa (Nagel) saskāņošanas apgabala izmēra un viduspunkta salīdzinājums normālu trihromātu, deitānu un protānu dalībniekiem. S-z sliekšņi CAD testā vāji korelē ar gan ar Nagel saskāņošanas apgabala lielumu, gan viduspunkta vērtību. (Barbur, *et al.* 2008) Redzams, ka visu grupu krāsu redzes veidu gadījumos raksturīga liela rezultātu izkliede. Anomaloskopa saskāņošanas apgabalu vērtības ir katram individuālas un nav iedalāmas noteikta skaita apakšgrupās.



2.20. attēls. Augšējā daļā (A) parādīti dzeltēni-zilie izšķirtspējas sliekšņi pret attiecīgajiem sarkani-zaļajiem izšķirtspējas sliekšņiem 238 normāliem trihromātiem (melnā krāsā) un 250 dalībniekiem ar sarkani-zaļo KRD (zaļie un sarkanie simboli). Rezultāti ir izteikti CAD (*Color Assessment and Diagnosis*) testa vienībās (sliekšņa mediānas vērtība aprēķināta no 238 dalībnieku ar normālu krāsu redzi datiem). S-z sliekšņu sadalījums ir parādīts apakšējos grafīkos, un tas palielinās no nulles līdz sešām CAD vienībām grafikā pa kreisi (B) un no nulles līdz trīs CAD vienībām grafikā pa labi (C), lai ilustrētu divas stingri izšķiramās dalībnieku kopas – normālus trihromātus un dalībniekus ar vāji izteiktu deiteranomāliju (Rodríguez-Carmona, *et al.*, 2005).

Neitz un Neitz apjomīgajā apkopojošajā rakstā par krāsu redzes ģenētikas pētījumiem (2011) uzsver: „Mutācijas un reorganizācijas gēnos, kas kodē īso, vidējo un garo viļņu jutības vāļišu pigmentus, ir atbildīgas par krāsu redzes defektiem. Ir identificētas mutācijas, kas atbild par **krāsu redzes receptoru skaitu, pigmentu absorbcijas spektriem**, vāļišu funkcionēšanu un dzīvotspēju, un vāļišu mozaīkas topogrāfiju” (Neitz, Neitz, 2011). No ģenētikas viedokļa skatoties, krāsu redzes defektu veidošanās ir izskaidrota. Ir fiksēts daudzums **fotopigmentu** jutības līkņu maksimuma ($\delta\lambda_{\max}$) **novietojuma variantu**, ko rada vāļišu fotopigmentu defektīva ģenētiskā kodēšana (Barbur, *et al.*, 2008). Viens no iespējamajiem skaidrojumiem atšķirīgajiem krāsu saskaņošanas rezultātu datiem ir defektīvo fotopigmentu $\delta\lambda_{\max}$ novietojums (Barbur, *et al.*, 2008). Interesanti ir noskaidrot, cik lielā mērā ģenētiski noteiktie fotoreceptora pigmenta absorbcijas spektra parametri nosaka indivīda krāsu izšķirtspēju? Citiem vārdiem sakot, vai ar ģenētiski noteikto fotoreceptora pigmenta absorbcijas spektra $\delta\lambda_{\max}$ noskaidrošanu pietiek, lai izskaidrotu atšķirīgās krāsu izšķiršanas spējas un saskaņošanas rezultātus KRD indivīdu populācijā?

Izrādās, ka deiteranomālu dalībnieku gadījumā lielā mērā var paredzēt krāsu izšķirtspēju un saskaņošanas apgabala izmēru, ja ir zināms vāļišu fotopigmentu spektrālās jutības $\delta\lambda_{\max}$ (Neitz, *et al.*, 1996; Shevell, *et al.*, 1998; Barbur, *et al.*, 2008), taču ar defektīvās vāļišes $\delta\lambda_{\max}$ novietojuma noskaidrošanu ģenētisko analīžu rezultātā vien nepietiek. Piemēram, viens no faktoriem, ko jāņem vērā, ir individuālās normālās garo viļņu jutības vāļišes $\delta\lambda_{\max}$ novietojums. 2.6. attēlā bija parādītas individuālās vāļišu pigmentu absorbcijas spektru atšķirības, kā arī analizēts, kādu aminoskābju mutāciju rezultātā rodas nobīdes attiecīgajos fotopigmentu jutības spektru maksimumos. Visas spektrālās izmaiņas tiek kodētas eksonos nr. 2, 3, 4 un 5. Lielāko spektrālo nobīdi kodē eksons nr. 5, kurš sadala fotoreceptorus abās atšķirīgajās klasēs (vidējo un garo viļņu jutības vāļišēs). Tas nozīmē, ka izmaiņas eksonos nr. 2, 3 un 4, visticamāk, varētu būt atbildīgas par deiteranomālijas rašanos. Neitz un kolēģu (1996) modelis paredz: ja tiktu konstatētas mutācijas visos trīs eksonos (2-4), tiktu radīta lielākā iespējamā $\delta\lambda_{\max}$ nobīde, tādējādi nodrošinot augstāko iespējamo izšķirtspēju deiteranomālo grupā. Relatīvi mazāk skarto eksonu gadījumā šis modelis attiecīgi paredz sliktāku krāsu izšķirtspēju. 4. pielikumā P4.1. attēlā ir parādīti pētījumā izmantotie simboli, dalībnieku krāsu izšķirtspējas rezultāti un dalībnieku ģenētisko testu rezultāti. (Neitz, *et al.*, 1996) Līdzīgus rezultātus uzrāda arī cits pētījums, kur no deiteranomālu ģenētikas testiem prognozētā $\delta\lambda_{\max}$ vērtību savstarpējā nobīde salīdzināta ar iegūtajiem Nagel saskaņošanas apgabalu izmēriem. Tika iegūta cieša korelācija (Spirmena korelācija $r_s = -0,88$). Nagel saskaņošanas apgabali strauji samazinās, pieaugot ģenētiski prognozētajai $\delta\lambda_{\max}$ vērtību nobīdei. (Shevell, *et al.*, 1998)

Fotoreceptoru pigmentu $\delta\lambda_{\max}$ vērtību nobīdes nav vienīgais parametrs, kas ietekmē krāsu izšķirtspēju un saskaņošanas rezultātus KRD novērotājiem (Barbur, *et al.*, 2008). Fotopigmentu spektrālās jutības $\delta\lambda_{\max}$ nobīdes neizskaidro gadījumus, kad Nagel saskaņošanas apgabala viduspunktu vērtības ir raksturīgas izmainītai krāsu redzei, taču apgabala izmērs ir ārkārtīgi mazs (Thomas, *et al.*, 2011). **Fotopigmentu optiskais blīvums** ietekmē gan vāļišu spēju „noķert fotonu”, gan iegūstamo spektrālo atbildes funkciju (Barbur, *et al.*, 2008).

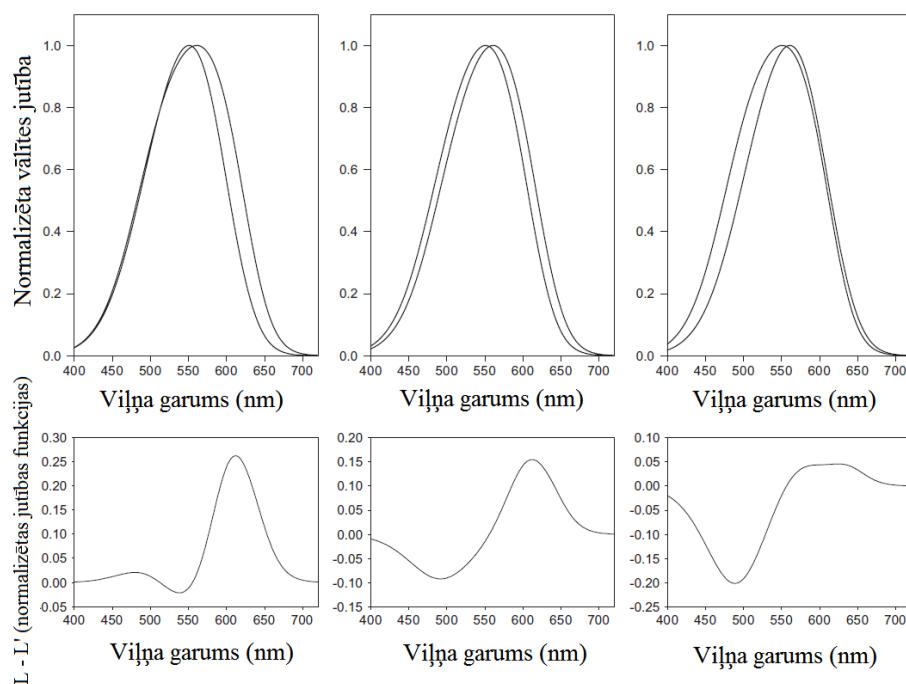
Krāsu saskaņošanas spēju lielā mērā nosaka fotopigmenta koncentrācija vāļītēs. Fotopigmenta optiskais blīvums ietekmē krāsu uztveri caur procesu, ko sauc par „paš-skrīningu” (*self-screening*): optisko pigmentu klātbūtne vāļītē lielā daudzumā izmaina tās spektrālo jutību. Tā kā gaisma, kas sastāv no plaša viļņu garumu spektra, iet cauri vāļītei aksiāli, tā tiek absorbēta nevienmērīgi: fotoni ar viļņa garumu, kas ir tuvs vāļītes spektrālajam maksimumam, tiks absorbēti ar lielāku varbūtību virspusējās molekulās, tātad fotoni ar citiem viļņa garumiem būs vairāk pārstāvēti dziļāk vāļītē. Rezultātā vāļītes spektrālās jutības līkne būs platāka nekā mazāk optiski blīvai vāļītei. Fotopigmentu optiskajam blīvumam pieaugot, spektrālās jutības līkne kļūst platāka. Divas vāļītes, kas satur vienu un to pašu fotopigmenta veidu, bet dažādos blīvuma līmeņos, atšķiras ar spektrālo jutību. To izvades signāli būs atšķirīgi (skat. 2.21. attēlu). (Thomas, *et al.*, 2011)

Katra fotopigmenta fotonu daudzums (daļskaitļa veidā), kas tiek absorbēti kā funkcija no viļņa garuma, tiek aprēķināta kā 2.22. vienādojumā:

$$F(\lambda)=1-10^{-OD_*\varepsilon(\lambda)}, \quad (2.22.)$$

kur OD – vāļītes optiskais blīvums jutības spektra maksimumā, $\varepsilon(\lambda)$ – vāļītes fotopigmenta spektrālās jutības līkne (normēta uz 1). (Barbur, *et al.*, 2008)

Optiski blīvāka vāļīte būs jutīgāka viscaur pārstāvētajā spektrā. Ir ziņots par gadījumiem, kad pateicoties aprakstītajam procesam, tiek iegūta krāsu izšķirtspēja. Neitz *et al.* (1999) apraksta protanopu novērotāju, kuram ģenētiskā pārbaude uzrādīja funkcionējošus divu veidu fotoreceptorus (S-tipa vāļītes un M-tipa vāļītes), bet krāsu redzes testos tika uzrādīta trihromātiska redze. Autori uzskatīja, ka M-tipa vāļītes bija ar divu veidu optiskajiem blīvumiem un spēja nodrošināt ierobežotu izšķirtspēju sarkani-zaļajā spektra daļā. (Thomas, *et al.*, 2011)



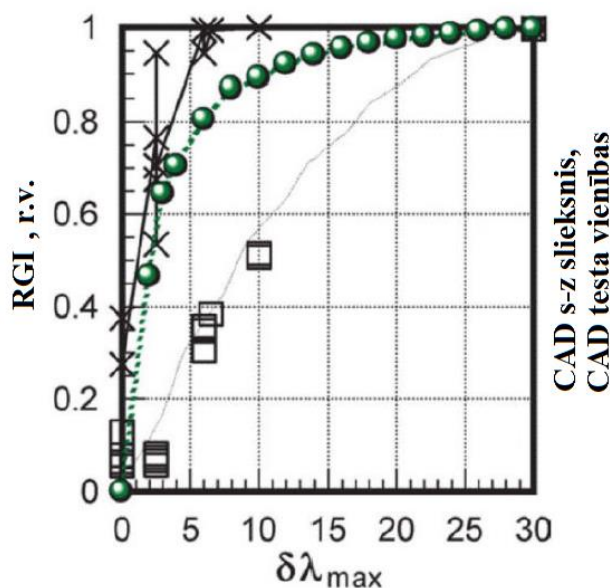
2.21. attēls. Deiteranomāla novērotāja L-tipa vāļišu spektrālās jutības funkcijas. Augšā pa kreisi – pozitīva, augšā vidū – nekāda un augšā labajā pusē – negatīva optiskā blīvuma disparitāte. Apakšējie trīs grafiki parāda iegūto jutības līkņu atšķirību (atšķirība = $L - L'$). Pozitīvas blīvuma disparitātes gadījumā, salīdzinot ar nulles disparitātes gadījumu, tiek iegūts izšķirtspējas uzlabojums garo viļņu spektra daļā. (Thomas, *et al.*, 2011)

Shevell un He (1997) pētījumā matemātiski modelēta, pirmkārt, $\delta\lambda_{\max}$ vērtību savstarpējās nobīdes, otrkārt, vidējo viļņu un garo viļņu jutības vāļišu optiskā blīvuma parametru un, treškārt, pre-receptoru signāla filtrēšanas faktoru ietekme uz Releja krāsu saskaņošanas rezultātiem. Pētījuma rezultātā tika secināts, ka vāļišu pigmenta optiskā blīvuma parametrs nav noteicošais krāsu saskaņošanas rezultātu izskaidrošanai. Katram indivīdam ir atšķirīgs sliekšnis efektīvam pigmenta optiskā blīvuma daudzumam. Vēl viens šī pētījuma secinājums bija tāds, ka galvenokārt krāsu redzes sniegumu nosaka fotopigmentu $\delta\lambda_{\max}$ vērtību savstarpējās nobīde. (Shevell, He, 1997)

Jaunākais no aprakstīto pētījumu grupas par daudzfaktoru ietekmi uz krāsu izšķirtspējas rezultātiem deiteranomāliem ir Barbur *et al.* 2008 pētījums. Arī šajā pētījumā tika analizēta deiteranomālo dalībnieku ģenētika un paredzēti Nagel saskaņošanas rezultāti un dalībnieku veikspēja CAD testā. Autori ierosināja ērtu mērvienību sarkani-zaļā spektra izšķirtspējas klasificēšanai no anomaloskopa mērījuma rezultātiem – sarkani-zaļo izšķirtspējas indeksu (RGI: *red–green discrimination index*), ko iegūst:

$$RGI = \left[1 - \frac{(R - MR)}{73} \right], \quad (2.23.)$$

2.23. vienādojumā R apzīmē testa dalībnieka Nagela saskaņošanas apgabalu un MR apzīmē vidējo saskaņošanas apgabalu neizmainītas krāsu redzes gadījumā. Iegūstamais RGI ir lielums robežās no 0 (dihromātiskas redzes gadījumā) līdz aptuveni 1 (augstas izšķirtspējas gadījumā (rezultāts matemātiski var arī nedaudz pārsniegt 1)) (Barbur, *et al.*, 2008). Jāpiebilst, ka RGI rezultāts 1 nenozīmē neizmainītu krāsu redzi, bet gan šauru saskaņošanas apgabalu anomaloskopa eksperimentā. 2.22. attēlā parādīti autoru izveidotā modeļa teorētiskie un praktiski iegūtie RGI kā funkcija no fotopigmentu spektru $\delta\lambda_{\max}$. Redzams, ka modelētie rezultāti (simboli O) labi paredz indivīdu RGI, pat neņemot vērā pārējo faktoru ietekmi (fotopigmentu optiskais blīvums u.c.) uz krāsu saskaņošanu (simboli X) un krāsu izšķirtspēju (s-z sliekšņi CAD testā, simboli \square). (Barbur, *et al.*, 2008) Lasītāja uzmanība tiek vērsta uz īpatnēju sakarību – ģenētiskie testi un prognozētā fotopigmentu spektru $\delta\lambda_{\max}$ visos trīs analizētajos pētījumos cieši korelē ar krāsu saskaņošanas un izšķirtspējas testu rezultātiem, bet to pašu indivīdu krāsu izšķirtspējas rezultāti nekorelē ar saskaņošanas rezultātiem (2.19. attēls).



2.22. attēls. RGI, kas iegūts no anomaloskopa saskaņošanas rezultātiem, kur vērtība 0 norāda uz maksimāli platu saskaņošanas apgabalu, bet vērtība 1 uz augstai izšķirtspējai raksturīgu šauru saskaņošanas apgabalu, kā funkcija no $\delta\lambda_{\max}$. Uz y ass attēlots no ģenētikas testiem iegūtais fotoreceptoru pigmentu spektru $\delta\lambda_{\max}$. Ar (O) attēloti autoru izstrādātā modeļa (kas ņem vērā tikai $\delta\lambda_{\max}$ parametru) prognozētie RGI dati, bet ar (X) – faktiski iegūtie krāsu saskaņošanas dati. Pievienoti arī ar CAD testu iegūtie s-z izšķirtspējas sliekšņi (\square). (Barbur, *et al.*, 2008)

3. DARBĀ IZMANTOTĀS METODEDES

3.1. Krāsu redzes pārbaude ar pseidoizohromatiskajām platēm

PIC plates ir veidotas tā, lai redzes pārbaude ar tām notiktu aptuveni 0,60 – 0,70 m attālumā no acīm. Eksaminētājs šķir lapas ar noteiktu, stingri kontrolētu laika intervālu dažu sekunžu ilgumā. Redzes uzdevums parasti ir vienkāršs un papildus iepazīstināšanu neprasa. Parasti instrukcijas, kas tiek sniegtas dalībniekam, ir, piemēram, nosaukt visus redzamos simbolus tad, kad tiek pāršķirtas lapas. Dažos gadījumos atļauta ir rādāmkoku izmantošana. Ja simbols netiek ieraudzīts, tad tiek šķirta nākošā lapa. Ja dalībnieks neredz simbolu, nereti tas viņu satrauc, tāpēc vēlams šādu varbūtību pieminēt pirms testa veikšanas. Nereti testiem ir pievienota(s) plate(s), kas paredzētas iepazīstināšanai ar turpmāko uzdevumu. Richmond Hardy-Rand-Rittler (HRR) (2002, 4.izdevums) krāsu redzes testam, kas izmantots darbā, ir piecas iepazīšanās plates, kuru rezultāti tālāk netiek ņemti vērā. Iepazīšanās plates der arī, lai pārliecinātos, vai testa dalībnieka redzes asums ir pietiekams, lai veiktu uzdevumu. Tās arī laicīgi norāda uz iespējamu testa dalībnieka KRD simulēšanu, jo krāsas testa platēs izraudzītas tā, lai būtu redzamas jebkuram dalībniekam. (Birch, 1993; HRR testa instrukcija, 2002)

Dalībnieks uz PIC plati skatās tieši un simbols viņam jānosauc nekavējoties. Aptuveni četras sekundes ir laiks, kas maksimāli atļauts simbola nosaukšanai. Lēni nosauktas atbildes var liecināt par vāji izteiktu KRD. Ja eksaminētājam ir šaubas par rezultātu interpretēšanu lēnu atbilžu saukšanas gadījumā, papildus būtu jāizmanto citi testi KRD novērtēšanai. HRR testēšanas laikā tiek pierakstīti katras plates rezultāti. Nelielas kļūdas kā, piemēram, simbolu nosaukšanā „6” jaukšana ar „8” parasti nenorāda uz KRD. HRR testa metodikas aprakstā definēts, ka tests sākotnēji paredz tikai skrīninga plašu izmantošanu (kopsummā 5). Atbildes ietver krāsaino simbolu skaitu platē, to formu nosaukšanu un atrašanās vietas norādīšanu. Ja visas skrīninga plates atbildētas pareizi, pārējās dalībniekam netiek rādītas, un tiek secināts, ka dalībnieka krāsu redze ir normāla. Ja tiek pieļauta kļūda skrīninga platēs, tiek veikta tālākā pārbaude ar pārējām 14 platēm (4 no tām ir paredzētas tritāna defekta noteikšanai, 10 – protāna un deitāna defekta noteikšanai). HRR tests atšķiras no citiem PIC testiem ar to, ka vienas plates ietvaros atrodas abiem KRD defektiem (gan protānam, gan deitānam) paredzēti simboli. Novērtējums par atbilstošu KRD veidu notiek, skaitot katra defekta veidam paredzētos nepareizi nosauktos/neredzētos simbolus. Ja, piemēram, kļūdu skaits protāna kolonnā pārsniedz kļūdu skaitu deitāna kolonnā, testa rezultāts nosaka, ka dalībnieks

visticamāk ir protāns (un otrādi). Ja kļūdu skaits abās kolonnās ir vienāds, testa rezultāts ir „neklasificēts sarkani-zaļais KRD”. (Birch, 1993; HRR testa instrukcija, 2002; Cole, 2007)

Lai novērstu iespēju, ka dalībnieks simbolu skaitu, atrašanās vietu, veidu vai visus minētos varētu iegaumēt, dažkārt plates jārāda jauktā secībā. Nedaudz atšķiras krāsu redzes testēšana, ja dalībniekam ir psihiska rakstura/mācīšanās vai lasīšanas problēmas, taču šajā darbā tās netiks aplūkotas sīkāk. Atkārtoti tiek uzsvērts, ka PIC testi galvenokārt paredzēti skrīninga nolūkiem. (Birch, 1993; HRR testa instrukcija, 2002, Cole, 2007) Kaut arī to jutība un specifiskums KRD atklāšanā ir augsti, to rezultātiem defekta veida klasifikācijā ir drīzāk ieteikuma raksturs makulas pigmenta blīvuma individuālo atšķirību dēļ.

3.2. Krāsu redzes pārbaude ar anomaloskopu

Pirms darba ar anomaloskopu vēlams pārlicināties par tā kalibrāciju vai kalibrēt to, nosakot normālai krāsu redzei raksturīgu saskaņošanas apgabalu. Krāsu redzes pārbaude ar anomaloskopu sākas ar testējamā dalībnieka iepazīstināšanu ar testa lauka krāsas kontroles rīkiem. Dalībnieks ar divu pogu palīdzību var kontrolēt testa lauka sarkani zaļās krāsas attiecību un atskaites (references) lauka dzeltenās gaismas spožumu līdz abas apļa puses izskatās pilnīgi vienādas. Procedūras laikā nav nepieciešama krāsu nosaukšana. Parasti pirmo testa mēģinājumu neieskaita, bet ieskaita otro, trešo un ceturto mēģinājumu. Izvēles veikšanai un/vai saskaņošanai atvēlēts ierobežots laiks – vidēji desmit sekundes, lai nenotiktu krāsu adaptācija un neveidotos pēcefekti. Pēc atvēlēta laika beigām krāsu redze tiek adaptēta neitrālai krāsai un tad saskaņošanas procedūra var turpināties. Kad pirmie rezultāti ir iegūti, tie tiek izmantoti kā norāde otra testa posma veikšanai. Otrs un svarīgākais anomaloskopa testēšanas posms ir saskaņošanas apgabala robežu meklēšana. Testētājs iestata sarkani/zaļo krāsu attiecību konkrētā līmenī un dalībnieka uzdevums ir atbildēt uz jautājumu ”vai atskaites lauku (augšējo) ir iespējams saskaņot ar apakšējo?”. Tiek prasītas „jā/nē” atbildes un testētājs maina sarkani/zaļo krāsu attiecību ar noteiktu soli visā saskaņošanas apgabala diapazonā, kamēr tiek iegūtas pieņemamā lauka abas robežvērtības. Iegūtā saskaņošanas apgabala robežvērtības tiek salīdzinātas ar normālas krāsu redzes robežām un uzstādīta diagnoze. Procedūra tiek veikta katrai acij atsevišķi. Datorizētas vadības anomaloskopa pārbaudes procedūra tiek īstenota, rādot iepriekš sagatavotu sarkani-zaļās gaismas salikumu kopu. Dalībnieka uzdevums ir atbildēt ar „jā/nē”, vai abi pusapļi ir vienādā krāsā. Izvēles veikšanai tiek atvēlētas dažas sekundes. Dažās sistēmās (ieskaitot HMC Oculus anomaloskopu, kas tiek izmantots šajā darbā) starp stimulu prezentācijām tiek nodrošināts balts ekrāns, kas paredzēts neitrālās adaptācijas nodrošināšanai. Nedaudz atšķiras krāsu redzes testēšana, ja dalībniekam

ir psihiska rakstura/mācīšanās vai lasīšanas problēmas, tad var palīdzēt krāsu nosaukšana labākā saskaņošanas rezultāta iegūšanai. (Birch, 1993)

3.3. Krāsu redzes pārbaude ar Farnsworth D-15 testu

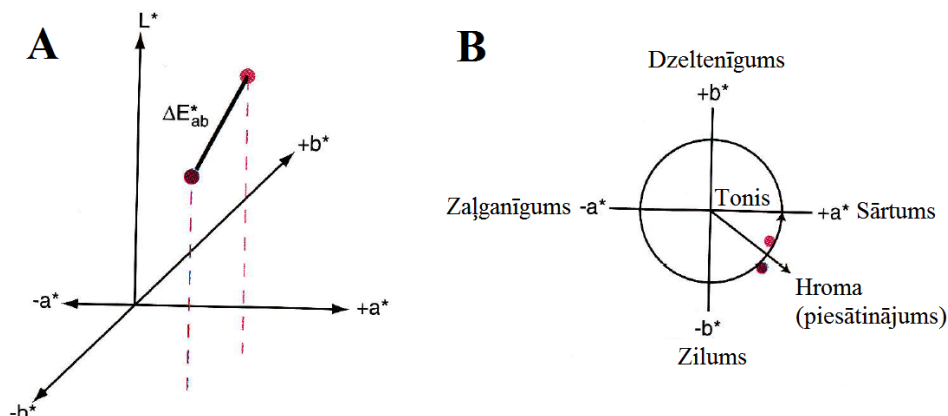
Krāsu sakārtošanas tests Farnsworth D-15 (turpmāk tekstā D-15) iedala krāsu redzes veiktspēju divās grupās. Pirmā satur normālas neizmainītas krāsu redzes gadījumus un nelielu krāsu redzes defektu. Otra grupa satur vidējas un stipras pakāpes KRK. Tests tiek izmantots dažādu industriju darbinieku atlasē, uzskatot, ka tie, kas testu veic bez kļūdām, varēs droši izmantot industriālos krāsu kodus. Klīniskie pētījumi uzrāda, ka aptuveni 5% vīriešu izkrīt D-15 testā, salīdzinot ar iedzimto KRK sastopamību 8% vīriešu populācijā. Lai izkrītu D-15 testā, pietiek ar vienu pieļautu kļūdu, kas atbilst sajauktai 15 testa „muciņu” krāsu secībai. Dalībnieka sakārtotā krāsu secība tiek attēlota apļveida diagrammā, savienojot punktus salikto „muciņu” secībā, kur katrs punkts atbilst atbilstošās „muciņas” hromatiskajām vērtībām. Pseidoizohromatiskā krāsu jaukšana izraisa „muciņu” novietošanu nepareizā secībā un krāsas, kam vajadzētu atrasties apļveida diagrammā blakus viena otrai, tiek novietotas pretī. Katra veida KRK gadījumā raksturīgs tipisks līniju izvietojuma raksturs. Praksē tiek izmantoti divi „muciņu” komplektu pāri – oriģinālais un nepiesātinātais (*desaturated*), abu pāru gadījumā tonis saglabājas, atšķiras krāsu piesātinājums. Ir vairāki veidi, kā praksē tiek interpretēti testa rezultāti. Pats vienkāršākais paredz kļūdu saskaitīšanu, sarežģītākie – jaukto krāsu atšķirību aprēķinus CIELUV un CIELAB krāsu telpās, kā arī vektoru analīzi. (Birch, 1993; Cole, 2007)

3.4. Pilnā krāsu atšķirība ΔE

Lai atšķirību starp jebkurām divām krāsām kādā no krāsu telpām attēlotu skaitliski, vēsturiski tika ieteikts piesaistīt to kādai no uztveres ziņā vienmērīgām krāsu telpām. Zinātnē un tehnikā, ražošanā un citās jomās plaši tiek izmantota pilnā krāsu atšķirība CIELAB krāsu telpā: ΔE^*_{ab} (saukta arī par ΔE , turpmāk saīsināti lietota kā ΔE) (3.1. A un B attēls). CIELAB krāsu uztvere ir salīdzinoši vienmērīga un fizikālie krāsu mērījumi šīs telpas vienībās labi korelē ar redzes uztveri. (Berns, 2000)

Lai salīdzinātu divas interesējošās krāsas (piemēram, ja interesējošā ΔE ir starp diviem krāsu paraugiem, P_1 un P_2), var tikt aprēķināti un savstarpēji salīdzināti vairāki tās raksturojošie parametri: atšķirība to gaišuma līmenī (ΔL^*), sārtumā/zaļumā (Δa^*), dzeltenumā/zilumā (Δb^*). Var tikt aprēķināti arī attiecīgās atšķirības tonī (ΔH^*_{ab}) un piesātinājumā (ΔC^*_{ab}), kā arī no parametriem H^*_{ab} , ΔL^* un ΔC^*_{ab} iespējams aprēķināt ΔE .

Attiecīgi pārrēķini, izmantojot a^* un b^* koordinātas, doti vienādojumos 3.1. – 3.4. (Berns, 2000).



3.1. attēls. A – Divu stimulu krāsu atšķirība var tikt novērtēta, atliekot to krāsu raksturojošo koordinātu vērtības CIELAB krāsu telpā. Eiklīda attālums starp jebkuriem diviem mūs interesējošiem punktiem tiek definēts kā ΔE^*_{ab} . B – Dažkārt krāsas tiek atliktas, atmetot to gaišuma dimensiju (L^*). Krāsas CIELAB krāsu sistēmā apraksta kā vairāk zaļu/sarkanu un dzeltenu/zilu, vai arī apraksta to toni un piesātinājumu. (Berns, 2000)

$$\Delta L^* = L^*_{P1} - L^*_{P2} \quad (3.1.)$$

$$\Delta a^* = a^*_{P1} - a^*_{P2} \quad (3.2.)$$

$$\Delta b^* = b^*_{P1} - b^*_{P2} \quad (3.3.)$$

$$\Delta E^*_{ab} = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \quad (3.4.)$$

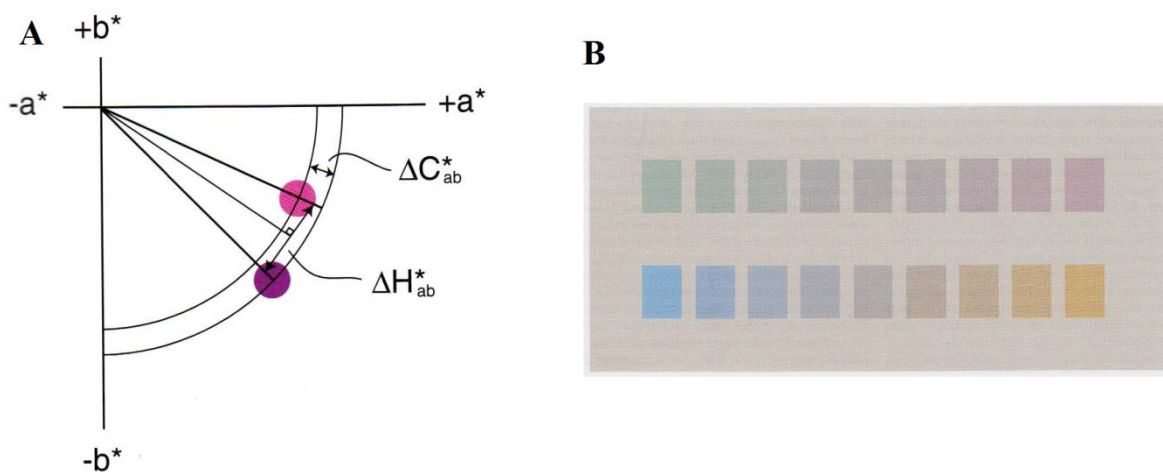
Saskaņā ar Eiklīda attāluma formulu starp diviem punktiem CIE LAB telpā, viena ΔE vienība, aprēķināta, izmantojot 3.4. formulu ir aptuveni vienāda ar 2,3 JND (tikko pamanāmās atšķirības *just noticeable difference*) vienībām, ko ieviesis *D.Nickerson* (Mokrzycki, Tatol, 2011):

$$\Delta E^*_{ab} \approx 3,2 JND \quad (3.5.)$$

ΔE nav viendabīgs, ar uztveri tieši saistīts mērs. Uztveres atšķirības ΔE vienībās CIELAB krāsu telpā atšķiras. Standarta novērotājs uztver krāsu atšķirību sekojoši, kad:

- $0 < \Delta E < 1$ – novērotājs neredz atšķirīgas krāsas,
- $1 < \Delta E < 2$ – tikai apmācīts novērotājs atšķir krāsas,
- $2 < \Delta E < 3,5$ – arī neapmācīts novērotājs atšķir krāsas,
- $3,5 < \Delta E < 5$ – ir redzama skaidra atšķirība starp krāsām,
- $5 < \Delta E$ – novērotājs redz divas dažādas krāsas (dati iegūti eksperimentāli un statistiski analizēti). (Mokrzycki, Tatol, 2011)

Darba autore izvēlējās raksturot pieaugušo krāsu atšķirību jaunajā testā, izmantojot krāsu atšķirību ΔE starp stimula un fona krāsām, zinot, ka Eiklīda attāluma aprēķina laikā tiek pazaudēta informācija par krāsu gaišuma līmeņu, piesātinājuma un toņu līmeņa atšķirībām, gala rezultāts ir viens skaitlis. Tomēr, autore vēlās demonstrēt, ka krāsu redzes testā, kura izveidei izvēlētas neitrālās krāsas, būtisku ieguldījumu gala ΔE sniedz tikai ΔC_{ab}^* (skat. 3.2. A attēlu). 3.2. B attēlā parādītas orientējošas ΔE izmaiņas sārti/zaļajām un dzelteni/zilajām krāsām.



3.2. attēls. A - Parādītas divas krāsas un kā veidojas to atbilstošais ΔC_{ab}^* – attālumu difference no centra radiāli; ΔH_{ab}^* – attālums vienai no otras azimutāli (Berns, 2000). Krāsām, kas atrodas uz neitrālās konfūzijas līnijas, lielāko ieguldījumu pilnajā ΔE sniedz Δa^* (un sekojoši ΔC_{ab}^*) daļa, jo gaišuma līmeņi ir ļoti tuvi un novirze no konfūzijas līnijas – neliela. Tātad mūsu gadījumā ΔE būs tieši proporcionāls ΔC_{ab}^* . B – Katra rindiņa attēlo krāsas, ko vienu no otras atdala konstantas CIELAB ΔE lieluma izmaiņas – augšējās rindas gadījumā katru krāsa no blakus esošās atšķiras par $\Delta E_{ab}^* = 4$ vienībām pa a^* dimensiju, apakšējās rindas gadījumā par $\Delta E_{ab}^* = 12$ vienībām pa b^* dimensiju (Shevell, 2003).

3.5. Attēlu multispektrālā analīze

Kolorimetriskās un spektrometriskās metodes krāsu novērtēšanai ir objektīvas metodes, tās ļauj noteikt testos izmantoto krāsu atbilstību dihromātu konfūzijas līnijām (Lee, Honson, 2003; Bailey, *et al.*, 2004). Turpinot Optometrijas un Redzes zinātnes nodaļā uzsāktos pētījumus par krāsu redzes testu izstrādi un to fizikālu parametru raksturošanu (Fomins, Ozolinsh, 2011), darbā tika izmantota izveidoto pseidoizohromatisko plašu multispektrālo attēlu uzņemšana un pielietoti matemātiskie algoritmi, kas balstās uz cilvēka redzes īpatnībām, testu veikspējas raksturošanai. Multispektrālo attēlu uzņēmumi visā redzamās gaismas diapazonā sniedz iespēju iegūt uzņemtā attēla katra pikseļa spožuma vērtības pie

interesējošā viļņa garuma (ko nesniedz kolorimetrijas un spektroskopijas metodes) (Fomins, Ozolinsh, 2011). Iegūtie multispektrālie dati tālāk tika izmantoti gan dominējošo krāsu vērtību, gan hromatisko vērtību izkliežu aprēķiniem, analizējot izveidoto plašu druku un krāsu atveidi. Otrkārt, iegūtie multispektrālie attēli matemātiski tika pārveidoti uztveres modelēšanai gan atsevišķu vāļišu kanālu, gan uztvertā attēla analīzei dažādu krāsu redzes traucējuma veidu un pakāpju gadījumā.

3.6. Vāļišu atbilžu modelēšana

Iedzimta KR D gadījumā redzes nodrošināšanā nepiedalās vai samazinātā mērā piedalās traucētā vāļīte (šī darba gadījumā ir izmainīta L-tipa vai M-tipa vāļītes darbība). Ar multispektrālo kameru uzņemtos attēla spektrālos datus ir iespējams pārvērst par vāļišu signāliem (L , M , S) un veikt dihromātijas (vai anomālās trihromātijas) simulāciju. Lai analizētu datus vāļišu signālu kontekstā, iegūtais spektrs ir matemātiski jāpārveido par trīs tipu vāļišu signāliem. Katra multispektrālā attēla pikseļa intensitātes vērtība tiek reizināta ar attiecīgas vāļītes jutības funkciju, un reizinājumu rezultāti summēti, lai iegūtu kopējo vāļītes ierosinājuma attēlu (3.6. vienādojums) (Fomins, Ozolinsh, 2011):

$$L = \sum_{420}^{720} W(\lambda) * l(\lambda); \quad M = \sum_{420}^{720} W(\lambda) * m(\lambda); \quad S = \sum_{420}^{720} W(\lambda) * s(\lambda), \quad (3.6.)$$

Vienādojumā 3.6. $W(\lambda)$ ir attēla pikseļa refleksijs intensitāte; $l(\lambda)$, $m(\lambda)$, $s(\lambda)$ ir vāļišu jutības funkcijas 10° standarta novērotājam. Vāļišu jutības funkcijas tika ņemtas no avota (Stocknam, Sharpe, 2000).

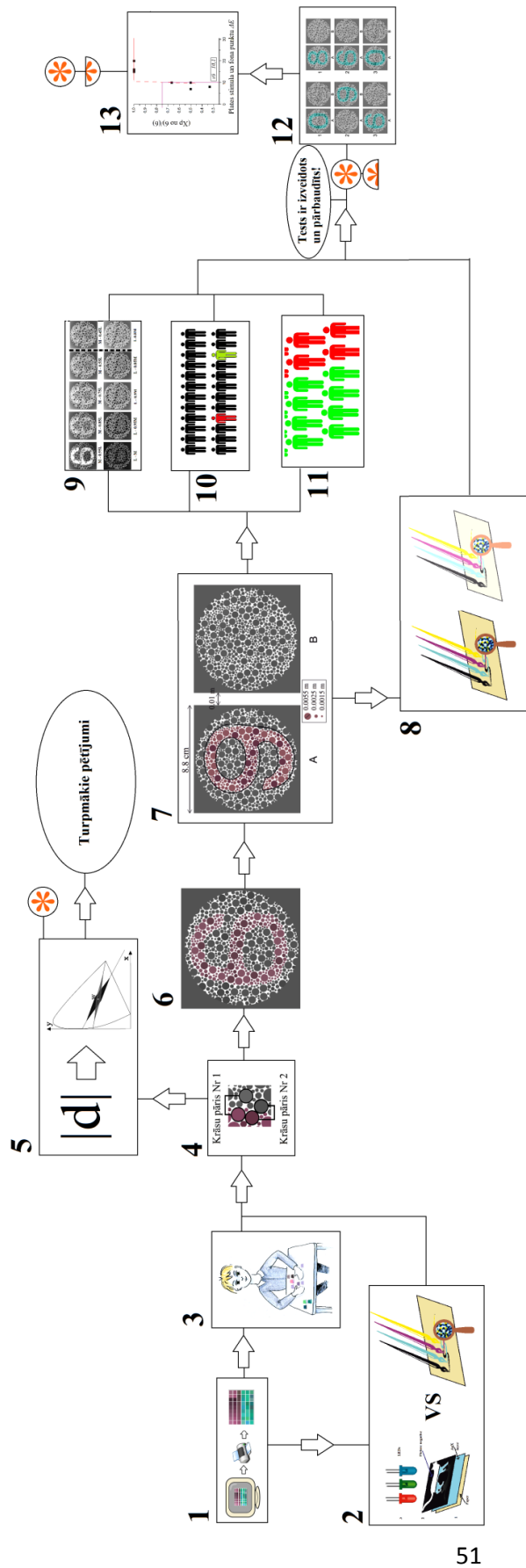
Zināms, ka vāļišu signāli tiek apstrādāti trīs līmeņos: L+M ((vai L+M+S) spožuma kanāls), L-M (sarkani-zaļais oponentais kanāls) un S-(L+M) (dzeltenī-zilais oponentais kanāls) (Snowden, *et al.*, 2012). Protanopija tiek raksturota ar L-tipa vāļītes darbības zudumu un deiteranopija - ar M-tipa vāļītes darbības zudumu (Birch, 1993), defekta (D) simulācijai tika lietots sekojošs vienādojums 3.7.:

$$D = aL - bM, \quad (3.7.)$$

kur a , b ir anomālijas koeficienti (robežās no 0 (normālas redzes vai neskartas vāļišu darbības gadījumā) līdz 1 (dihromatātijas gadījumā)).

4. REZULTĀTI UN DISKUSIJA

Apkopjoša pētījuma eksperimentu shēma parādīta 4.1. attēlā.



4.1. attēls. Eksperimenta shēma. 1 – Paraugu izveide; 2 – Drukas veidu pētījumi; 3 – Krāsu pāru piekārtošanas eksperimenti; 4 – Krāsu pāru ieguve; 5 – Stimulu hromatisko vērtību attālumu no konfūzijas līnijām analīze un modeļa izstrāde; 6 – Šablonu izstrāde; 7 – Testa izveide; 8 – Krāsu noturības pētījumi; 9 – vāļišu signālu modelēšana; 10 – Testa veiktspējas pārbaude populācijā; 11 – Testa veiktspējas pārbaude dalībniekiem ar KRĀD; 12 – Testa 2. Versijas izstrāde; 13 – Krāsu izšķirtspējas sliekšņa analīze. Ar ovāliem atzīmēta stadija, kurā pētījumi turpinās (pēc 5. punkta) un pētījumu stadija, kurā izveidotais tests ir pārbaudīts (pēc 11. Punkta). Ar zvaigznēm apļos atzīmētas pētījuma stadijas, kurās tika izvirzītas tēzes (vai daļa no tēzēm).

4.1. Krāsu piekārtošanas eksperiments un pseidoizohromatiska testa izveide

KAMS tests (burtu salikums no izstrādātāju vārdiem: Kaiva, Ausma, Māris, Sergejs) tika izveidots kā drukāts psihofizikāls PIC tests, ar kura palīdzību iespējams noteikt sarkani-zaļā krāsu redzes defekta klātbūtni, klasificēt tā veidu un raksturot smaguma pakāpi. Atšķirībā no citiem drukātiem un klīnikā izmantotiem krāsu redzes testiem, ar KAMS testa palīdzību papildus ir iespējams novērtēt krāsu redzes zudumu, raksturojot dalībnieka individuālo krāsu izšķirtspējas sliekšni ar fizikā plaši pazīstamu lielumu – pilno krāsu atšķirību CIE LAB krāsu telpā ΔE_{ab}^* (ΔE). KAMS testa rezultāts ir skaitliska vērtība – sliekšnis, kas dod testam papildus priekšrocību – pielietojamību zinātnē.

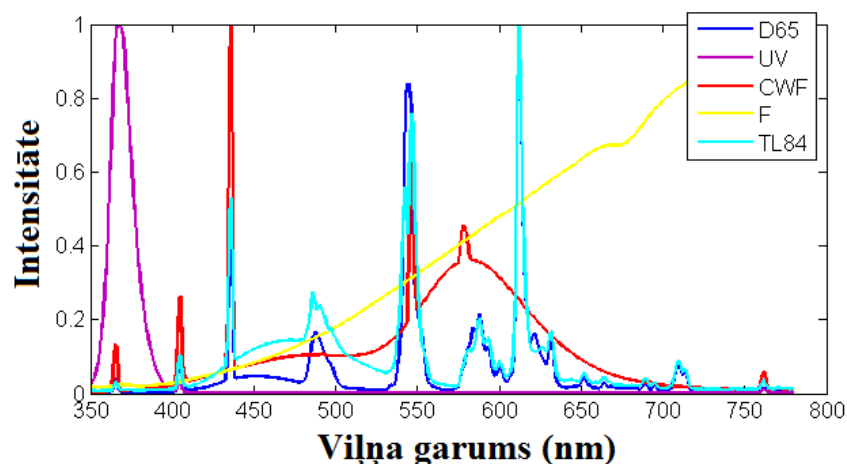
KAMS testa plates tika izstrādātas izmantojot Birch (1993) aprakstītos principus, izmantojot neitrālās krāsas (tās krāsas, ko indivīds ar sarkani-zaļo deficītu jauca ar ahromātiskajām (pelēkajām) krāsām). Citiem vārdiem sakot, krāsas, kas tika izmantotas KAMS testa izstrādē, atrodas tuvu pie vai uz protanopa un deiteranopa konfūzijas līnijām, kas krustojas ahromātiskajā apgabalā CIE xy krāsu diagrammā.

4.1.1. Hromatisko vērtību izraudzīšanās un krāsu pāru ieguve testa izveidei

KAMS krāsu redzes tests atšķiras no citiem testiem ar vēl kādu īpašību – hromatiskās vērtības testa fonam un stimuliem ir iegūtas krāsu piekārtošanas eksperimentos, kuros piedalījās indivīdi ar dažāda veida un smaguma pakāpes KRD. Pretstatam citu krāsu redzes testu stimulu un fonu hromatiskās vērtības ir iegūtas ņemot vērā attiecīgā KRD veida relatīvās luminances uztveres izmaiņas.

Sākotnēji tika izraudzīti un izdrukāti vairāk kā 300 krāsaini un 106 ahromātiski paraugi ar hromatiskajām vērtībām netālu no, kā arī uz deitāna un protāna konfūzijas līnijām abpus ahromātiskajam punktam CIE xy diagrammā. Pelēkie paraugi bija atšķirīga gaišuma pakāpe. Krāsainie paraugi atšķīrās gan ar gaišuma pakāpi, gan ar piesātinājuma pakāpi. Katra parauga izmērs bija 3 x 3 cm.

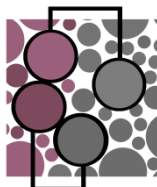
Piekārtošanas eksperimentos piedalījās pieci dalībnieki ar KRD (trīs dalībnieki ar deitāna un divi ar protāna traucējumu). Piekārtošanas eksperimenti tika veikti kontrolēta apgaismojuma apstākļos – telpā vienīgais apgaismojuma avots bija gaismas kaste (Qualitest CT-100W1, D65 simulētās dienasgaismas apgaismojums ar krāsu temperatūru $T = 6500$ K). Gaismas avota D65 spektrs dots 4.2. attēlā līdzās citiem gaismas kastē pieejamajiem gaismas avotiem.



4.2. attēls. Qualitest CT-100W1 gaismas kastē pieejamie gaismas avoti.

Dalībniekiem tika doti divi uzdevumi. Pirmais uzdevums bija gaismas kastē vienkopus sabērtos paraugus sakārtot divās kaudzēs – vienā jāsaliek visi paraugi, ko dalībnieks redzēja kā krāsainus (tādējādi atlasot testa izveidei nederīgos paraugus), otrā kaudzē bija jāsaliek visi paraugi, ko dalībnieks redzēja kā pelēkus (pirms eksperimenta dalībnieki ar eksperimenta vadītāju vienojās par vārda „pelēks” nozīmi). Otrs uzdevums tika pildīts tikai ar tiem paraugiem, kurus dalībnieks redzēja kā pelēkus – tie bija jāsakārto kaudzītēs tā, lai vienā kaudzītē visi „pelēkie” paraugi izskatītos vienādi pēc gaišuma pakāpes. Līdzīgi tika organizēta papildus paraugu izdrukā un saskaņošanas eksperimenti, līdz tika iegūts pietiekams krāsaino paraugu skaits, lai varētu izveidot testa plates ar pieaugošu ΔE katram defekta veidam, abos virzienos no ahromatiskā punkta (gan zaļgani, gan sārti paraugi abiem defekta veidiem). Turpmāk ar vārdiem „**krāsu pāris**” domātas divu paraugu hromatiskās vērtības – krāsaina un pelēka, kurus cilvēks ar attiecīgo KRD neizšķir (skat. 4.3. attēlu). Paraugu un testa plašu izdrukā metode, tās priekšrocības un trūkumi aprakstīti tālāk tekstā.

Krāsu pāris Nr 1

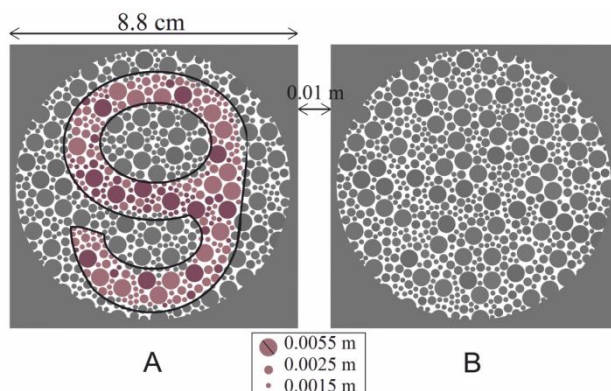


Krāsu pāris Nr 2

4.3. attēls. Attēloti abi krāsu pāri (gan tumšākais (Nr 1), gan gaišākais (Nr 2)) vienas pseidoizohromatiskās plates izveidei.

4.1.2. Šablona un testa plates izveide

KAMS testa pirmā versija, kas tika izmantota plašu pārbaudei skolēnu populācijā, kā arī pirmajai sliekšņu aprēķināšanas pētījuma daļai, sastāvēja no 24 pseidoizohromatiskajām platēm (10 no tām bija paredzētas protāna defekta atklāšanai (5 sārtās, 5 zaļganās) un 14 no tām bija paredzētas deitāna defekta atklāšanai (9 sārtās un 5 zaļganās). To izveide tika balstīta uz psihofizikāla stimula izveides principiem. Katra plate saturēja divas apļu kopas - apļus (A) un (B) (skatīt 4.4. attēlu), taču tikai viena no apļu kopām saturēja hromatisku simbolu. Iespējamie simboli bija kāds no četriem cipariem ar noapaļotām formām (6, 8, 9 vai 0), kas nodrošināja 12,5 % simbola uzminēšanas iespēju (divas novietojuma iespējas un četras cipara veida iespējas). 4.4. attēlā parādīts piemērs, kā izskatījās plate, kas šajā gadījumā ir paredzēta deitāna defekta noteikšanai (atbilstošā krāsu atšķirība ΔE stimulam un fonam bija 27 vienības). Dalībniekam bija jāveic divi uzdevumi: pamanīšanas uzdevums (jānosaka, kurš aplis - (A) vai (B) - satur simbolu) un atpazīšanas uzdevums (kurš no četriem iespējamajiem simboliem ir attēlots). Katra plate bija uzdrukāta uz atsevišķas A5 izmēra lapas, tās tika pāršķirtas ik pēc trīs sekundēm.



4.4. attēls. Katra apļu grupa (apļi (A) un (B)) sastāvēja no mazākiem aplīšiem trīs dažādos izmēros. Stimulu un fonu veidojošo aplīšu izmēra un gaišuma pakāpes proporcija bija konstanta visu simbolu gadījumos. Šajā gadījumā aplī (A) atrodas simbols „9” (iezīmēts ar melnu kontūru melnbaltajām izdrukām), aplī (B) simbola nav. Plate ir paredzēta deitāna defekta noteikšanai (atbilstošā krāsu atšķirība ΔE stimulam un fonam bija 27 vienības).

Pieaugošā testa plašu grūtības pakāpe tika panākta, samazinot krāsu atšķirību starp testa stimulu un fonu. Šāda pieeja pseidoizohromatisko testu izveidē ir aprakstīta arī iepriekš (Wenzel, Samu, 2012). Simbola izveidē tika izmantoti divi iepriekš aprakstītie krāsu pāri (viens no tiem gaišāks par otru). Abu gaišuma pakāpju krāsu pāri tika izraudzīti tā, lai to ΔE būtu pēc iespējas vienādi. 57% no aplīšiem, kas veidoja hromatisko simbolu, bija gaišāki,

attiecīgi 43% bija tumšāki, un tie (sava krāsu pāra ietvaros) savstarpēji atšķīrās ne vairāk kā par dažām ΔE vienībām. ΔE aprēķini tika veikti, izmantojot Konica Minolta CS-100A kolorimetru (tika piefiksētas krāsu koordinātes x , y un Y CIE xy krāsu diagrammā). Paraugi tika apgaismoti ar simulētu dienasgaismas apgaismojumu D65 gaismas kastē Qualitest CT-100W1. Krāsu atšķirības tika rēķinātas, izmantojot Berns (2006) ieteikto formulu 4.1., ņemot vērā atšķirības paraugu gaišumā (ΔL^*), piesātinājumā (ΔC_{ab}^*), tonī (*hue*) (ΔH_{ab}^*):

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta C_{ab}^*)^2 + (\Delta H_{ab}^*)^2} \quad (4.1.)$$

4.2. KAMS testa izdrukas metode un krāsu noturība laikā

4.2.1. Paraugu un testa plašu izdrukas metode

Lai varētu īstenot autores izvirzīto mērķi – izveidot PIC testu, kas indivīda krāsu izšķirtspēju raksturo ar precīzu sliekšņa vērtību, arī paša testa atbilstošajiem stimuliem bija jābūt attēlotiem maksimāli precīzi – jāizvēlas izdrukas metode, kas vēlamo krāsu attēlotu ar mazu hromatisko vērtību izkliedi. Komerciāli pieejamie krāsu redzes testi tiek radīti ar ofseta (tipogrāfijas) druku. Šī metode mūsu gadījumā nebija pielietojama, jo, pirmkārt, viena un tā paša krāsu redzes testa dažādu izdevumu krāsu hromatiskās vērtības platēs var būtiski atšķirties, pat izraisīt neprecizitātes, nolasot rezultātus klīnikā. Otrkārt, hromatisko vērtību izkliede, izmantojot šo metodi, būtu pārāk liela, lai varētu droši apgalvot, ka atbilstošā ΔE vienas plates ietvaros neatšķiras vairāk kā par vienu-divām vienībām (Lee, Honson, 2003; Dain, 2004^a; Fomins, Ozolinsh, 2011). Meklējot piemērotākās izdrukas metodes, tika analizētas un savstarpēji salīdzinātas divas izdrukas metodes – tintes izdrukas (*inkjet*) metode un fotogrāfiskā druka (*photographic printing*).

Tintes drukā attēls tiek radīts, uz papīra klājot tintes pilienus, lai iegūtu vēlamo krāsu. Paraugu drukai tika izmantots kalibrēts *EpsonStylus Pro 7800* printeris, kas izmanto deviņas *UltraCrome K3 Epson Ink* kasetnes (4 veidu melns, gaiši zilzaļš (*cyan*), gaišs fuksīns (*magenta*), zilzaļš, fuksīns un dzeltens) uz *Premium Semimatte 260* fotopapīra (izšķirtspēja 2880 dpi).

Fotogrāfiskajā drukā attēls tiek iegūts, izmantojot ķīmiski jutīgu papīru. Sīkie attēlus veidojošie punkti, ko veido ķīmiska reakcija papīrā, ir saskatāmi, 100 kārtīgi palielinot gatavo izdrukā. Paraugi tika drukāti, izmantojot kalibrētu *Noritsu HD 3701* digitālo printeri (izšķirtspēja 640 dpi). Drukai tika izmantots sudraba halogenīdu (AgX) krāsu negatīvs (papīrs *Kodak Professional ENDURA, F-glossy*).

4.2.2. Izdruku multispektrālo attēlu analīze

Aprakstītā metode tika izmantota gan pētījuma piekārtošanas eksperimenta stadijā, gan vēlāk vāļišu signālu modelēšanas un gatava KAMS testa krāsu noturības analīzē.

Multispektrālo attēlu ieguve tika veikta, izmantojot CRI Nuance Vis 07 multispektrālo kameru ar Nikon AF-S Micro-Nikkor 60-mm $f/2.8D$ objektīva lēcu. Paraugi tika ievietoti Qualitest CT-100W1 gaismas kastē, kura bija vienīgais gaismas avots telpā, kurā tika uzņemti attēli. Paraugi tika piestiprināti sienai vienmēr vienādā augstumā no kastes pamatnes, 50 ± 5 cm attālumā no kameras, un tie tika apgaismoti no augšas ar standarta D65 gaismas avotu ($T = 6500$ K). Tika iegūti 1290×920 pikseļu lieli telpiskie attēli redzamās gaismas diapazonā no 420 – 720 nm ar 10 nm lielu soli. Attēli tika pārveidoti vāļišu ierosmes attēlos, izmantojot vāļišu jutības funkcijas (skat. 3.5. un 3.6. nodaļas). Tālāk iegūtajā kombinētajā un pārveidotajā attēlā tika izraudzīti vismaz 89 pikseļu lieli vienas krāsas laukumi un analizētas katra pikseļa hromatiskās vērtības (krāsu koordinātes x, y un Y CIE xy krāsu diagrammā).

Savstarpēji salīdzinot drukas metodes, tika analizēti šādi parametri:

1) Paraugu hromatisko vērtību novietojums attiecībā pret konfūzijas līnijām (šīs sadaļas rezultāti un tālākie pētījumi sīkāk aprakstīti sadaļā 4.3.)

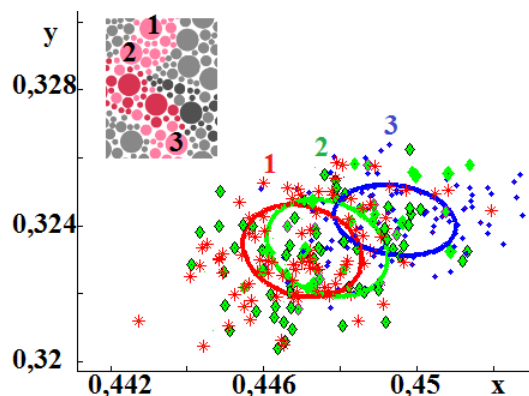
2) Krāsu koordināšu dispersija CIE xy krāsu diagrammā

Savstarpēji tika salīdzinātas dispersiju vidējās vērtības abām izdrukas metodēm (izmantojām statistikas rīku *independent sample t-test* ar ticamības intervālu 95%). Dispersiju aprakstam tika rēķinātas datu Gausa sadalījuma standarta deviācijas (SD).

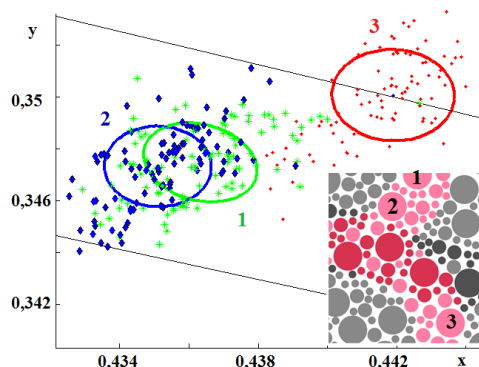
3) Pikseļu datu kopu savstarpējā pārklāšanās

Lai novērtētu drukas vienmērīgumu katras plates ietvaros, salīdzinājām trīs dažādus apgabalus, kam vajadzēja būt krāsas ziņā identiskiem. Tintes drukas gadījumā divas pikseļu kopas no trim izvēlētajiem laukumiem savstarpēji pārklājās x koordinātes virzienā (neviens kopa nepārklājās fotogrāfiskās drukas gadījumā). Analizējot pārklāšanos y koordinātes virzienā, visas trīs izvēlēto laukumu koordinātes savstarpēji pārklājās tintes drukas gadījumā (divas fotogrāfiskajai drukai). 4.5. un 4.6. attēlā ir parādītas trīs pikseļu kopu hromatiskās vērtības (ar elipsēm attēlotas pikseļu kopu vidējās vērtības (elipses centrs) un to SD gan x gan y virzienos (elipsu pusplatumi)) katras izdrukas gadījumā.

Savstarpēji tika salīdzinātas standarta deviācijas (SD) 32 datu kopām (8 krāsainie apgabali, 2 drukas veidi, 2 krāsu koordinātes (x, y)). Statistiski vidējā fotogrāfiskās drukas krāsu dispersija ($x=0,0017$; $y=0,0018$) bija nozīmīgi lielāka kā tintes drukas gadījumā ($x=0,0016$; $y=0,0014$) gan x ass, gan y ass virzienā.



4.5. attēls. Krāsu raksturojošo pikseļu hromatiskās vērtības paraugam tintes drukā.



4.6. attēls. Krāsu raksturojošo pikseļu hromatiskās vērtības paraugam fotogrāfiskajā drukā.

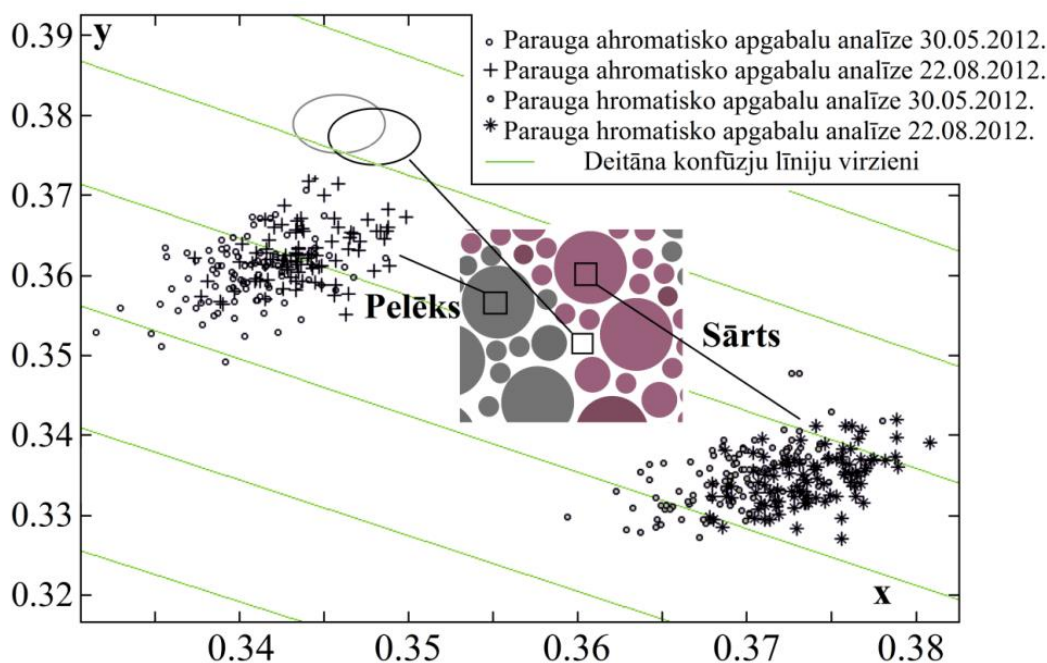
4.2.3. KAMS testa druka un balēšanas novērtējums

Turpmāk abu testa versiju izstrāde notika izmantojot tintes (*inkjet*) druku. Tā kā krāsu redzes testa rezultāts tiek rēķināts, atkarībā no atbildēm, kas dotas, pieņemot, ka katra testa plate ir ar noteiktu stimula-fona krāsu attiecību, tad nevēlamas ir jebkādas krāsu izmaiņas, testu lietojot. Novērtējot testa izdruku balēšanu trīs mēnešu laikā no izdrukāšanas brīža (kamēr tika iegūti dati ar katru no testa versijām), noskaidrojām, ka to krāsas (un atbilstošie ΔE starp stimulu un fonu) būtiski nemainījās. Tā kā testu nebija plānots izmantot komerciāliem nolūkiem, tad tā balēšana un krāsu izmaiņas ilgākā laika posmā netika uzskatītas par nozīmīgu trūkumu.

4.2.4. Pikseļu datu kopu attēlojošo elipšu centru savstarpējā nobīde balēšanas rezultātā

Izmantojot tintes druku, nevis tipogrāfiskās metodes, PIC plašu radīšanai, bija jāņem vērā sekojošas īpatnības. Metodes priekšrocība ir mazākas hromatisko vērtību izkliedes (attiecīgo ΔE iespējams novērtēt precīzāk) (Luse, *et al.*, 2012), galvenais metodes trūkums ir ātrāka krāsu balēšana laikā (Lee, Honson, 2003; Lee, 2006). Pirms testa izmantošanas rezultātu ievākšanai, autore veica vairākkārtēju plašu balēšanas monitorēšanu. Sākotnēji tika novērots, ka septiņu mēnešu laikā no plašu izdrukas, krāsu izmaiņas bija nozīmīgas (Luse, *et*

al., 2013). Turpmākajā pētījuma gaitā pigmentu balēšana tika novērota katru mēnesi, izmantojot attēla multispektrālo analīzi un kolorimetra ierakstus, kuru darbības principi aprakstīti iepriekš tekstā. 4.7. attēlā redzamas 4.4. attēlā analizētās plates hromatisko vērtību izmaiņas laikā.



4.7. attēls. Pseidoizohromatiskās plates krāsu raksturojošo pikseļu izmaiņas trīs mēnešu laikā (attēlotas CIE xy diagrammā). Attēlā analizēts viens krāsu pāris un papīra apgabals bez tintes. Balēšana trīs mēnešu laikā neradīja statistiski nozīmīgas izmaiņas pikseļu sadalījumu novietojumā (statistiski gan hromatiskie, gan ahromatiskie pikseļu datu masīvi pirms un pēc 3 mēnešu lietošanas pārklājās, kā arī izmēros nozīmīgi neatšķīrās). Ar elipsēm attēlota baltā papīra „dzeltēšana” (ar melnu krāsu sākumā, ar pelēku – pēc trīs mēnešiem). Neapdrukātu papīru raksturojošie pikseļi bija koncentrētāk izvietoti, tāpēc elipses (kā arī punkti, kas apzīmē pikseļus, kas nav attēloti zīmējumā) bija mazākas kā ar tinti apdrukātajām papīra daļām.

4.2.5. Secinājumi

1) Tintes drukas gadījumā vidējie elipšu izmēri, kas ataino pikseļu krāsu vērtību dispersiju katram analizētajam izdrukas apgabalam, ir mazāki nekā fotogrāfiskās drukas gadījumā. Citiem vārdiem sakot, krāsu iespējams atveidot precīzi, izmantojot abas aplūkotās metodes, taču precīzāka ir tieši tintes druka.

2) Tintes drukas gadījumā pikseļu kopas katras plates ietvaros, kas reprezentē vienādas krāsas apgabalus uz izdrukas dažādās vietās, atrodas viena otrai tuvāk kā fotogrāfiskās drukas gadījumā. Citiem vārdiem sakot, krāsas, kam vajadzētu būt vienādām, uz plates ir vienādākas tintes drukas gadījumā.

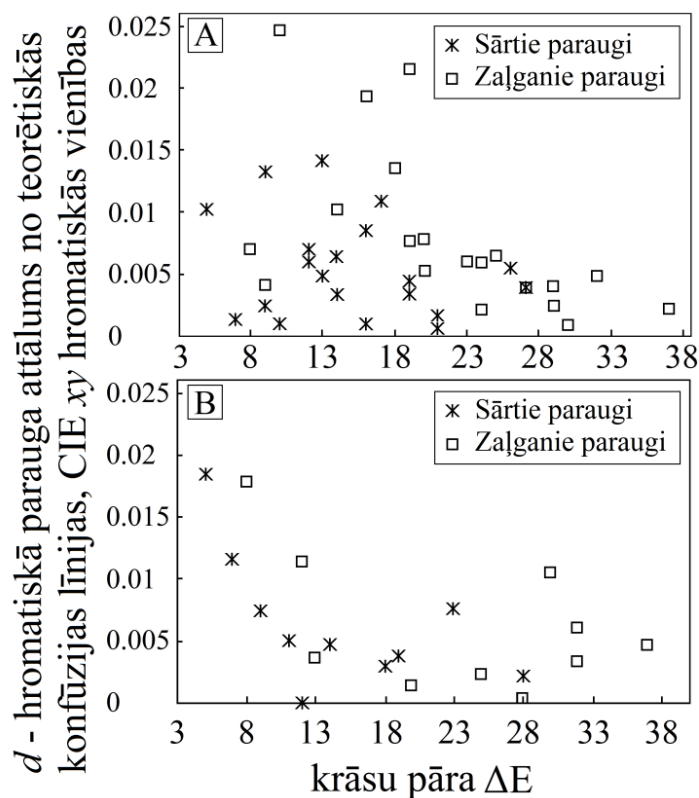
4.3. Paraugu krāsu un konfūziju līniju savstarpējā attiecība

Atgriezoties pie saskaņošanas eksperimentiem, tika iegūti 60 derīgi krāsu pāri PIC plašu izveidei. Ar krāsu pāri ir domāts sārtais vai zaļganais paraugs plates stimulam un tam atbilstošs pelēks paraugs fonam. Katrā platē katram krāsu pārim krāsainie punkti bija izvēlēti ar tādām hromatiskajām vērtībām, kuru koordinātes CIE xy diagrammā atrastos uz vai netālu no attiecīgās konfūzijas līnijas, kas iet caur pelēko (neitrālo) punktu. Katra krāsu pāra konfūzijas līnija tika definēta kā taisne, kas iet cauri diviem punktiem – konfokālo punktu un katra pāra atbilstošo ahromatiskā parauga pikseļu izkliedes sadalījuma centru.

Par konfūzijas līniju konfokālajiem punktiem tika pieņemtas CIE xy krāsu koordinātes (0,75; 0,25) protāna defektam un (1,40; -0,40) deitāna defektam (Birch, 1993). Visi aprēķinātie hromatisko paraugu attālumi (d) no to izkliedes centra līdz attiecīgajai līnijai tika analizēti ar nolūku, lai noskaidrotu atbildi uz šādu jautājumu: *Cik tālu no attiecīgās teorētiskās konfūzijas līnijas drīkst atrasties krāsainais stimul (to raksturojošās elipses centrs), lai joprojām būtu neizšķirams no tam atbilstošā pelēkā pāra novērotājam ar sarkani-zaļo krāsu redzes defektu?* Šo aprēķinu veikšanai tika izmantoti ģeometriskie vienādojumi. Ja līniju definē ar diviem punktiem (x_1, y_1) (deitāna vai protāna konfūziju līniju konfokālais punkts) un (x_2, y_2) (katra ahromatiskā parauga pikseļu krāsu koordināšu sadalījuma centrs), tad, lai aprēķinātu interesējošā punkta (x_0, y_0) (attiecīgā hromatiskā parauga krāsu koordināšu sadalījuma centrs) attālumu d līdz definētajai līnijai, lieto formulu 4.2.:

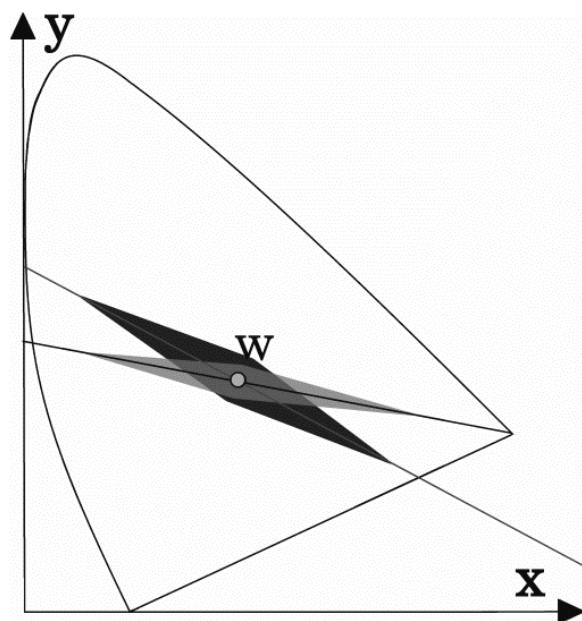
$$d = \frac{|(x_2 - x_1)(y_1 - y_0) - (x_1 - x_0)(y_2 - y_1)|}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}} \quad (4.2.)$$

Gan deitāniem, gan protāniem derīgo paraugu aprēķinātie (d) kā funkcija no krāsu pāra ΔE ir parādīti attiecīgi 4.8. A un B attēlos. Tika novērota sakarība – dalībniekiem ar KRD ir pieņemamas lielākas nobīdes no konfūzijas līnijas, ja attiecīgie paraugi ir mazāk piesātināti. Palielinoties krāsu atšķirībai ΔE , pieņemamā nobīde (d) samazinās. Šādas sakarības tika novērotas gan sārtajiem, gan zaļganajiem paraugiem. Kā jau tika sagaidīts, zaļganajiem paraugiem tiek novērotas lielākas nobīdes CIE xy diagrammā, tas var tikt izskaidrots ar MakAdamsa (*MacAdam*) elipšu palielināšanos zaļajā diagrammas daļā, salīdzinot ar to izmēriem sarkanajā diagrammas daļā (skat. 2.5.7. nodaļu).



4.8. attēls. A - grafikā uz x ass attēlots katra deitāna defektam derīgā krāsu pāra ΔE . Uz y ass attēlotas (d) vērtības (katra krāsainā stimula pikseļu sadalījuma centra attālums līdz konfūzijas līnijai, ko veido deitāna konfokālais punkts un atbilstošā ahromatiskā stimula pikseļu izkliedes centrs). B - grafikā attēloti attālumi (d) protāna paraugu gadījumā un atbilstošo līniju definē no protāna konfokālā punkta.

Tiek ierosināts šāds skaidrojums – indivīdiem ar sarkani-zaļo krāsu redzes defektu neizšķiramās stimulu hromatisko vērtību nobīdes (d) no attiecīgās konfūzijas līnijas veido sekojošu modeli, kas attēlots 4.9. attēlā. Ir uzsākts pētījums, lai tālāk pārbaudītu šo hipotēzi. Iespējams, ka saskaņošanas eksperimenti paraugiem ar lielāku piesātinājuma pakāpi izrādījās nesekmīgi (pat protanopijas un deiteranopijas gadījumos), jo krāsu koordināšu izkliede, kas bija raksturīga drukātajiem paraugiem, bija lielāka nekā pieņemamās nobīdes piesātinātajā krāsu diagrammas daļā. Citiem vārdiem sakot, kaut arī krāsu saskaņošanas eksperimentos dalībniekiem tika piedāvāts arī liels skaits paraugu ar daudz lielāku piesātinājuma pakāpi, kuri atradās uz konfūzijas līnijām, dalībnieki tos atsijāja kā krāsainus, kaut arī teorētiski tam nav tūlītēja izskaidrojuma. Šajā sadaļā aprakstītie rezultāti un izvirzītā hipotēze izmantota darba ceturtās tēzes formulēšanā.



4.9. attēls. Iespējamais rezultātu skaidrojums datiem 4.8. attēlā. Deitānam pieņemamā novirze no deitāna konfūzijas līnijas (attēlota tumši pelēkā krāsā) samazinās, stimula intensitātei pieaugot. Attiecīgi protānam pieņemamā novirze no protāna konfūzijas līnijas ir attēlota gaiši pelēkā krāsā. Šo abu laukumu pārklāšanās apgabalā (vidēji pelēkā krāsā) var izvēlēties stimulus skrīninga plašu izveidei. Zīmējumā nav ievērots mērogs.

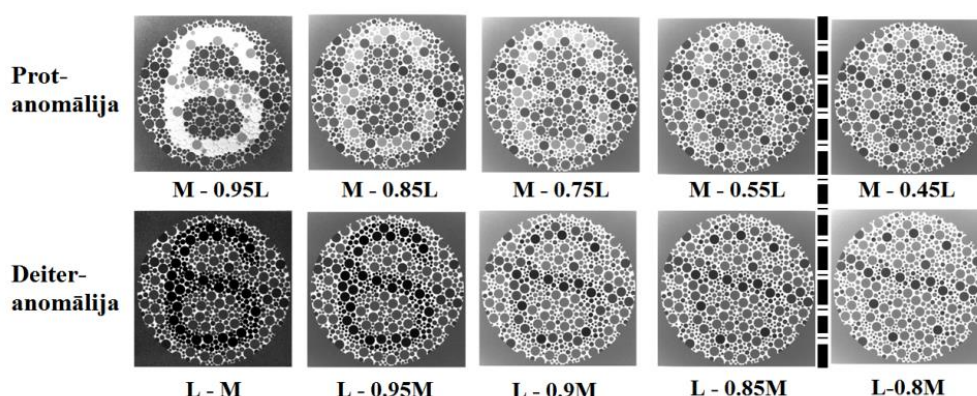
4.3.1. Izohromatisko apgabalu mērījumi traucētas krāsu redzes gadījumos

Ir uzsākts paplašināts pētījums un izveidota metode vispārīgāka priekšstata gūšanai par redzes pieredzi izmainītas krāsu redzes gadījumā. Ir izveidots rīks individuālo izohromatisko apgabalu atrašanai CIE xy krāsu diagrammā. Tika izveidots CAD (*Color Assessment and Diagnosis*) testa atvasinājums krāsu uztveres izmaiņu kvantitatīvai raksturošanai – krāsainie stimuli tiek izraudzīti uz savstarpēji paralēlām līnijām uz ekrāna pieejamajā gamutā CIE xy krāsu diagrammā (izohromatiskie apgabali tiek noteikti savstarpēji salīdzinot izšķirtspēju punktiem uz līnijas (tās ietvaros) un savstarpēji punktiem uz dažādām līnijām). Rezultātā, izmantojot testa psihofizikālo dizainu, spējām noteikt dalībnieku individuālās konfūzijas asis. Rezultāti, ko ieguvām diviem dalībniekiem ar deitāna defektu, parādīja, ka izstrādātā metode ir derīga individuālo izohromatisko apgabalu atrašanai. Tika iegūtas ciešas korelācijas ar teorētiskajām deitānu konfūzijas līnijām, taču metodes novitāte ir tās dotā iespēja iegūt izohromatisko apgabalu dimensijas pretējā virzienā – virs un zem atbilstošās konfūzijas līnijas. Nākotnē tiek plānots iegūt precīzākus un vispārīgākus rezultātus, uzlabojot testa dizainu un palielinot pētījuma grupu.

4.4. KAMS testa veikspējas novērtējums

4.4.1. Vāļišu signālu modelēšana dažādiem traucējuma gadījumiem

Attēlu multispektrālie uzņēmumi nodrošina iespēju pārbaudīt izstrādātā testa veikspēju, izmantojot vāļišu atbildes matemātisko modelēšanu. Lai veiktu M-tipa un L-tipa vāļišu atbilžu simulāciju protāna un deitāna defekta gadījumiem, stimulu spektrālie attēli tika pārveidoti par vāļišu atbildēm, izmantojot vāļišu jutības funkcijas. 4.10. attēlā parādīts modelēšanas rezultāts sarkani-zaļā oponentā kanāla atbildei platei, kas paredzēta deitāna defekta atklāšanai (stimula-fona ΔE ir 27 vienības). Ar raustīto līniju apzīmēta piedāvātā izšķirtspējas robeža.



4.10. attēls. Sarkani-zaļā oponentā kanāla atbildes modelēšana platei, kas paredzēta deitāna defekta atklāšanai (stimula-fona $\Delta E = 27$ vienības). Simulācija parāda, ka pie relatīvi mazāka M-tipa vāļītes funkcijas samazinājuma kanāla atbilde vairs nesatur informāciju par stimulu.

4.4.2. KAMS testa pārbaude skolēnu populācijā un dalībniekiem ar iepriekš konstatētu sarkani-zaļo krāsu redzes defektu

4.4.2.1. Dalībnieki

Lai novērtētu KAMS testa veikspēju, tas tika lietots skolēnu krāsu redzes pārbaudei divās Latvijas skolās. Kopumā krāsu redze tika pārbaudīta 273 skolas vecuma bērniem (136 meitenēm un 137 puisiem) Vaiņodes un Priekules novados (Vaiņodes vidusskolā un Gramzdas pamatskolā). Testa pārbaudei izvēlējamies skolas Latvijas lauku reģionos vairāku iemeslu dēļ: pirmkārt, lauku skolās parasti nav specifisku uzņemšanas kritēriju, piemēram, intelekta koeficienta (IQ), dzimuma vai plānotās profesijas izvēles ziņā, kas varētu ietekmēt izvēlēto populāciju un padarīt to nereprezentatīvu; otrkārt, skolas vecuma bērni veido atlasses grupu, kas ir relatīvi viendabīga vecuma grupa. Pētījumā piedalījās 84,5% no visiem abu skolu audzēkņiem, bērni bija vecumā no 7 līdz 19 gadiem (vidējais vecums 12,1 gads, SD 3,3 gadi). Pētījums notika no 2012. gada septembra vidus līdz oktobra vidum. Papildus

populācijas pētījumam tika izmeklēti 57 brīvprātīgie dalībnieki ar iepriekš diagnosticētu sarkani-zaļo krāsu redzes defektu (dalībnieki bija vecumā no 7 līdz 67 gadiem). Dati tika ievākti no 2012. gada septembra vidus līdz decembra vidum. Pētījums notika saskaņā ar principiem, kas ietverti Helsinku deklarācijā (*The Declaration of Helsinki Code of Ethics of the World Medical Association*). Neviena dalībnieks nebija informēts par pētījuma mērķiem un nebija ar specifiskām priekšzināšanām psihofizikā vai krāsu zinātnē.

4.4.2.2. Testa norise

Telpa tika apgaismota ar Narva LT-T8 18-W Colourlux plus CW (vēsi baltām (*cool white*)) spuldzēm. Krāsu attēlošanas indekss spuldzēm > 80, korelētā krāsu temperatūra T = 4000 K, uz galda, kur tika rādītas testa plates, apgaismojums bija vidēji 400 lx. Iepriekš ir ziņots, ka luminiscenti gaismas avoti ir piemēroti krāsu redzes pārbaudēm (Dain, *et al.*, 1993).

Bērnu redzes asums tika pārbaudīts ar LogMAR tabulu, izmantojot Landolta gredzenu optotipus. Ja tuvuma redzes asums bija pietiekams (labāks nekā 0,2 LogMAR vienības), tad bērns tika pārbaudīts ar Richmond HRR testa platēm (Richmond Products, Albuquerque, NM, 4. izdevums, 2002. gads), turpmāk tekstā tiks saīsināti saukts par HRR testu un KAMS platēm. HRR tests (4. izdevums, 2002. gads) ir ieteicams izmantošanai klīnikā, pateicoties tā augstajai veiktspējai un diagnostiskajai precizitātei (Cole, *et al.*, 2006; Cole, 2007; Dain, 2006). HRR izveidē ir izmantoti līdzīgi principi, pēc kādiem izvēlējāmies fona un stimulu krāsas KAMS testam. Tika sagaidīts, ka KAMS un HRR diagnostiskās, kā arī defekta pakāpes un veida klasificēšanas iespējas būs savstarpēji salīdzināmas un korelē.

Ja dalībnieks pieļāva kaut vienu kļūdu HRR vai KAMS platēs, tad tam bija jāveic krāsu redzes pārbaude ar anomaloskopu (Oculus HMC (R) anomaloscope (type 47720)), kas ir etalona tests krāsu redzes izmeklēšanā, un Farnsworth D15 saturated un desaturated (Cole, Orenstein, 2003) (turpmāk tekstā saukts par D15) krāsu sakārtošanas testi. Tika pieņemts, ka skolēnam ir krāsu redzes defekts tikai tad, ja tas apstiprinājās testēšanas procedūrā ar anomaloskopu.

HRR un KAMS tika rādīti arī brīvprātīgajiem dalībniekiem otrajā pētījuma daļā. Ja bija pieejams arī anomaloskopu vai D15, arī tie tika pielietoti. Visi brīvprātīgie veica vismaz trīs no minētajiem testiem. Kopā tika ievākti dati no 65 dalībniekiem ar krāsu redzes defektu (8 bērniem no pētījuma skolās un 57 brīvprātīgajiem); 21 dalībnieks tika klasificēts kā protāns un 43 tika klasificēti kā deitāni. Atlases grupa ar cilvēkiem ar sarkani-zaļo krāsu redzes defektu bija pietiekama, lai pārbaudītu hipotēzi, salīdzinot ar citiem pētījumiem šajā jomā (Huna-Baron, *et al.*, 2013; Lillo, *et al.*, 2014). Diemžēl viena dalībnieka sniegtās atbildes bija neskaidras un grūti interpretējamas, tāpēc viņa rezultāti tika izslēgti no tālākas datu apstrādes.

4.4.2.3. Rezultāti: KAMS testa specifiskums un jutība

KAMS testa veiktspēja sarkani-zaļo krāsu redzes defektu diagnostikā tika analizēta, balstoties uz datiem, kas tika iegūti skolēnu populācijas pētījumā. Ar izraudzīto kritēriju (> 1 kļūda), testa jutība bija 100% un specifiskums 99,62%. Jutība tiek definēta kā dalībnieku daudzums procentos, kam ir meklētā īpašība, un tests to uzrāda. Savukārt, specifiskums tika definēts kā dalībnieku daudzums bez meklētās īpašības, kuriem tests to neuzrāda (Norton, *et al.*, 2002).

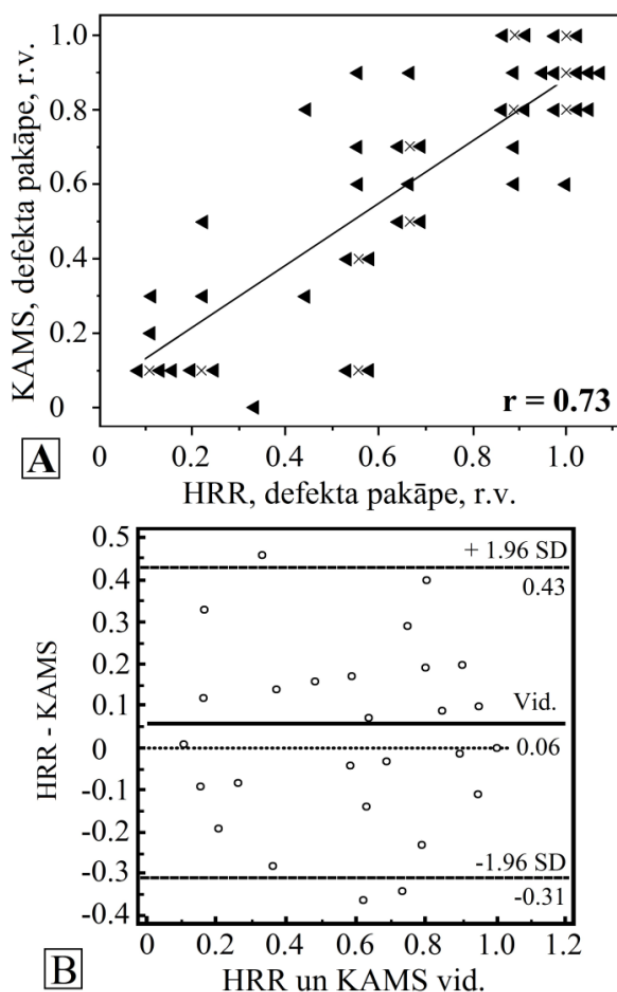
4.4.2.4. KAMS testa spēja klasificēt sarkani-zaļā defekta tipu un smaguma pakāpi

Lai gan pseidoizohromatisko plašu atbildes vien praksē neizmanto defekta veida klasificēšanai, šāda analīze (salīdzinot ar anomaloskopu un HRR testu) tika veikta, lai noteiktu atsevišķu plašu grupu piemērotību krāsu izšķirtspējas sliekšņa novērtēšanai indivīdiem ar konkrētu defekta veidu. Vispirms katrs dalībnieks tika klasificēts kā protanomāls/protanops, vai deiteranomāls/deiteranops, izmantojot iepriekš aprakstīto testu kopu.

No visiem 64 dalībniekiem ar KR D, ar HRR nepareizi tika noteikts defekta veids vienam deitānam un diviem protāniem, septiņiem dalībniekiem HRR testa rezultāti nebija specifiski defekta veida klasifikācijai (tas ir, katram defekta veidam atbilstošajā kolonā bija vienāds kļūdu skaits). Savukārt, KAMS testa rezultāti nepareizi diagnosticēja piecus deitānus un vienu protānu, divos gadījumos rezultāts nebija specifisks defekta veida klasifikācijai. Tika salīdzināta abu testu spēja klasificēt defekta pakāpi. Tika iegūta vidēja testu rezultātu saskaņa (korelācija) protānu gadījumā ($r = 0,74$ un $p < 0,01$). Rezultāti deitānu gadījumiem ir sīkāk analizēti 4.11. attēlā.

4.4.3. Ar KAMS testa pirmo versiju iegūtais krāsu izšķirtspējas sliekšnis

Pēc diagnozes uzstādīšanas katra dalībnieka KAMS testa rezultāti tika analizēti, lai noteiktu testa potenciālu krāsu izšķirtspējas sliekšņa iegūšanai ΔE vienībās ar sārtajām un zaļganajām platēm atsevišķi. Ja, piemēram, dalībnieka atbildes par platēm ar fona un stimula ΔE sekojošām vienībām 9, 10, 12, 17, 19, 21 un 27 bija, attiecīgi, nepareizi, nepareizi, nepareizi, nepareizi, pareizi, pareizi un pareizi, tad tika piefiksēts, ka dalībnieka krāsu izšķirtspējas sliekšnis ir starp 17 un 19 vienībām (ar viduspunktu 18 vienības un nenoteiktības apgabalu ± 1 vienība). Ja visas plates tika nosauktas nepareizi, tad tika pieņemts, ka krāsu izšķirtspējas sliekšnis ir starp 27 un 60 vienībām. Bija nepieciešamas vismaz divas sekojošas pareizas atbildes, lai pieņemtu, ka dalībnieka krāsu izšķirtspējas sliekšnis ir starp 0 un 27 vienībām.



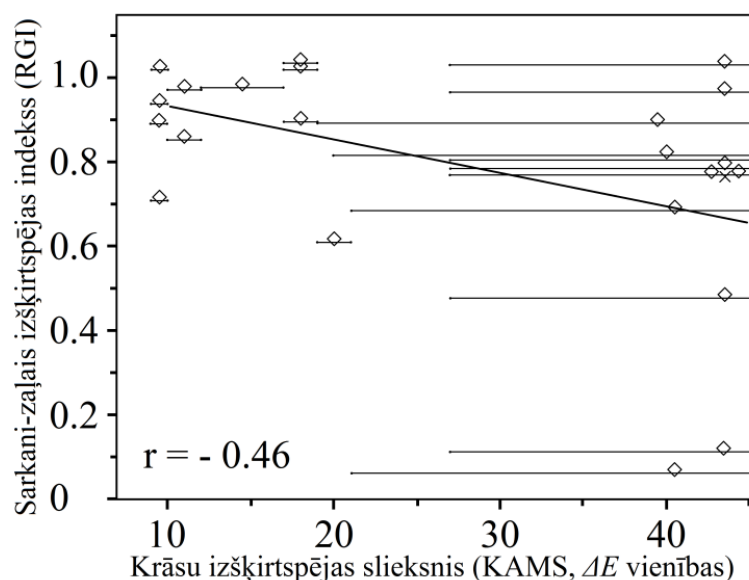
4.11. attēls. HRR un KAMS testa rezultātu salīdzinājums pēc to spējas klasificēt krāsu redzes defektu pēc tā smaguma pakāpes ($n = 43$) deitāniem. Skrīninga plašu rezultāti no šīs analīzes ir izslēgti, vērā ir ņemtas tikai specifiskās plātes katram defekta veidam. A - parādīts katra dalībnieka pieļautās kļūdas platēs konkrētajam defekta veidam katrā no testiem. Rezultāts 1,0 nozīmē, ka dalībnieks kļūdījies visās specifiskajās plātēs, attiecīgi rezultāts 0,5 atbilst kļūdām 50% plašu, pārējās 50% atbildētas pareizi. Tika iegūta vidēja korelācija ($r = 0,73$ un $p < 0,001$). Lineāra tendences līnija attēlota ar melnu. Datu punkti, kas savstarpēji pārklājās, nobīdīti no to atrašanās vietas, to patiesais novietojums attēlots ar krustiem. B - parādīts abu testu Bland-Altman analīze (veikta ar *MedCalc* programmatūru). Netika novērota pastāvīga KAMS testa rezultātu nosliece (*bias*) attiecībā pret HRR rezultātiem, kā arī abu testu rezultātu vidējās vērtības nebija statistiski nozīmīgi atšķirīgas ($p = 0,05$).

4.4.4. Krāsu izšķirtspējas sliekšnis zemas pakāpes KRĀD gadījumā un tā korelācija ar RGI

Kā iepriekš minēts, Barbur *et al.* (2008) ierosināja ērtu mērvienību sarkani-zaļā spektra izšķirtspējas klasificēšanai no anomaloskopa mērījuma rezultātiem – sarkani-zaļo izšķirtspējas indeksu (RGI). Kā iepriekš tika sagaidīts, analizējot RGI un KAMS krāsu izšķirtspējas sliekšņu viduspunktus, tika iegūta vidēja negatīva korelācija deitānu dalībnieku

datiem ($n = 22$, $r = -0,46$ un $p = 0,042$ sliekšņiem iegūtiem ar sārtajiem platēm, un $r = -0,44$ un $p = 0,042$ sliekšņiem iegūtiem ar zaļganajām platēm). Korelācija parādīta 4.12. attēlā deitānu dalībniekiem sliekšņiem, kas iegūti ar sārtajiem platēm. Identiski rezultāti (tikai pozitīvas korelācijas) tika iegūtas anomaloskopa saskaņošanas apgabaliem un krāsu izšķirtspējas sliekšņiem. Tā kā nebija pieejami protānu dati lielākā apmērā ($n = 13$), grūti spriest par tendencēm L-tipa vālišu defekta gadījumā – ar zaļganajām platēm iegūtie ΔE sliekšņi nekorelē ar RGI ($r = -0,09$ un $p = 0,775$), savukārt, ar sārtajiem platēm iegūtie ΔE sliekšņu viduspunkti viduvēji korelē ar RGI ($r = -0,33$ un $p = 0,263$).

4.12. attēlā ir parādīti individuālie krāsu izšķirtspējas sliekšņu viduspunkti; grafikā ir izšķirami divi datu sadalījumi, kurus šķir no punktiem brīvs apgabals grafika vidusdaļā. Realitātē ar izveidotajām platēm bija iespējams iegūt krāsu izšķirtspējas sliekšņu apgabalu ar robežām no abām pusēm tikai tiem dalībniekiem, kuru atbilstošie dati atrodas grafika kreisajā pusē. Dalībniekiem, kuru datu punkti atrodas grafika labajā pusē ar dotajām platēm, bija iespējams būt drošiem tikai par sliekšņa apgabala zemākās robežas vērtību. Lai tiktu galā ar radušos situāciju, ΔE ar vērtību 60 vienības tika pieņemta kā lielākā iespējamā sliekšņa robežas vērtība katram dalībniekam, kuru rezultātiem atbilst datu punkti grafika labajā pusē. Krāsu izšķirtspējas sliekšņu viduspunkts tika aprēķināts, paturot prātā, ka pastāv liela sliekšņa pozīcijas nenoteiktība. Tātad dalībniekiem, kam sliekšnis ir zems, tik tiešām ir augstāks sarkani-zaļais izšķirtspējas indekss; tomēr, dalībniekiem ar augstākiem krāsu izšķirtspējas sliekšņiem nekā mēs varējām noteikt ar KAMS testu, var būt dažādi RGI. Autore var tikai ierosināt, ka, balstoties uz datu sadalījumu grafika kreisajā pusē, arī pārējie dati varētu būt izvietoti ar negatīvu gradientu (skat. ierosināto tendences līkni 4.12. attēlā), ja izdotos uzlabot testa metodi. Neskatoties uz iepriekš analizēto neveiksmi lielo sliekšņu vērtību gadījumā, ir izdevies parādīt, ka zemākiem krāsu izšķirtspējas sliekšņiem atbilst šaurāki saskaņošanas apgabali anomaloskopa testēšanas procedūrā deiteranomāliem dalībniekiem.



4.12. attēls. Individuālie krāsu izšķirtspējas sliekšņu viduspunkti, kas iegūti ar KAMS testu kā funkcija no RGI (dalībnieki deitāni, $n = 22$; no tiem 3 tika diagnosticēti kā deiteranopi un 19 kā deiteranomāli). Punkti, kas savstarpēji pārklājās, ir nobīdīti no to patiesās atrašanās vietas pārskatāmības nolūkos. Patiesās to atrašanās vietas apzīmētas ar krustu. Attēlota arī lineāra regresijas līkne un horizontālās līnijas apzīmē sliekšņu nenoteiktības apgabalus.

Tā kā ir zināms, ka krāsu redze gadu gaitā izmainās (Roy, *et al.*, 1991; Paramei, Oakley, 2014), un pētījumā iesaistījās brīvprātīgie dalībnieki dažādās vecuma kategorijās, tika vērtēts, vai iegūtos rezultātus var izskaidrot ar vecuma radītajām izmaiņām krāsu redzē. Tika iegūtas vājas korelācijas dalībnieku vecumam un KAMS testa krāsu izšķirtspējas sliekšnim ($r = 0,19$), kā arī dalībnieku vecumam un anomaloskopa saskaņošanas apgabalam ($r = 0,18$), kas izslēdz tiešu vecuma ietekmi uz iegūtajiem rezultātiem (dati apskatāmi 5. pielikumā attēlos P5.1. un P5.2.).

Rezultāti parāda iegūto krāsu izšķirtspējas sliekšņu korelāciju ar RGI deiteranomāliem novērotājiem. Šādu rezultātu tika paredzēts, arī Cole *et al.* (2007) aprakstīja HRR defekta pakāpes iedalījuma un Nagel saskaņošanas apgabala korelāciju ($r = 0,58$). Tomēr, citā pētījumā Barbur *et al.* (2008), izmantojot CAD testu, neieguva testa sarkani-zaļo sliekšņu korelāciju ar Nagel saskaņošanas apgabalu, kaut arī CAD testā arī tiek izmantotas neitrālās krāsas fona-stimula izdalīšanai. Šos rezultātus varētu izskaidrot ar atšķirībām, kā tiek uztverts un apstrādāts krāsains ātri mainīgs un kustīgs stimul, salīdzinot ar statistisku attēlu. Tomēr šajā jomā joprojām ir daudz neatbildēto jautājumu, piemēram, kāpēc Birch (2008) pētījumā netika iegūta Farnsworth D15 rezultātu korelācija ar anomaloskopa datiem. Pēc autores domām ir jābūt uzmanīgiem, vērtējot un savstarpēji interpretējot dažādu testu rezultātus, kā arī jāpiebilst, ka cita pieeja rezultātu analīzē gan mūsu, gan minētajos pētījumos, iespējams būtu

radījusi citus secinājumus. Lai pilnā apmērā izdarītu secinājumus par šajā pētījumā iegūto rezultātu nozīmīgumu, būtu nepieciešama lielāka un vecuma sadalījumu ziņā vienmērīgāka KRD dalībnieku atlases grupa.

4.4.5. Secinājumi

1. KAMS tests ir izmantojams sarkani-zaļo defektu skrīningā, tā jutība un specifiskums ir salīdzināmi ar HRR testu (2002, 4. izdevums).

2. Ar psihofizikālu pseidoizohromatisku testu ir iespējams noteikt sarkani-zaļā krāsu redzes defekta klātbūtni un iegūt individuālu izšķirtspējas sliekšni anomālo trihromātu gadījumā.

3. Anomaloskopa saskaņošanas apgabals Nagel vienībās deitānu novērotājiem vidēji cieši pozitīvi korelē (vidēji cieši negatīvi korelē RGI gadījumā) ar iegūtajiem krāsu izšķirtspējas sliekšņu viduspunktiem, izmantojot psihofizikālo testēšanas procedūru.

Pirmais un otrais secinājums izmantots darba pirmās tēzes formulēšanā. Trešais secinājums daļēji izmantots darba trešās tēzes formulēšanā.

4.5. Krāsu izšķirtspējas sliekšņa mērījuma atkārtojamība

Tālākajā pētījumā tika uzlabota testa uzbūve (iespēju robežās standartizējot ΔE pieaugumu, ieviešot smalkāku gradāciju un pietuvinot testa uzbūvi psihofizikālam testam), lai iegūtu uzticamākus rezultātus (samazinātu sliekšņa nenoteiktības apgabalu, skat. 4.12. attēlu). Autore apzinās, ka iepriekš aprakstītie rezultāti var tikt kritizēti no termina „krāsu izšķirtspējas sliekšnis” izmantošanas viedokļa. Tālāk aprakstītajā pētījumā tika izmantota jauna plašu kopa, kuras uzbūve tika pielāgota psihofizikāla testa uzbūvei.

Tālākais mērķis bija noskaidrot, vai dalībniekiem ar zemas pakāpes iedzimtu sarkani-zaļo KRD individuālie krāsu izšķirtspējas sliekšņi ΔE vienībās ir fiksēti vai laikā mainīgi, novērtēt to mainīguma pakāpi, kā arī analizēt krāsu izšķirtspējas sliekšņa atšķirības, izmantojot sārtajās un zaļganās plates.

4.5.1. Dalībnieki

Pētījumā tika izraudzīti dalībnieki tikai ar zemas pakāpes sarkani-zaļo KRD. Tiem nebija padziļinātu zināšanu psihofizikā vai krāsu redzes testu uzbūves principos. Pētījumā piedalījās 4 vīrieši vecumā no 20 – 24 gadiem ar iepriekš konstatētu iedzimtu sarkani-zaļo KRD. Izmantojot Oculus HMC anomaloskopu un HRR testu, visi no tiem tika klasificēti kā deiteranomāli. Detalizēti dalībnieku KRD analizēts 4.1. tabulā.

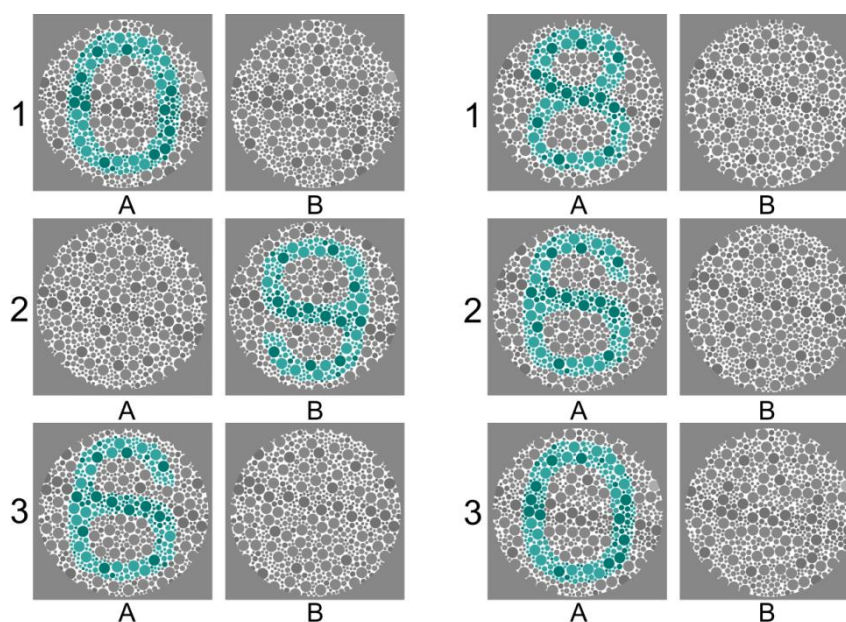
4.1. tabula

Pētījuma dalībnieki un to rezultāti krāsu redzes testos (*Oculus HMC* anomaloskops un *Richmond HRR*). VU – vārds, uzvārds; MRM – saskaņošanas apgabala viduspunkts; AQ – anomālijas koeficients.

NPK	VU	(MRM)	(AQ)	Kļ. sk. HRR	Rezultāts (HRR)	Rezultāts (<i>Oculus HMC</i>)
1.	KS	32,0	20,7	4	Zemas pakāpes s-z trauc.	Deiter-anomālija
2.	EV	26,0	6,2	3		
3.	RV	24,0	19,8	3		
4.	FR	20,7	6,4	2		

4.5.2. KAMS2 testa uzbūve

Tests saturēja 26 plates, 21 no tām bija specifiskas (tikai protāna vai deitāna KRD gadījumam), pārējās 5 plates bija paredzētas abu defektu veidiem. Kopumā plates saglabāja līdzšinējo KAMS uzbūvi – katrs apļu pāris ((A) un (B)) saturēja tikai vienu stimulu. Testa stimuli varēja būt kāds no cipariem “0”, “6”, “8” vai “9”. Galvenā atšķirība no iepriekšējā dizaina bija pāru skaits vienā platē, kas saturēja stimulus ar vajadzīgo krāsu atšķirību – katrā platē bija attēloti 6 pāri ar apļiem (A) un (B) (skat. 4.13. attēlu). Krāsainā simbola veids un novietojums šajās platēs bija nejauši izvēlēts.



4.13. attēls. Parādīts vienas KAMS2 testa plates piemērs. Atbilstošais $\Delta E = 24$, plate paredzēta protāna defekta noteikšanai. Visi seši pāri ar attiecīgo ΔE vērtību aizņēma vienu A4 izmēra lapu.

4.5.3. Eksperimenta gaita

Testa dalībnieks, kam tika nodrošināts labākais koriģētais redzes asums, sēdēja pie labi apgaismota (400 lx) galda virsmas (tika izmantota galda lampa ar kvēlspuldzi, krāsu temperatūra $T = 2789$ K). Visās piecās mērījuma reizēs tika izmantots maksimāli līdzīgs galda apgaismojums. Dalībnieks turēja testa plates aptuveni 50 cm attālumā no acīm. Dati tika ievākti no 2013. gada decembra sākuma līdz 2014. gada janvāra beigām. KAMS2 tests tika izdrukāts nedēļu pirms eksperimenta datu ievākšanas, lai panāktu iespējami labāko krāsu atbilstību.

Testa plates tika šķirtas ar 3 x 6 sekunžu intervāliem (atbildei par katru no sešiem stimulu pāriem tika dotas 3 sekundes). Dalībniekiem netika atļauts testa plates ņemt rokās, apskatīt tās no dažādiem skatupunktiem vai citādi iejaukties testa norisē.

Jautājums, uz kuru bija jāatbild dalībniekam bija: „*Kurš aplis satur ciparu: (A) vai (B)*”? Dalībnieks jebkurā gadījumā, neatkarīgi no tā, vai redzēja stimulu, vai nē, deva piespiedu atbildi. Testu katrs dalībnieks veica piecas reizes dažādās dienās. Darbā tika izmantota konstanto stimulu metode. Katrā no pieciem mērījumiem plates tika rādītas citā secībā, lai samazinātu atcerēšanās risku. Iespēja uzminēt stimula atrašanos bija 50% (piespiedu izvēles metode ar divām alternatīvām), attiecīgi izšķirtspējas sliekšnis tiek aprēķināts pie 75% pareizo atbilžu atzīmes. Krāsu izšķirtspējas sliekšņi tika rēķināti un analizēti atsevišķi sārtajām un zaļajām platēm, katrai no piecām mērījumu veikšanas reizēm. Lai aprēķinātu individuālos krāsu izšķirtspējas sliekšņus ΔE vienībās, tika izmantota Sigmoidālā psihometriskā funkcija *OriginPro 8.0* programmatūrā.

4.5.4. Krāsu izšķirtspējas sliekšņa rezultātu atkārtojamības analīze

Analizējot krāsu izšķirtspējas sliekšņu vērtības vairākās sekojošās testēšanas reizēs, netika iegūti pārlicinoši pierādījumi sliekšņu individuālo vērtību mainīgumam laikā (skat. 4.2. tabulu). Nevienam no četriem dalībniekiem netika novērota apmācības ietekme uz iegūtajiem rezultātiem (kā izņēmums varētu būt dalībnieks RV – viņa sliekšnis pirmajā mērījuma reizē bija būtiski augstāks nekā pārējās testa reizēs, ko drīzāk skaidrojam ar psihofizikālās procedūras apguvi, nevis izšķirtspējas uzlabošanos). Sliekšņa vērtību SD iespējams ir tendence samazināties, samazinoties izšķirtspējas sliekšnim. Zinot, ka mērījuma apstākļi būtiski nemainījās, skaidrojam sliekšņa vērtību izkliedi ar dalībnieku iekšējiem faktoriem un testa uzbūvi. Vairumā gadījumu krāsu izšķirtspējas sliekšnis svārstījās ne vairāk kā divu ΔE vienību diapazonā.

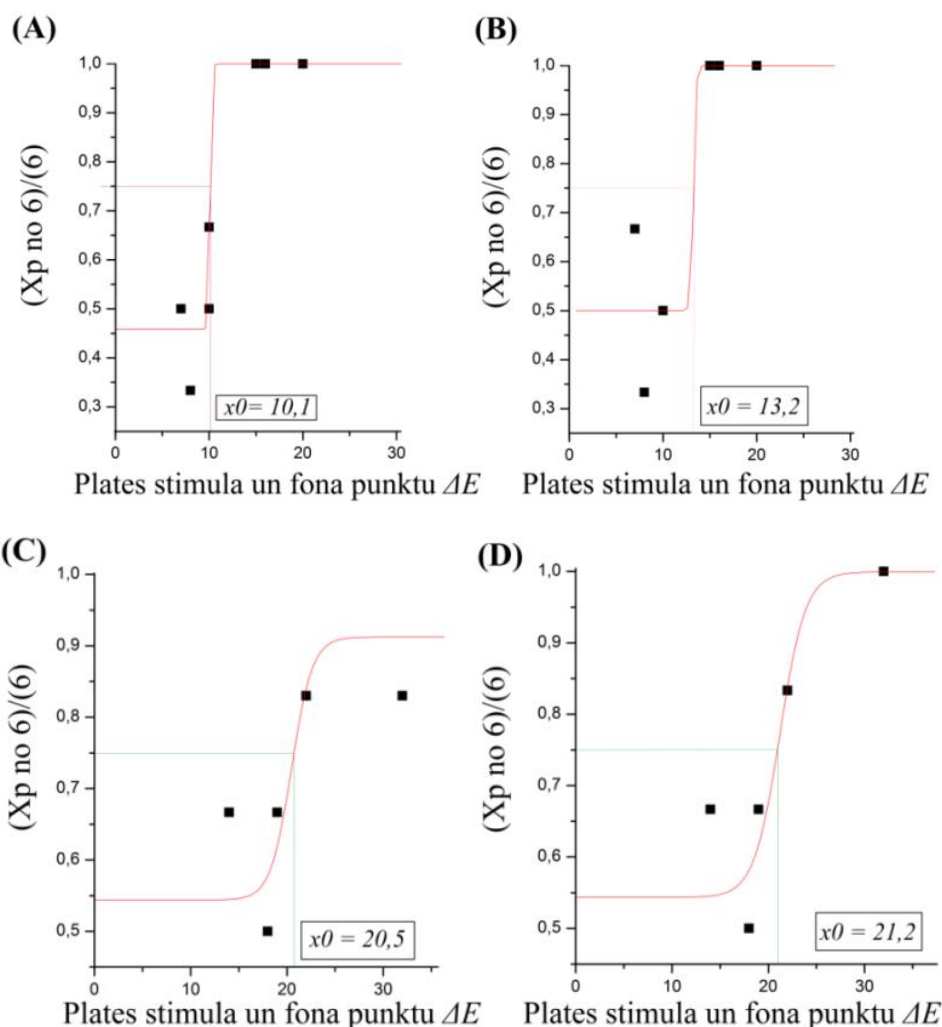
4.2. tabula

Pētījuma dalībnieku KAMS2 krāsu izšķirtspējas sliekšņi piecās mērījuma reizēs, to vidējā vērtība un SD. Dalībniekam KS parādīti sliekšņi, kas iegūti abpus neitrālajam punktam. S/Z – sliekšņi, kas iegūti ar attiecīgi sārtajām vai zaļganajām platēm.

Dal./ (S/Z)	Mērījuma veikšanas reize					Vid.	SD
	1	2	3	4	5		
FR (S)	7,0	7,5	7,6	8,1	7,8	7,6	0,4
EV (S)	9,0	9,5	7,3	9,0	7,2	8,4	1,1
RV (S)	14,2	9,8	9,1	8,0	9,5	10,1	2,4
KS (S)	10,1	10,2	12,0	13,9	13,2	11,9	1,7
KS (Z)	20,5	18,2	17,9	18,5	21,2	19,2	1,5

4.5.5. KAMS2 krāsu izšķirtspējas sliekšņa izmaiņas, to nosakot atsevišķi ar sārtajām un zaļganajām platēm

Atsevišķi vērtējām krāsu izšķirtspējas sliekšņus abpus neitrālajam punktam (ar sārtajām platēm un zaļganajām platēm). Visos gadījumos tika novērots, ka sliekšņu vērtības, kas iegūtas ar zaļganajām platēm ir lielākas nekā tās, kas iegūtas ar sārtajām platēm (augstāka sliekšņa vērtība atbilst zemākai jutībai). Var tikt secināts, ka dalībnieku jutība zaļo plašu gadījumā bija zemāka, kā jau tas bija sagaidāms (Shevel, 2003). Tātad iegūtie rezultāti ļauj uzskatīt, ka mērījumi ir veikti korekti – dalībniekam ar izmanītu M-tipa vāļišu jutību ir samazināta jutība spektra zaļajā daļā, salīdzinot ar sarkano daļu. 4.14. attēlā sīkāk analizēts deiteranomālā dalībnieka KS krāsu izšķirtspējas sliekšnis, kas iegūts ar zaļganajām un sārtajām platēm pirmajā un pēdējā mērījumu reizē.



4.14. attēls. Dalībnieka KS krāsu izšķirtspējas sliekšņi (iegūti ar KAMS2). Grafikos A un B – sliekšnis noteikts ar sārtajām platēm attiecīgi pirmajā un piektajā mērījumu reizē. Grafikos C un D – sliekšnis noteikts ar zaļganajām platēm attiecīgi pirmajā un piektajā mērījumu reizē.

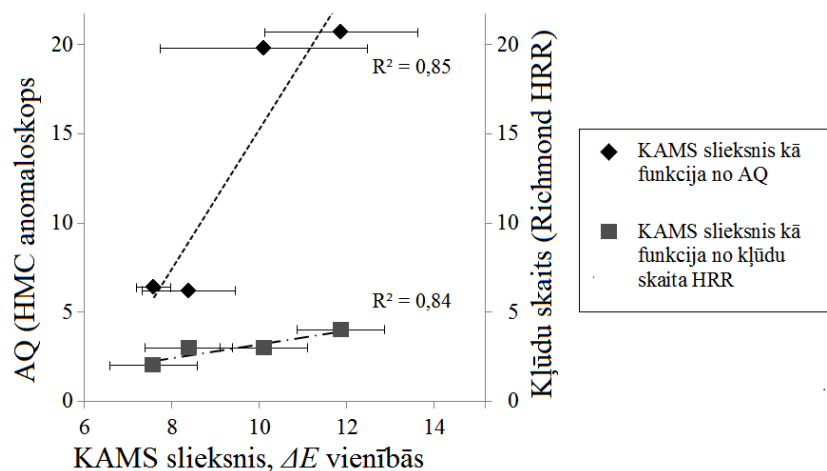
4.5.6. KAMS2 sliekšnis un citu klīnikā izmantojamo testu rezultāti

Šajā pētījuma stadijā tika novērtēta iegūto izšķirtspējas sliekšņu atkarība no AQ (anomālības koeficienta) – lieluma, ko izmanto anomaloskopa procedūras rezultātu diagnozes diferencēšanā. AQ aprēķins parādīts vienādojumā (4.3).

$$AQ = \frac{\frac{(E - P)}{P}}{\frac{(E - M)}{M}} \quad (4.3.)$$

Vienādojumā 4.3. E apzīmē MR skalas gala vērtību, P apzīmē dalībnieka piekārtoto MR beigu vērtību, savukārt M atbilst MR adaptētajai vērtībai cilvēkam ar neizmainīti krāsu redzi. AQ rezultāts no 0,7 līdz 1,4 raksturīgs dalībniekam ar normālu krāsu redzi, vērtības robežās no 1,4 līdz ∞ raksturīgas deiteranomālijai, savukārt vērtības no 0 līdz $< 0,7$ raksturīgas protanomālijai (Oculus HMC anomaloskopa instrukcija). 4.15. attēlā redzams, ka

augstāks krāsu izšķirtspējas sliekšnis bija novērojams lielāka AQ gadījumos, kā arī augstāks sliekšnis bija saistāms ar lielāku pieļauto kļūdu skaitu HRR testā.



4.15. attēls. KAMS2 sliekšņa un klīnikā izmantojamo testu rezultātu korelācija. Grafikā parādīta dalībnieku KAMS2 sliekšņu un AQ (iegūts no dalībnieku Oculus HMC anomaloskopa mērījuma) korelācija (◆; $r = 0,92$), kā arī KAMS2 sliekšņu un HRR testā pieļauto kļūdu skaita korelācija (■; $r = 0,92$). Attēlotas arī KAMS2 sliekšņa SD un korelāciju lineārās aproksimācijas.

Ciešā datu korelācija ļauj izvirzīt hipotēzi, ka AQ deiteranomāliem novērotājiem varētu būt paredzams kā 4.4 funkcija no KAMS2 sliekšņa (hipotēze būtu jāpārbauda ar lielāku atlasē grupu un uzlabotu testa versiju, drīzāk funkcija varētu līdzināties 2.22. attēlā redzamajai):

$$AQ = 3,9 \times KAMS - 23,8 \quad (4.4.)$$

Tātad, rezultāti saskan ar iepriekšējā pētījumā (aprakstīts 4.4. sadaļā.) iegūtajiem rezultātiem un ir iegūta pārlicība, ka iepriekš iegūtie rezultāti un sakarības nav bijuši nejauši.

4.5.7. Secinājumi

Katram dalībniekam ar zemas pakāpes krāsu redzes defektu tika atrasts individuālais krāsu izšķirtspējas sliekšnis ar uzlabotu KAMS testa versiju (KAMS2). Vairākās mērījumu reizēs dalībnieku krāsu izšķirtspējas sliekšnis nemainījās vairāk kā par divām ΔE vienībām. Netika iegūti pierādījumi paredzamai sliekšņa dinamikai laikā ar kādu noteiktu tendenci. Iegūtajiem krāsu izšķirtspējas sliekšņiem ir cieša korelācija ar rezultātiem, ko iegūst klīnikā izmantotajos testos - deiteranomālajiem novērotājiem tika iegūta cieša pozitīva korelācija ($r = 0,92$) starp anomaloskopa AQ un KAMS2 sliekšni, kā arī starp KAMS2 sliekšni un pieļauto kļūdu skaitu Richmond HRR testā ($r = 0,92$). Sadaļas secinājumi ir izmantoti darba otrās tēzes formulēšanā, kā arī daļēji izmantoti darba trešās tēzes formulēšanā.

5. NOBEIGUMS

Aprakstot iegūtos rezultātus, autore ir salīdzinājusi KAMS testu ar Richmond HRR testu, kas pēc daudzu pētnieku domām ir viens no labākajiem pseidoizohromatiskajiem testiem, kāds ir pieejams klīnikā (Cole, *et al.*, 2006; Dain, 2006; Cole, 2007). Iegūtā augstā testa jutība un specifiskums ļauj uzskatīt, ka, kaut gan KAMS primāri tika izveidots zinātniekiem nevis klīniskiem nolūkiem, tam ir potenciāls tikt izmantotam klīnikā kā vienam no papildu testiem. Autore neaicina aizvietot patlaban izmantotos testus ar KAMS. Iegūtā abu testu rezultātu samērojamība (defekta tipa un pakāpes iedalījuma ziņā) ļauj uzskatīt, ka testi ir savstarpēji līdzvērtīgi, toties mūsu testa platēm ir papildus potenciāls psihofizikālajos pētījumos.

Pētījuma galvenais jauninājums ir pseidoizohromatisko plašu rezultātu attēlošana ar psihofizikālu sliekšni, ko apraksta ar skaitlisku vērtību. Pilnā krāsu atšķirība ir plaši izmantots lielums zinātnē. Krāsu izšķirtspējas rezultāti, kas tiek attēloti pilnās krāsu atšķirības vienībās, varētu būt izmantojami un vieglāk interpretējami specifisku darba piedāvājumu gadījumos vai produktu ražošanā (rezultāti ataino krāsu jutības zudumu, salīdzinot ar krāsu izšķirtspēju normālas krāsu redzes gadījumā neitrālajām krāsām).

Izmantojot ierobežotu plašu skaitu (piecas zaļganajā un deviņas sārtajā virzienā CIE xy koordinātēs), bija iespējams noteikt individuālos krāsu izšķirtspējas sliekšņus ΔE vienībās deitāniem.

Souza un kolēģu 2014. gadā publicētajā pētījumā analizētas dalībnieku ar KRD krāsu izšķirtspējas sliekšņi, kas iegūti ar Kembridžas krāsu testu (*Cambridge Colour Test*), mainot PIC plašu veidojošo krāsu pāru (un attiecīgo luminances līmeņu) skaitu. Rezultāti uzrādīja lielākus neizšķiršanas apgabalus, ja plates bija veidotas no maza skaita krāsu pāru. Faktori, kurus ieviešot testā, varētu uzlabot nomērītā krāsu izšķirtspējas sliekšņa precizitāti ir:

- 1) lielāks plati veidojošo luminances līmeņu skaits;
- 2) mazāks ΔE solis un lielāks testu veidojošo plašu skaits (ar jau esošajiem stimuliem un papildus izveidotiem).

Tā kā aprakstītās problemātikas risināšanai būtu nepieciešams daudz lielāks sākotnējo paraugu skaits un drukātas plates ir pakļautas balēšanai, tiek ierosināts, ka turpmākos pētījumos būtu lietderīgi veikt datorizētā vidē.

ATSAUCES

Algvere PV, Marshall J, Seregard S. 2006 Age-related maculopathy and the impact of blue light hazard. *Acta Ophthalmologica Scandinavica*, 84(1): 4–15.

Backhaus WGK, Kliegl R, Werner JS, 1998 *Color vision: Perspectives from different disciplines*, Berlin: de Gruyter & Co. 343 p.

Bailey JE, Neitz M, Tait DM, Neitz J. 2004 Evaluation of an updated HRR color vision test. *Visual Neuroscience*, 21: 431–436.

Baraas RC, Foster DH, Amano L, Nascimento SMC. 2010 Color constancy of red-green dichromats and anomalous trichromats. *Investestigative Ophthalmology & Visual Science*, 51(4): 2286–2293. doi: 10.1167/iovs.09-4576.

Barbur JL, Rodrigues-Carmona M, Harlow JA, Mancuso K, Neitz J and Neitz M. 2008 A study of unusual Rayleigh matches in deutan deficiency. *Visual Neuroscience*, 25: 507-516. doi: 10.1017/S0952523808080619.

Berns RS, 2006 *Billmeyer and Saltzman's Principles of color technology - 3rd ed.* Canada: John Wiley & Sons. 247 p.

Birch J, 1993 *Diagnosis of Defective Colour Vision*. London: Butterworth Heinemann, 184 p.

Birch J. 2008 Failure of concordance of the Farnsworth D15 test and the Nagel anomaloscope matching range in anomalous trichromatism. *Visual Neuroscience*, 25: 451–453. doi: 10.1017/S0952523808080231.

Birch J, Rodríguez-Carmona M. 2014 Occupational color vision standarts: new prospects. *Journal of the Optical Society of America A*, 31(4): A55-A59.

Brown WRJ. 1957 Color discrimination of twelve observers. *Journal of the Optical Society of America A*, 47: 137-143.

Cole BL. 2007 Assessment of inherited colour vision defects in clinical practice. *Clinical and Experimental Optometry*, 90(3): 157–175. doi: 10.1111/j.1444-0938.2007.00135.x.

Cole BL, Lian KY, Lakkis C. 2006 The new Richmond HRR pseudoisochromatic test for colour vision is better than the Ishihara test. *Clinical and Experimental Optometry*, 89(2): 73-80. doi: 10.1111/j.1444-0938.2006.00015.x.

Cole BL, Orenstein JM. 2003 Does the Farnsworth D15 test predict the ability to name colours? *Clinical and Experimental Optometry*, 86(4): 221–229. doi: 10.1111/j.1444-0938.2003.tb03109.x.

Dain SJ. 2004^a Colorimetric analysis of four editions of the Hardy-Rand-Rittler pseudoisochromatic tests. *Visual Neuroscience*, 21: 437-443.

Dain SJ. 2006 Illuminant and observer metamersim and the Hardy-Rand-Rittler color vision test editions. *Visual Neuroscience*, 23: 685–694.

Dain SJ, Honson VJ, Curtis CT. 1993 Suitability of fluorescent tube light sources for the Ishihara test as determined by colorimetric methods. *Colour Vision Deficiencies*, 11: 327–333.

Dain SJ. 2004^b Clinical colour vision tests. *Clinical and Experimental Optometry*, 87(4-5): 276-293.

Díaz JÁ, Chiron A, Viénot F. 1998 Tracing a metameric match to individual variations of color vision. *Color Research and Application*, 23(6): 379-389.

Fomins S, Ozolinsh M. 2011 Multispectral Analysis of Color Vision Deficiency Tests. *Materials Science (Medžiagotyra)*, 17(1): 1392–1320. doi: 10.5755/j01.ms.17.1.259.

Gegenfurtner KR, Sharpe LT, 2000 *Color vision: From genes to perception*, Cambridge: Cambridge University Press. 492 p.

HMC Anomaloskop R Rayleigh (Typ 47720) Instruction Manual, Copyright by Oculus, p.31.

Huna-Baron R, Glovinsky Y, Habot-Wilner Z. 2013 Comparison between Hardy-Rand-Rittler 4th edition and Ishihara color plate tests for detection of dyschromatopsia in optic neuropathy. *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, 251(2): 585-589. doi: 10.1007/s00417-012-2073-x.

Jordan G, Mollon JD. 1993 A study of womes heterozygous for colour deficiencies. *Vision Research*, 33(11): 1495-1508.

Kim SR, Nakanishi K, Itagaki Y, Sparrow JR. 2006 Photooxidation of A2-PE, a photoreceptor outer segment fluorophore, and protection by lutein and zeaxanthin. *Experimetal Eye Research*, 82(5): 828–839.

Knoblauch K, Vital-Durand F, Barbur JL. 2001 Variation of chromatic sensitivity across the life span. *Vision Research*, 41: 23-36.

Chalupa LM, Werner JS, 2003 *The visual neurosciences. Vol. 1*. London: A Bradford Book MIT Press. 878 p.

Lee DY. 2006 Color changes in the red-green plates of the 50-year-old AO HRR color vision test. *Visual Neuroscience*, 23: 681–684.

Lee DY, Honson M. 2003 Chromatic Variation of Ishihara Diagnostic Plates. *Color research and Application*, 28(4): 267-276. doi: 10.1002/col.10161.

- Lillo J, Alvaro L, Moreira H. 2014 An experimental method for the assessment of color simulation tools. *Journal of Vision*, 14(8):15. doi: 10.1167/14.8.15.
- Luse K, Fomins S, Ozolinsh M. 2012 Pseudoisochromatic test plate colour representation dependence on printing technology. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 38 (012024). doi: 10.1088/1757-899X/38/1/012024.
- Luse K, Ozolinsh M, Fomins S, Gutmane A. 2013 Multispectral analysis and cone signal modeling of pseudoisochromatic test plates. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 49 (012041). doi: 10.1088/1757-899X/49/1/012041.
- MacAdam DL. 1942 Visual sensitivities to color differences in daylight. *Journal of the Optical Society of America*, 32: 247-74.
- Mokrzycki WS, Tatol M. 2011 Color difference ΔE : a survey. *Machine Graphics and Vision*, 20(4): 383-411.
- Nathans J. 1999 The Evolution and Physiology of Human Color Vision: Insights from Molecular Genetic Studies of Visual Pigments. *Neuron*, 24: 299-312.
- Neitz J, Neitz M. 2011 The genetics of normal and defective color vision. *Vision Research*, 51(7): 633–651. doi:10.1016/j.visres.2010.12.002.
- Neitz J, Neitz M, Kainz PM. 1996 Visual pigment gene structure and the severity of human color vision defects. *Science*, 274: 801-804.
- Neitz J, Neitz M, He JC, Shevell SK. 1999 Trichromatic color vision with only two spectrally distinct photopigments. *Nature Neuroscience*, 2(10): 884-888.
- Norton TT, Corliss DA, Bailey JE, 2002 *The Psychophysical Measurement of Visual Function*. MA: Butterworth–Heinemann. 361 p.
- Thomas PBM, Formankiewicz MA, Mollon JD. 2011 The effect of photopigment optical density on the color vision of the anomalous trichromat. *Vision Research*, 51(20): 2224–2233. doi:10.1016/j.visres.2011.08.016.
- Paramei G, Oakley B. 2014 Variation of color discrimination across the life span. *Journal of the Optical Society of America A*, 31(4): A375-A384.
- de Kinkelder R, van der Veen RLP, Verbaak FD, Faber DJ, van Leeuwen TG, Berendschot TTJM. 2011 Macular pigment optical density measurements: evaluation of a device using heterochromatic flicker photometry. *Eye*, 25(1): 105–112. doi: 10.1038/eye.2010.164.
- Rabin J, Gooch J, Ivan D. 2011 Rapid quantification of color vision: the cone contrast test. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 52(2): 816-820. doi: 10.1167/iops.10-6283.

Rodríguez-Carmona M, Harlow A, Walker G, Barbur JL. 2005 The variability of normal trihromatic vision and the establishment of the „normal” range. *Proceedings of the 10th Congress of International Color Association, Granada, Spain (AIC)*, pp. 979-982.

Roy MS, Podgor MJ, Collier B, Gunkel RD. 1991 Color vision and age in normal North American population. *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, 229(2): 139-144.

Shevel SK, 2003 *The Science of Color*. Oxford: Elsevier. 339 p.

Shevel SK, He JC, Kainz PM, Neitz J, Neitz M. 1998 Relating color discrimination to photopigment genes in deutan observers. *Vision Research*, 38: 3371-3376.

Shevell SK, He J.C. 1997 The Visual Photopigments of Simple Deuteranomalous Trichromats Inferred from Color Matching. *Vision Research*, 37(9): 1115-1127. doi:10.1016/S0042-6989(96)00270-2.

Shinomori K, Scheffrin BE, Werner JS. 2001 Age-Related Changes in Wavelength Discrimination. *Journal of the Optical Society of America A*, 18(2): 310–318.

Smith VC, Pokorny J, Yeh T. 1993 Pigment tests evaluated by a model of chromatic discrimination. *Journal of the Optical Society of America A*. 10(8): 1773–1784.

Smith VC, Pokorny J. 1975 Spectral Sensitivity of the Foveal Cone Photopigments between 400 and 500 nm. *Vision Research*, 15: 161 – 171.

Snell RS, Lemp MA, 1998 *Clinical Anatomy of the Eye*. Oxford: Blackwell Science. 423 p.

Snodderly DM, Brown PK, Delori FC, Auran JD. 1984 The macular pigment. 1. Absorbance spectra, localization, and discrimination from other yellow pigments in primate retinas. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 25(6): 660–673.

Snowden R, Thompson P, Troscianco T, 2012 *Basic Vision*. Oxford: Oxford University Press. 400 p.

Souza GS, Malone FL, Crawford TL, Miquilini L, Salomão RC, Guimarães DL, Ventura DF, Fitzgerald MEC, Silveira LCL. 2014 Low number of luminance levels in the luminance noise increases color discrimination thresholds estimated with pseudoisochromatic stimuli. *Frontiers in Psychology*, 5(1291). doi: 10.3389/fpsyg.2014.01291.

Stockman A, Sharpe LT. 2000 Spectral sensitivities of the middle- and long-wavelength sensitive cones derived from measurements in observers of known genotype. *Vision Research*, 40: 1711-1737.

Webster MA, MacLeod DIA. 1988 Factors underlying individual differences in the color matches of normal observers. *Journal of the Optical Society of America A*, 5(10): 1722-1735.

Wenzel K, Samu K. 2012 Pseudo-Isochromatic Plates to Measure Colour Discrimination. *Acta Polytechnica Hungarica*, 9(2): 1–11.

Werner JS, 1996 Visual problems of the retina during ageing: Compensation mechanisms and colour constancy across the life span. *Progress in Retinal and Eye Research*, 15(2): 621–645.

AUTORES PUBLIKĀCIJU SARAKSTS

Disertācijā izmantotās publikācijas:

- 1) **Jurasevska K.**, Ozolinsh M., Fomins S., Gutmane A., Zutere B., Pausus A., Karitans V., „Color discrimination threshold determination using pseudoisochromatic test plates”, *Front. Psychol.*, doi: 10.3389/fpsyg.2014.01376. (2014).
- 2) Zutere B., **Jurasevska K.**, Livzane A. „The stability of color discrimination threshold determined using pseudoisochromatic test plates”, *Proc. SPIE 9216, Optics and Photonics for Information Processing VIII*, 92161G; doi:10.1117/12.2061748. (2014).
- 3) **Luse K.**, Ozolinsh M., Fomins F., Gutmane A., „Multispectral analysis and cone signal modelling of pseudoisochromatic test plates”, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 49 012041 doi:10.1088/1757-899X/49/1/012041 (2013).
- 4) **Luse K.**, Fomins S., Ozolinsh M., „Pseudoisochromatic test plate colour representation dependence on printing technology”, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* Vol. 38, 012024. (2012).

Citas publikācijas:

- 1) **Luse K.**, Ozolins M., Karitans V., „Effect of retroreflector position on the detection and recognition of pedestrian under reduced visibility”, *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, N4, p.40–48. (2011).
- 2) **Luse K.**, Pausus A., Karitans V., Ozolins M., Tukisa M., “Evaluation of retro-reflective coating performance by reflectance and perceived relative brightness measurements”, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* Vol. 23., 012005. (2011).
- 3) Karitans V., Ozolinsh M., **Luse K.**, Ekimane L., „Presence of spherical aberration in the reference as a possible source of variations in magnitude of measured ocular aberrations”, *Optica Applicata*, Issue 3, vol. 42, DOI: 10.5277/oa120308, pp. 519 – 532. (2012).
- 4) Pausus A., Gzibovska S., Stolcere A., **Jurasevska K.**, Cikmacs P., Krumina G., "The effect of object size on blur perception", *Proceedings VII Europea/ I World Meeting in Visual and Physiological optics*. pp.238-240. ISBN 978-83-7493-847-1. (2014)
- 5) Karitans V., Ozolinsh M., Ekimane L., **Luse K.**, „Dependence of Vernier acuity on the extent of retinal blur”, *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, N4, pp. 49-57. (2011).

DALĪBA STATPTAUTISKAJĀS KONFERENCĒS (IZLASE)

1. **B.Zutere**, **K.Jurasevska**, A.Livzane, „The stability of color discrimination threshold determined using pseudoisochromatic test plates”, Abstr.Int.Conf. Optics and Photonics for Information Processing VIII, USA, San Diego (Paper 9216-49) (2014).
2. **A.Gutmane**, **K.Jurashevskā**, S.Fomins, „Perception and color analysis in time of printed color vision test”, Abstr.Int.Conf. DOC 2014, Riga, Latvia, p.41 (2014).
3. **K.Luse**, M.Ozolins, S.Fomins, A.Gutmane, „Evaluation of Pseudoisochromatic Plate Colour Fading”, Abstr.Int.Conf. Advanced Materials and Technologies 2013, Palanga, Lithuania, p.112. (2013).
4. **K.Luse**, M.Ozolins, S.Fomins, „Chromatic sensitivity variances along confusion lines for congenital red-green colour deficient individuals”, Abstr.Int.Conf. ICVS 2013, Winchester, UK, p.138, (2013).
5. **K.Luse**, M.Ozolins, S.Fomins and A.Gutmane, “Obtaining individual chromatic sensitivity thresholds in case of congenital red-green color deficiency”, Abstr.Int.Conf. AIC 2013, Gateshead, UK, p.239. (2013).
6. **K.Luse**, M.Ozolins, S.Fomins, A.Gutmane, B.Zutere „Individual chromatic sensitivity threshold determination in case of red-green color deficiency”, Abstr.Int.Conf. DOC 2013, Riga, Latvia, p.78-79. (2013).
7. **K.Luse**, M.Ozolins, S.Fomins „Reflectance and multispectral evaluation of color vision assessment plates”, Abstr.Int.Conf. FM&NT 2013, Tartu, Estonia, p.228. (2013).
8. **B.Zutere**, **K.Luse** „Usability of psychophysical experiment scheme in colour vision deficiency characterization”. Abstr.Int.Conf. Open Readings 2013, Vilnius, Lithuania, p.184. (2013).
9. **K.Luse**, J.Logina, „The impact of the background on the recognition of road signs”, Abstr.Int.Conf. ERNI-HSF Science Meeting Orienting of Attention, Neural Implementation, Underlying Mechanisms and Clinical Implications, Tuebingen, Germany, p.37. (2012).
10. **K.Luse**, S.Fomins, M.Ozolins, „Color representation dependence on printing technology”, Abstr.Int.Conf. Functional Materials and Nano Technologies, Riga, p.171. (2012).
11. **K.Luse**, S.Fomins, „Photographic and ink printing colorimetric difference and spectral specificities”, Abstr.Int.Conf. Developments in Optics and Communications, Riga, p. 60. - 61. (2012).

12. **K.Luse**, M.Ozolins, S.Fomins, „Colour discrimination threshold determination using pseudoisochromatic test plates obtained by photographic and inkjet printing”, Abstr.Int.Conf. European Conference on Visual Perception 2012, Great Britain, *Perception* Vol.41 supplement, p.85. (2012).

13. **K.Luse**, S.Fomins, M.Ozolinsh, „Printed test plates for color discrimination treshold determination”, Abstr.Int.Conf. 6th EOS Topical Meeting on Visual and Physiological Optics, Dublin, Ireland, p.87. (2012).

14. **K.Luse**, A.Pausus, M.Ozoliņš, V.Karitans, „Evaluation of Commercial Retroreflector Optical Properties”, Abstr.Int.Conf. The 13-th International Conference-School „Advanced Materials and Technologies”, Palanga, Lietuva, p.38. (2011).

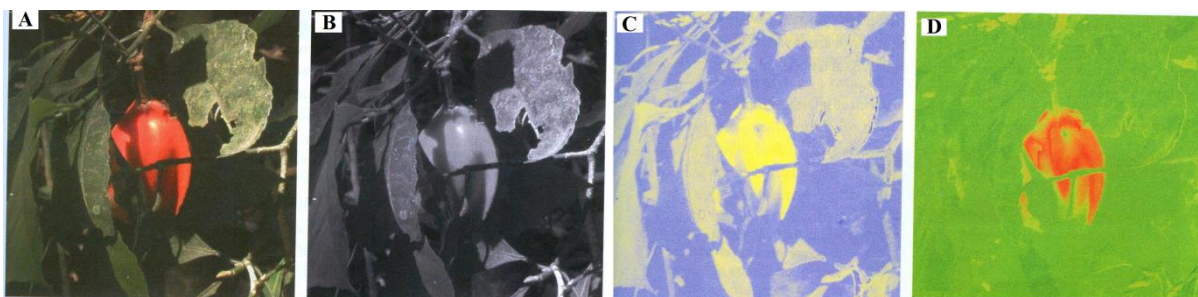
Krāsu redzes defekti – vēsturisks skatījums

Iedzimti krāsu redzes defekti

Ir zināms, ka normālu krāsu redzi raksturo spēja saskaņot jebkuru redzamo krāsu, izmantojot trīs primārās krāsas. Krāsu redzes defektus var raksturot, balstoties uz krāsu saskaņošanas īpatnībām salīdzinājumā ar normālu (trihromātisku) krāsu redzi. Dihromāti krāsu saskaņo, izmantojot divas primārās krāsas, anomālie trihromāti – līdzīgi kā normālas krāsu redzes gadījumā izmantos trīs primārās krāsas, taču to saskaņošanas rezultāti atšķirsies no normālo trihromātu saskaņošanas rezultātiem. (Shevell, 2003)

Neskatoties uz iedzimtu krāsu redzes defektu plašo izplatību, vēsturiski to izpēte un zinātniskais apraksts veidojās vēlīni. Roberts Boils (*Robert Boyle*) 1688. gadā apraksta kāda matemātiķa, ievērojama optiķa un, viņaprāt, uzticamas personas fenomenu aprakstīšanā uztveri. Šis indivīds esot bijis izcils savos astronomiskajos novērojumos, taču jauca krāsas, kas citiem cilvēkiem likušās pavisam atšķirīgas. Diemžēl Boils nav aprakstījis, tieši kādas krāsas minētais vīrs savā starpā jaucis. Aprakstītā vīrieša identitāte bijusi pakļauta dažādām spekulācijām. Vai runa būtu varējusi būt par seru I. Ņūtonu, kurš par sevi teicis: „*Manis paša acis nav īpaši kritiskas krāsu izšķiršanā (my own eyes are not very critical in distinguishing colors)*” (Ņūtons 1675/1757)? (Shevell, 2003)

Citi gadījumi aprakstīti angļu un franču literatūrā 1770-tajos gados. Žozefs Huradts (*Joseph Huddart*) 1777. gadā piemin kurpnieka Harisa (*Harris*) ģimeni – Harisam bijusi lieliska spēja izšķirt formas, taču grūtības izšķirt krāsas, no kā cietis viņš pats un viņa brālis kuģa kapteinis. Hudarts par Harisu: „*Viņš bija ievērojais, ka bērnības gados citi bērni varējuši izšķirt ķiršus kokos ar (kā izliekas) krāsas palīdzību, lai gan pats tos varēja izšķirt tikai pēc formas un izmēra atšķirībām. Viņš esot ievērojais, ka citi bērni ķiršus spējuši ieraudzīt no lielāka attāluma, kaut arī citus objektus tālumā viņš varējis saskatīt ne sliktāk kā biedri; tas ir, kad redzei nav palīdzējusi krāsa. Lielus objektus viņš varējis saskatīt tik pat labi kā pārējie cilvēki; pat vismazākos objektus, ja vien tie nebija iekļauti citos kā ķirši lapās.*” Šajā piemērā aprakstīts, kā apkārtējā vide spēj maskēt stacionāru mērķi fonā, kam randomizēti mainās tādi parametri kā forma un gaišums. Mērķis būs redzams vienīgi tad, ja novērotājs izšķir attiecīgās krāsas (P1.1. attēls). (Shevell, 2003)



P.1.1. attēls. A – auglis Āfrikas lietus mežos. B – šis pats auglis tikai monohromatiskā simulācijā. C – dihromātiska novērotāja attēla simulācija. Kaut arī auglis ir redzams, lapas apgrūtina tā pamanīšanu. D – simulēta sarkani-zaļās oponentās sistēmas atbilde trihromātiskas redzes gadījumā. Auglis ir viegli pamanāms. (Snowden, *et al.*, 2012)

Līdzīgs analogs aprakstītajai situācijai dabā tiek izmantots mākslīgi veidotos krāsu redzes testos. 18. gadsimtā arvien lielāka publikas daļa sāka pievērst uzmanību krāsu redzes dažādībai. Rakstnieces Fanijas Burnijas (1752-1840) (*Fanny Burney*) dienasgrāmatas ieraksts par sarunu ar Apvienotās Karalistes karali Džordžu III (1738-1820): „*Tomēr viņš turpināja sarunu ar mani, joprojām par mūziku. „Man,” teica viņš, „tas šķiet ļoti īpatnēji satikt cilvēkus, kam nav muzikālās dzirdes un kas nespēj atšķirt vienu melodiju no otras, tāpat kā satikt stulbus cilvēkus... Ir cilvēki, kas neprot izšķirt krāsas. Malboro hercogs patiesībā nespēj izšķirt purpuru no zaļa!*” Tad viņš man pastāstīja anekdoti par viņa kļūdīšanos, noturot šīs krāsas par vienādām, kas bija ļoti smieklīga, bet es to neatceros gana precīzi, lai uzrakstītu. Cik neveiksmīgi īstiem virtuoziem, ka šādu acu īpašniekam pieder dārgumi, kurus novērtēt var vien patiesi spējīgie – Blenheimas (pils, aut. piez.) dārgumi!”

 (Shevell, 2003)

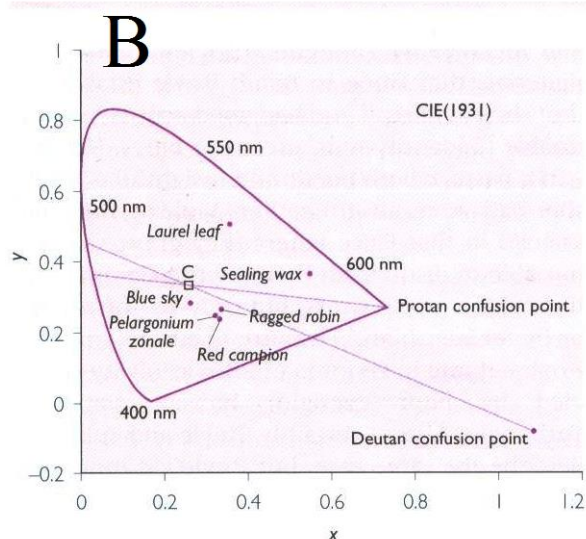
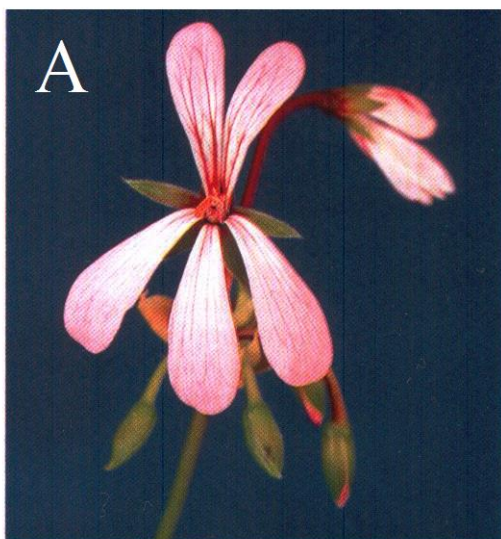
Tātad, informācija par krāsu redzes defektu izplatību jau bija visai labi nostiprinājusies, kad 1794. gadā jaunais Džons Daltons (*John Dalton*) sniedza priekšlasījumu par savu dihromātisko krāsu redzi Mančesteras Literātu un Filozofu Sabiedrībai (*Manchester Literary and Philosophical Society*). Daltona stāstījums bija daudz detalizētāks nekā līdzšinējie. Vēlāk viņš kļuva par slavenu ķīmiķi, tas sekmēja terminam „daltonisms” kļūt par apzīmējumu krāsu redzes defektam tādās valodās kā franču, spāņu un krievu. Daltons saules spektru redzēja kā sadalītu divās daļās, kuras viņš nosauca „zilā” un „dzeltenā”. „*Mana dzeltenā,*” viņš 1798. gadā rakstīja „*aptver citu cilvēku sarkano, oranžo, dzelteno un zaļo*”. Vēstuļu zīmogu vaska sarkanā krāsa un lauru lapas zaļā krāsa viņam bija vienādas, bet purpurs un rozā, ko trihromātisks novērotājs uzskatīs par krāsām ar līdzīgu īpašību, Daltonam bija ļoti atšķirīgas krāsas (neitrālai krāsai pretējos polos). Dienasgaismā rozā āboliņa (*Trifolium pratense*) un sarkanās spulgotnes (*Lychnis dioica*) ziedi viņam likās zilo debesu krāsā. Paša redzi sīkāk

pētīt Daltonu pamudināja novērojums, ka pelargonija (*Pelargonium zonale*) izskatījās debesu zila dienasgaismā, bet dzeltenīga sveču gaismā. No visiem viņa paziņām tikai brālis novēroja tādas pašas pārsteidzošas izmaiņas. Tālākajos paša pētījumos viņš novēroja, ka krāsu redzes defekts nav nemaz tik rets – klasē, kurā mācījās 25 skolēni, divi piekrita viņa redzējumam par novērotajām krāsu izmaiņām dažādos apgaismojumos. Daltons neatrada nevienu sievieti, kas sūdzētos par līdzīgu pieredzi, pirmo reizi sasaistot krāsu redzes iedzimtību ar dzimuma atšķirībām. (Shevell, 2003)

Pats Daltons uzskatīja, ka viņa izmainītā krāsu redze ir saistāma ar zili krāsotu vidi, kas pildīja viņa acs ābolu. Tā kā nekas neliecināja par izmainītām acs priekšējām daļām, viņš sliecās domāt, ka zili iekrāsots ir viņa acs stiklveida ķermenis, kas absorbē starojuma oranžo un sarkano daļu. Lai apstiprinātu savu hipotēzi, Daltons savas acis veltīja zinātniskai izpētei pēc savas nāves. 1844. gada 27. jūlijā Daltons mira 79 gadu vecumā, nākošajā dienā viņa autopsiju veica Žozefs Ransoms (*Joseph Ransome*). Nekādas izmaiņas viņa stiklveida ķermenī netika novērotas. Nedaudz dzeltenīga bija acs lēca, taču cilvēkam Daltona vecumā tas bija sagaidāms. Otra acs tika daļēji saglabāta. (Shevell, 2003)

Lielā mērā iedzimtas krāsu redzes traucējumu principus izskaidroja Džordžs Palmers (*George Palmer*) 1781. gadā, kad Daltonam bija vien 15 gadi. 1807. gadā Palmera skaidrojumu pārņēma Tomass Jungs (*Thomass Young*). Lekciju kursā par dabas filozofiju Jungs raksta: „Viņš [Daltons] uzskatīja, ka stiklveida ķermenis ir iekrāsots zils, tas nekad nav ticis novērots anatomiskos izmeklējumos. Daudz vieglāk ir pieņemt to tīklenes šķiedru paralīzi vai iztrūkumu, kas, kā tiek skaitļots, uztver sarkano krāsu.” (Shevell, 2003)

Eksistē daudz spekulāciju un pieņēmumu, ka Daltons, visticamāk, bijis protanops, taču to krāsu gadījumā, ko viņš jaucis, nevar izslēgt arī deiteranopijas iespējamību. P.1.2. attēlā ir parādīti Daltona jaukto krāsu spektrometriskie uzņēmumi, pārrēķināti hromatiskajās vienībās. Abu veidu sarkani-zaļo dihromātu konfūzijas līnijas var aprakstīt Daltona krāsu neizšķiršanas gadījumu. Tātad, no aprakstītajiem krāsu jaušanas gadījumiem nevar izsecināt, kāda veida defekts piemita Daltonam. Sarukuši Daltona acs fragmenti (uzglabāti vien gaisā) ir saglabājušies līdz mūsdienām Mančesteras Literātu un Filozofu Sabiedrības īpašumā. 1990-tajos gados Sabiedrība deva atļauju mazu paraugu izmeklējumam, izmantojot polimerāzes ķēdes reakciju, kas atļauj īsu DNS pavedienu pastiprināšanu. Šo darbību rezultātā izdevās iegūt divas tā gēna kopijas, kas kodē L-tipa vāļišu fotopigmentu un nevienu gēnu, kas kodētu M-tipa vāļišu fotopigmentu. Tātad Daltons visticamāk bijis deiteranops, nevis protanops, kā bieži tiek uzskatīts. (Shevell, 2003)

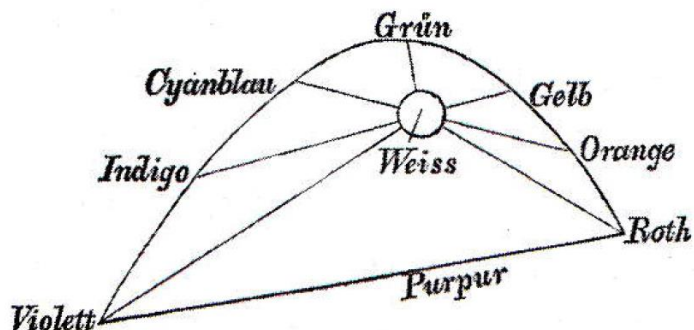


P1.2. attēls. A – *Pelargonium zonale*. Džonam Daltonam un viņa brālim zieds izskatījās debesu zils dienasgaismā un dzeltenīgs sveču gaismā. B – CIE xy krāsu diagramma (1931). Diagrammā attēlotas vairāku veidu ziedu hromatiskās vērtības, kas Daltonam izskatījās zilganas (*Pelargonium zonale*, *Lychnis dioica*, *Lynchis floscuculi*), grafikā atlikti arī vēstuļu vaska un lauru lapas virsas krāsu vērtības, kas Daltonam bija neizšķiramas. Punktu „C” (standarta dienasgaismas aproksimācija) šķērso protanopa un deiteranopa konfūziju līnijas. (Shevell, 2003)

Zelta laikmets krāsu redzes atklājumos (1850-1931)

Lielu ieguldījumu mūsdienu izpratnē par krāsu redzi devis vācu fiziķis Hermanis fon Helmhols (*Hermann von Helmholtz*) (1821-1894). 1852. gadā viņš nodalīja aditīvo krāsainu gaismu sajaukšanu un subtraktīvo krāsainu pigmentu sajaukšanu. Helmholca publicētajā darbā tomēr bija ieviesusies kļūda – viņa secinājums bija tāds, ka vienīgais krāsu pāris, monohromatiskas gaismas uztveres iegūšanai ir dzeltens – indigo zils. Tās ir **komplementārās krāsas**, kuras aditīvi sajaucot, var iegūt tīri baltu gaismu. Matemātiķis Hermanis Grasmans (*Hermann Grassmann*) (1809-1877) krāsas uztveri 1853.gadā aprakstīja kā trīsdimensionālu, kur katrai uztvertajai krāsai ir trīs aprakstošās dimensijas – tonis, gaišums un piesātinājums (*hue, brightness, saturation*). Šīs trīs uztveres dimensijas atbilst attiecīgi viļņa garumam (gaismas frekvence), intensitātei un tīrībai (baltas līdz monohromatiskas gaismas daudzums). Helmhols secināja, ka katrai krāsai krāsu diagrammā ir komplementārā krāsa. Izmantojot labāku spektrālo krāsu sajaukšanas metodi, viņš ievēroja, ka krāsām starp sarkano un dzeltenī-zaļo spektra daļu komplementārās ir purpura krāsas – violetā un sarkanā spektra daļu sajaukums. Turklāt, ne vienmēr komplementārās krāsas gaismas jāizmanto vienādās proporcijās, lai iegūtu baltu gaismu. Piemēram, baltas krāsas gaismas iegūšanai no violetās un dzeltenī-zaļās krāsas gaismām nepieciešama daudz blāvāka

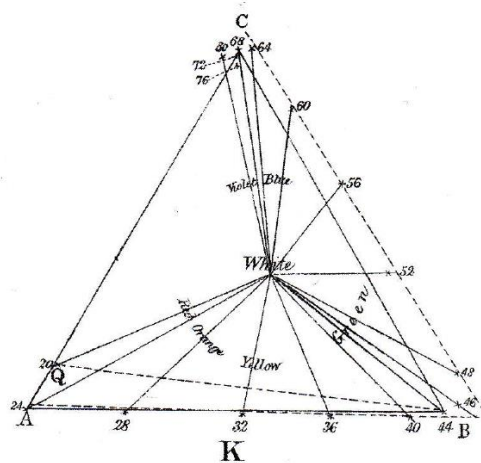
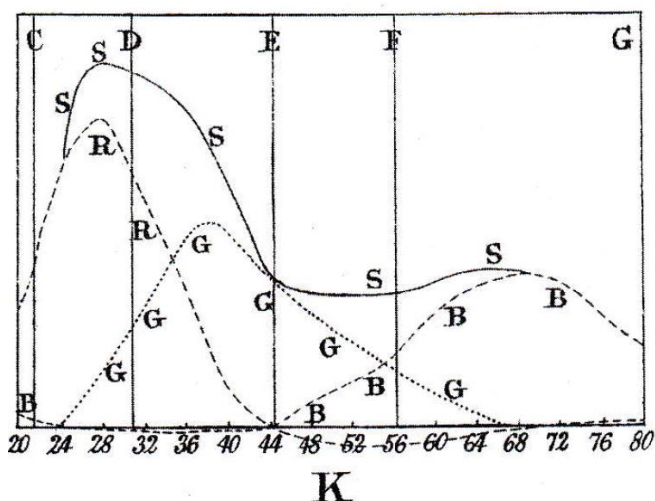
violetā gaisma nekā dzelteni-zaļā. Lai saglabātu informāciju par vajadzīgajām komplementāro krāsu proporcijām baltās krāsas iegūšanai, tika konstruēta pirmā krāsu diagramma, kas līdzinās mūsdienās izmantotajām (P.1.3. attēls). Purpura krāsu diapazons tika iegūts, savienojot krāsu spektra galapunktus ar taisnu līniju. (Shevell, 2003)



P.1.3. attēls. Pirmā krāsu diagramma, kas līdzinās mūsdienās izmantotajām. Konstruēta no H. fon Helmholca komplementāro krāsu mērījumiem. (Shevell, 2003)

Savukārt, J. K. Maksvels (*J. C. Maxwell* 1831-1879) ieguva pirmās empīriskās **krāsu saskaņošanas funkcijas**. 1860. gadā Maksvels bija izveidojis iekārtu, kas ļāva iegūt dienasgaismu no trīs monohromatisku krāsu gaismām. Tādejādi viņš aprakstīja visu redzamo spektru kā sastāvošu no trīs primāro krāsu gaismām un grafiski attēloja visa redzamā spektra katru viļņa garumu ar trīs primāro krāsu salikumu vajadzīgajās proporcijās (P.1.4. attēls). Šajā pašā publicētajā dokumentā tika pieminēts, ka funkciju raksturs mainās, ja saskaņošanas eksperimenti tiek veikti ārpus tīklenes centrālās daļas. Viņa paša un sievas iegūto krāsu saskaņošanas funkciju atšķirības, kā arī atšķirības, saskaņošanu veicot tīklenes perifērijā, viņš skaidroja ar individuāli selektīvo dzeltenā plankuma absorbciju tīklenes centrālajā daļā. (Shevell, 2003)

1920-tajos gados tika veikti atkārtoti krāsu saskaņošanas eksperimenti, izmantojot gan filtru instrumentu (*Guild*), gan monohromatiskas gaismas (*Wright*). Kad abas rezultātu kopas tika salīdzinātas, tos izsakot ar vienādām primārajām krāsām, tika iegūta augsta rezultātu pārklāšanās. Šie saskaņošanas rezultāti ņemti par pamatu 1931. gada *Commission Internationale d'Éclairage* (CIE) standarta krāsu diagrammas izstrādē. CIE 1931. gada diagramma tiek izmantota arī mūsdienās dažādiem tirdzniecības un komercijas nolūkiem. (Shevell, 2003)



P.1.4. attēls. Pa kreisi - pirmās empīriski iegūtās krāsu saskaņošanas funkcijas (J. K. Maksvela sievas dati. Uz x ass attēlota elektromagnētiskā spektra redzamā daļa no sarkanās daļas kreisajā pusē līdz violetajai daļai labajā pusē. Pa labi – krāsu diagramma no minētajiem saskaņošanas eksperimentiem. (Shevell, 2003)

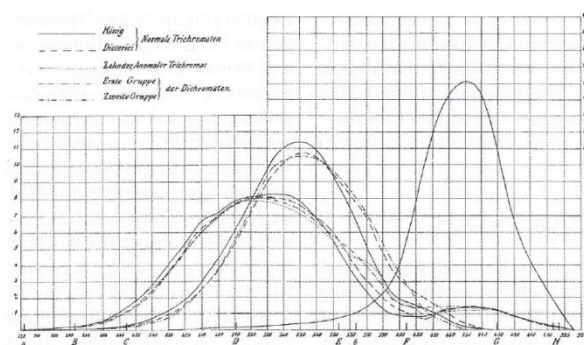
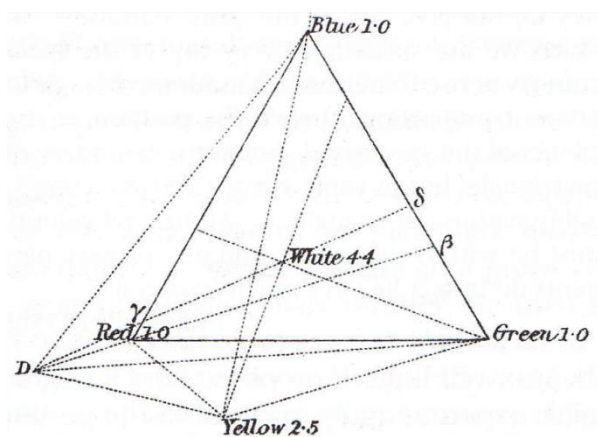
Tātad krāsu diagramma ļauj katru redzamo gaismu izteikt ar trīs patvaļīgi izvēlētām primāro krāsu gaismām, viss, ko nepieciešams zināt - kādas ir triju primāro gaismu relatīvās proporcijas testa gaismas iegūšanai. Tad ir iespējams izteikt vēlamo krāsu ar jebkurām trim citām izvēlētajām krāsām. Taču kaut kur diagrammā vajadzētu atrasties trim tādām krāsām, kas stimulētu tikai katru atsevišķo no trim Junga krāsu receptoru veidiem. 1855. gadā J. K. Maksvels uzsvēra, ka šādas gaismas realitātē neeksistē, jo vairums krāsu redzamajā spektrā izsauc atbildi vairākos receptoru veidos. Maksvels ierosināja, ka būtu iespējams eksperimentāli noteikt katra receptora novietojumu krāsu diagrammā un spektru izteikt relatīvajās ierosmes atbildēs katram no trim receptoru veidiem. Bija nepieciešams pieņemt, ka dihromātam iztrūkst trešā receptora funkcija. 1855. gadā Maksvels zināja tikai par viena veida krāsu redzes defektu – to, kam, viņaprāt, trūka garo viļņu jutības vāļišu. Izmantojot disku griešanas metodi, kam bija uzlīmētas dažādu krāsu papīra lapiņas centrālās krāsas iegūšanai, Maksvels pierādīja, ka jebkuras krāsas saskaņošanai dihromātam pietika ar četrām standarta krāsām, ieskaitot melnu (skat. P.1.5. attēlu pa kreisi). Piemēram, sarkanās krāsas (nejaukt ar gaismu) iegūšanai dihromātam bija iespējams ģenerēt šādu vienādojumu (Shevell, 2003):

$$0,19Za + 0,05Zi + 0,074M = 1,00S, \quad (P.1.1.)$$

kur Za – zaļš, Zi – zils, M – melns un S – sarkans. Tātad sarkanās krāsas sajūtu dihromātam bija iespējams iegūt, sajaucot tumši zili-zaļas krāsas. Uz līnijas $Red\beta$ (P1.5. attēlā pa kreisi) dihromāts var iegūt jebkuru atbilstošo krāsu, tikai variējot melnā daudzumu sajaukumā. Citiem vārdiem sakot, ja vien krāsas neatšķiras ar gaišuma līmeni, dihromāts tās

nespēj izšķirt (mūsdienu valodā tā būtu „konfūzijas līnija”). Nosakot otru šādu līniju $\gamma\delta$ un pagarinot to līdz abu līniju krustpunktam, iespējams noskaidrot trūkstošajam receptoram atbilstošo novietojumu. Šī metode tika pielietota vāļišu spektrālās jutības funkciju iegūšanai un līdz mūsdienām ir saglabājusies savu nozīmību psihofizikā. (Shevell, 2003)

Artūrs Konigs (*Arthur König*, 1856-1901) ieguva krāsu saskaņošanas funkcijas normāliem trihromātiem, protanopiem un deiteranopiem un izveda **vāļišu jutības funkcijas** (P.1.5. attēls pa labi). Vēlākie pētījumi, tādi kā uztvere tritanopijas gadījumā, sliekšņu mērījumi monohromatiskajiem palielinājumiem, izmantojot monohromatiskos laukus, ļāva precizēt un iegūt vispārēju pārlicību par Maksvela pareizo pieeju. Objektīvi vāļišu pigmentu absorbcijas mērījumi tika veikti 1965. gadā, izmantojot atstarojuma (*reflection*) densitometriju. (Shevell, 2003)



P.1.5. attēls. Pa kreisi – J. K. Maksvela krāsu diagramma, kurā parādīts, kā no dihromāta krāsu konfūziju mērījumiem iespējams iegūt receptoram atbilstošo novietojumu. Pa labi – pirmais reālistiskais mēģinājums novērtēt vāļišu jutības funkcijas. Spektrs attēlots ar garajiem viļņu garumiem kreisajā pusē (uz x ass). (Shevell, 2003)

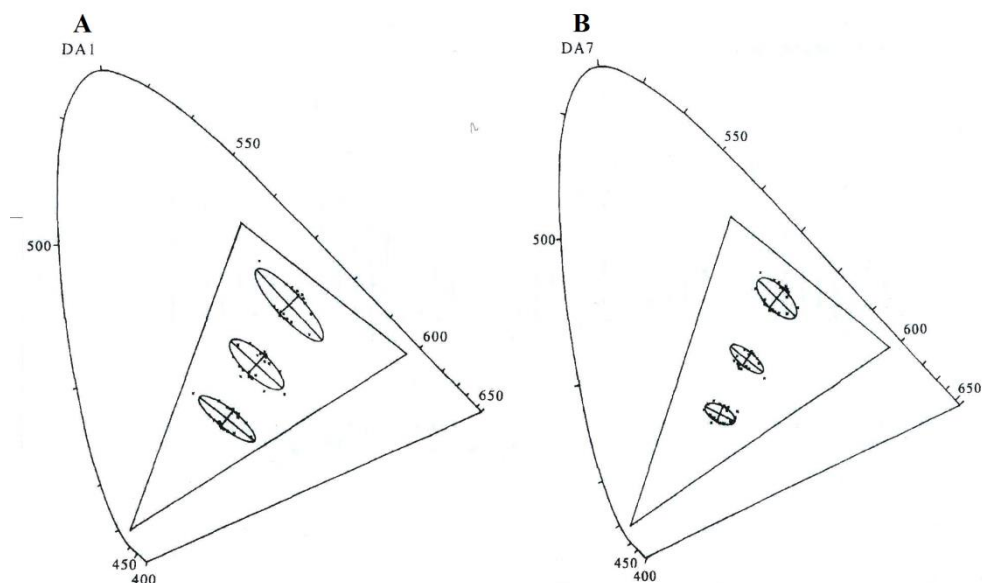
Anomālā trihromātisma atklāšana un pirmie apraksti

Lords Relejs (*John William Strutt, Baron Reyleigh*) 1881. gadā rakstīja, ka ievērojis, ka trīs no viņa sievas brāļiem atšķīrās no viņa paša krāsu saskaņošanas eksperimentā. Lai iegūtu monohromatisku dzeltenu gaismu, tiek izmantota sarkanās un zaļās gaismas kombinācija. Pats Relejs esot izmantojis sarkanās gaismas daudzumu tā, ka tā izskatījies „koši sarkana kā vēstuļu vaska sarkanumā”, savukārt, sievas brāļi izmantoja divas reizes mazāku daudzumu sarkanās gaismas testa dzeltenās gaismas iegūšanai. Lorda Releja tiešo paziņu vidū arī J. J. Tomsons (*Thompson*) izmantoja daudz mazāku sarkanās gaismas daudzumu testa dzeltenās iegūšanai, salīdzinot ar normālu novērotāju. Toties divi citi izmantoja relatīvi 2,6 reizes vairāk sarkanās gaismas vajadzīgās krāsas iegūšanai. Daļai no dalībniekiem ar atšķirīgajiem krāsu

saskaņošanas rezultātiem bija augsta krāsu izšķirtspēja sarkani-zaļajā spektra daļā, tāpēc tos nevarēja toreizējā izpratnē nodēvēt par „krāsu akliem”. (Shevell, 2003)

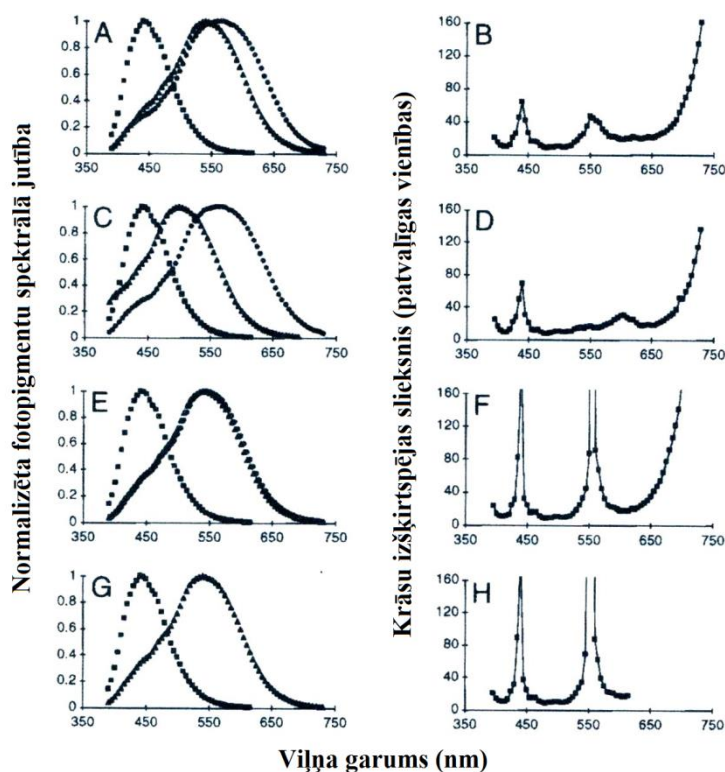
Drīz Releja identificētos gadījumus sāka dēvēt par anomāliem trihromātiem (König un Dieterici, 1886). Jau Relejs norādīja, ka anomālais trihromātisms ir ļoti bieži sastopams – aptuveni 6% no vīriešu populācijas. Holandiešu oftalmologs Donders (*F. C. Donders*) ieguva t.s. Releja vienādojumus aptuveni 50 dalībniekiem ar normālu krāsu redzi un parādīja, ka arī normālas krāsu redzes gadījumā raksturīga liela krāsu saskaņošanas rezultātu izkliede. Donders standartizēja viļņu garumus Releja vienādojuma ieguvei. Litija (Li) līnija (670 nm) tika izmantota sarkanās gaismas iegūšanai, savukārt, tallija (Tl) līnija (535 nm) tika izmantota zaļās gaismas iegūšanai. Testa lauka oranžā līnija tika iegūta no nātrija (Na) (589 nm). Līdz mūsdienām ir saglabājušies viļņa garumi sarkanās un oranžās gaismas iegūšanai, taču mainīta ir vienādojuma zaļā komponente no tallija uz dzīvsudraba līniju (Hg, 546 nm), jo šis salikums nodrošina piesātinājuma ziņā tuvāku rezultatīvās oranžās krāsas iegūvi. (Shevell, 2003)

2. pielikums



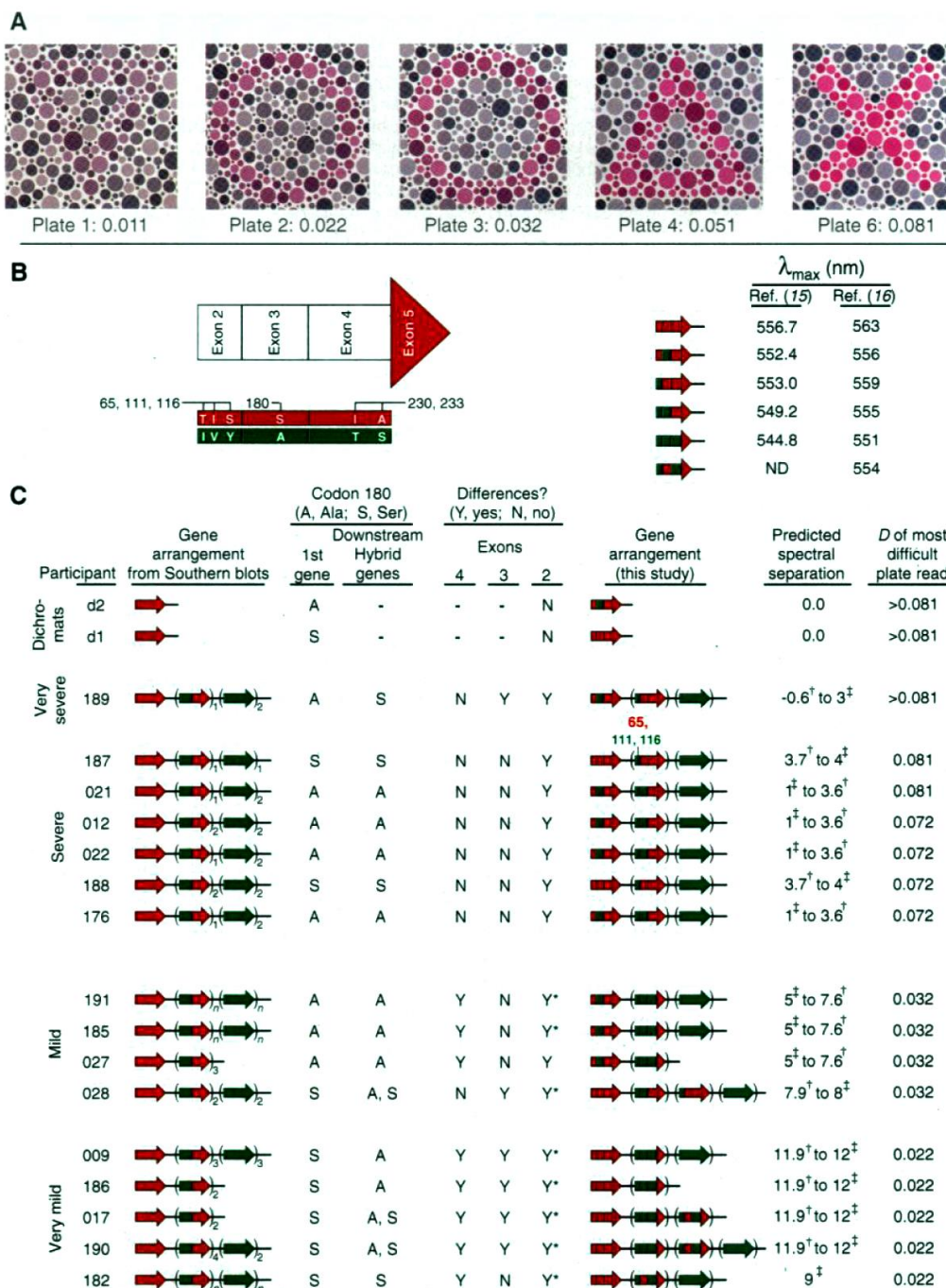
P2.1. attēls. Ar CCT iegūtas trīs krāsu neizšķiršanas elipses diviem deiteranomāliem brāļiem (A) un (B). Redzams, ka DA1 brāļa gadījumā visas neizšķiršanas elipses ir lielākas kā DA7 brāļa gadījumā abu elipsi definējošo asu virzienos. Ar trijstūri attēlots krāsu monitora attēlojamo krāsu ierobežojums. CCT elipsu tests nosaka 3 krāsu neizšķiršanas elipses uz tritāna neizšķiršanas ass. Elipses garākā ass sakrīt ar deitāna konfūzijas ass virzienu CIE xy 1931. gada krāsu diagrammā. (Jordan, Mollon, 1993)

3. pielikums



P3.1. attēls. Četri grafiku pāri – fotopigmentu absorbcijas līknes (pa kreisi) un modelētā relatīvā viļņu garumu izšķirtspēja (pa labi) dažādu krāsu redzes stāvokļu gadījumos. A un B – normāla trihromāta gadījums. C un D – hipotētisks trihromāts, kura vidējo viļņu absorbcijas līkne nobīdīta novietojuma ziņā pa visu starp S-tipa pigmenta un L-tipa pigmenta līkņu maksimumiem. E un F – deiteranomālijas gadījums, kur vidējo viļņu jutības vāļīte aizstāta ar garo viļņu jutības vāļītes variantu, kur abu garo viļņu jutības maksimumi savstarpēji nobīdīti par 5 nm vienībām. G un H – protanopijas gadījums, kur iztrūkst vidējo viļņu jutības vāļīšu funkcija. Viļņu garumu izšķirtspēja tika modelēta, par pamatu ņemot normāla trihromāta psihofizikāli iegūtās A attēlā parādītās līknes. Tālāk intervālā no 390 - 730 nm ik pēc 5 nm tika modelētas: 1) (R-G), 2) (B-Y). Iegūtās vērtības tika atliktas krāsu izšķirtspējas telpā, kur viena ass atbilst R-G izvades signāla stiprumam un otra ass B-Y signāla amplitūdai. Blakus esošo punktu savstarpējais attālums sniedz divu stimulu izšķirtspējas mēru. Divu blakus esošu viļņu garumu gadījumā (atšķirība 5 nm) atbilstošais attālums viļņu garumu izšķirtspējas telpā ir: $\{[(R_1 - G_1) - (R_2 - G_2)]^2 + [(B_1 - Y_1) - (B_2 - Y_2)]^2\}^{1/2}$, kur indeksi „1” un „2” atbilst redzes pigmenta absorbcijas efektivitātes relatīvajām vērtībām pie katra no šiem viļņu garumiem. Izšķirtspējas dati atlikti izmantotās krāsu telpas vienībās, kur sliekšnis atbilst konkrētajam attālumam starp abiem punktiem. Tuvāk esošu punktu gadījumā izšķirtspējas sliekšnis ir zemāks, tātad jutība ir augstāka. (Nathans, 1999)

4. pielikums

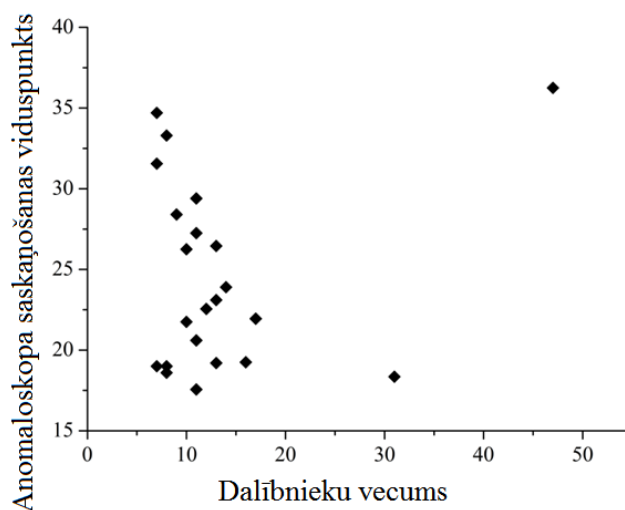


P4.1. attēls. A – pētījumā krāsu izšķirtspēja tika novērtēta, izmantojot sešus (parādīti pieci) Richmond HRR testa plašu simbolus ar pieaugošu fonu un stimulu veidojošo krāsu atšķirību. Numerācija zem platēm norāda aprēķināto attālumu (hromatiskajās koordinātēs) fonam no stimula CIE xy diagrammā. Normālas krāsu redzes gadījumā simbolus platēs redz attiecīgi ∇, O, O, Δ, X. B – vidējo viļņu jutības vāļtes spektrālā iestatīšana deiteranomāliem dalībniekiem, divu avotu dati (sīkāka informācija Neitz, *et al.*, 1996). Lielāko ieguldījumu vidējo un garo viļņu jutības vāļšu diferencēšanā sniedz eksons nr. 5. Sarkanā bulta norāda eksona nr. 5 atrašanās vietu L-gēnā. Mazākas spektrālās nobīdes garo viļņu jutības vāļšu fotopigmentu absorbcijas līknēs rada eksoni nr. 2-4. Gēnu diagrammā (zem bultas) un C attēlā ar sarkanu un zaļu krāsu attēlotas sekojošas aminoskābju sekvenču: T, S, S, I un A sarkanā

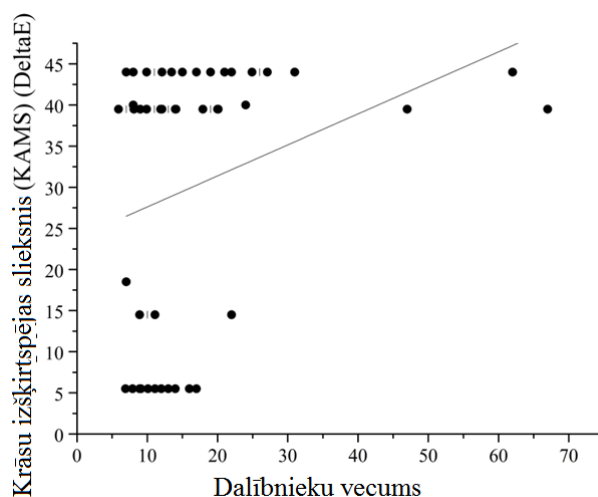
krāsā (L-gēns) un I, V, Y, A un T zaļā krāsā (M-gēns). Lai paredzētu attiecīgās absorbcijas spektru maksimumu nobīdes, tika izmantotas vērtības tabulā labajā pusē. Garo viļņu jutības vāļīšu $\delta\lambda_{\max}$ tika mērīti *in Vitro*. C – deiteranomālo dalībnieku gēnu analīze un krāsu izšķirtspēja (pēdējā kolonna). Otrajā kolonā defektīvo gēnu skaits norādīts ar skaitli apakšrakstā. Pētījumā gēni tika analizēti sīkāk (kolona *gene arrangement (this study)*). Tika izmeklēti gēnu eksoni nr. 2,3 un 4. No prognozētajām gēnu izmaiņām tika modelēta fotopigmentu $\delta\lambda_{\max}$ vērtību savstarpējā nobīde (kolonna *predicted spectral separation*). Novērojama sakarība - jo lielāka prognozētā spektru $\delta\lambda_{\max}$ vērtību savstarpējā nobīde no ģenētiskā testa, jo labāks bija sniegums krāsu izšķirtspējā. (Neitz, *et al.*, 1996)

5. pielikums

Lai izslēgtu iespēju, ka dalībnieku vecums ir bijis noteicošais faktors, kas ietekmējis iegūtos krāsu izšķirtspējas sliekšņus un anomaloskopa saskaņošanas rezultātus, tika atsevišķi analizēta dalībnieku vecuma ietekme uz iegūtajiem rezultātiem. Attēlā P.5.1. parādīti iegūtie anomaloskopa saskaņošanas rezultātu viduspunkti kā funkcija no dalībnieku vecuma. Attēlā P.5.2. parādīti ar KAMS testu iegūtie krāsu izšķirtspējas sliekšņi ΔE vienībās kā funkcija no dalībnieku vecuma. Iegūtās korelācijas ir vājas, izslēdzot tiešu iegūto rezultātu mainīgumu dalībnieku vecuma dēļ.



P.5.1. attēls. Saskaņošanas apgabalu viduspunktu atkarība no deitānu dalībnieku vecuma ($n = 22$; $r = 0,18$).



P.5.2. attēls. Ar KAMS testu iegūtie krāsu izšķirtspējas sliekšņu viduspunkti (ΔE vienībās) kā funkcija no deitānu dalībnieku vecuma ($n = 44$; $r = 0,19$). Punkti, kas pārklājas, pārskatāmības nolūkos nobīdīti no to patiesās pozīcijas, kas attēlota ar vertikālu līniju (|).

PATEICĪBAS

Autore izsaka lielu pateicību darba vadītājam prof. M.Ozoliņam par padomiem un pamudinājumu uzsākt studijas doktorantūrā un Eiropas Sociālā fonda projektam „Atbalsts doktora studijām Latvijas Universitātē” (Elmīras Zariņas personā) par pamudinājumu studijas pabeigt. Paldies profesoram Ozoliņam par neskaitāmajiem padomiem un atbildēm uz dažreiz ne visai gudriem jautājumiem! Studiju gaitā autorei lielu prieku sagādāja iespēja sastrādāties ar studentēm Ausmu, Brigitu, Aiju un Lindu. Paldies kolēģiem un draugiem Anetei, Kristai, Renāram, Varim un Sergejam par padomiem, izpalīdzīgu roku datu vākšanā un atļauju izmantot iepriekš izstrādātos algoritmus datu ieguvē un apstrādē. Liels paldies vectētiņam Arvīdam Desmitniekam par iespēju iegūt datus Vaiņodē un Gramzdā, kā arī visiem eksperimentu dalībniekiem par pacietību un piedalīšanos. Paldies profesoriem Sandrim Lācim un Ivaram Lācim par atsaucību grūtā brīdī – bez anomaloskopa autorei nekas nebūtu sanācis. Paldies profesorei G.Krūmiņai par darba došanu tad, kad nebija, kur nopelnīt. Izsaku pateicību arī darba recenzentiem L.Skujam un G.Paramei par vērtīgajiem ieteikumiem un darba labojumiem. Paldies vīram par samierināšanos ar jebkāda paredzama darba laika neesamību un visai Optometrijas nodaļai, kur katrs atsevišķi ir brīnišķīgs cilvēks, bet visi kopā – labākais kolektīvs, kāds jebkad redzēts. Paldies arī vectēvam Dadijam, kurš manī ir tik daudz ieguldījis un kuru nekad neesmu vēlējies pievilt.

Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā „Atbalsts doktora studijām Latvijas Universitātē”.



EIROPAS SAVIENĪBA



LATVIJAS
UNIVERSITĀTE
ANNO 1919

IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ