

LATVIJAS UNIVERSITĀTE  
BIOLOĢIJAS FAKULTĀTE  
CILVĒKA UN DZĪVNIEKU FIZIOLOĢIJAS KATEDRA

KOGNITĪVAS SLODZES IETEKME UZ GAISMAS  
STIMULA IZRAISĪTU ZĪLĪŠU REFLEKSU

Maģistra darbs

Autore: Brigita Zutere

Stud. apl. Nr.: bz10006

Darba vadītājs: Dr. fiz. Sergejs Fomins

Darba konsultants: Dr. hab. biol., prof. Juris Imants Aivars

RĪGA 2015

## KOPSAVILKUMS

Maģistra darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, datorsalikumā uz 45 lappusēm. Darbs satur 26 attēlus, 7 tabulām un 45 atsaucēm uz izmantoto literatūru.

Šajā darbā “Kognitīvas slodzes ietekme uz gaismas stimula izraisītu zīlīšu refleksu” autore apskata dažādu intensitāšu kognitīvo slodžu ietekmi uz zila un balta, konstanta vai sinusoidāla stimula izraisītu zīlīšu refleksu.

Tika secināts, ka, palielinoties kognitīvas slodzes intensitātei, zīlītes diametrs sašaurinās. Kognitīvā slodze rada ietekmi uz zīlīšu refleksa parametriem – izmeklēto personu grupas vidējie rādītāji neuzrāda viennozīmīgu ietekmi. Daļai indivīdu bija novērotas izmaiņas latentā perioda, amplitūdas un laika konstantes  $t_{50\%}$  vērtībā. Atklājās, ka amplitūda un aizkaves laiks ir atkarīgi no stimula frekvences.

**Atslēgas vārdi:** zīlīšu refleks, gaismas stimuls, kognitīva slodze

## SUMMARY

Master thesis is written in Latvian on 45 pages. It contains 26 figures, 7 tables and 45 resources.

The author in the paper “Impact of the Cognitive Workload on Light Stimulus Induced Pupillary Light Reflex” shows the influence of different intensity cognitive load to white and blue constant or sinusoidal stimulus on eye pupillary diameter. The aim of this research was to evaluate and quantify if the pupillary response, regarding its sensitivity to physiological change, conserves its quality as a measure of the test cognitive load. Results show that with increasing cognitive load intensity, pupillary diameter constricts. Impact of cognitive load is not tendentious. Stimulus frequency affects time delay and amplitude.

**Key words:** pupillary light reflex, light stimulus, cognitive workload

## SATURS

IEVADS .....	8
1. LITERATŪRAS APSKATS .....	9
1.1. Acs zīlīte un zīlītes gaismas reflekss .....	9
1.2. Acs zīlītes lielumu ietekmējošie faktori.....	12
1.2.1. Kognitīvas slodzes ietekme .....	14
1.2. Acs zīlītes mērīšana – pupillometrija.....	18
1.2. Tīklenes ganglionārās šūnas .....	18
1.3. Fotoreceptoru gaismas jutība .....	23
2. MATERIĀLI UN METODES.....	25
2.1. Dalībnieki.....	25
2.2. Metode .....	25
2.3. Aparatūra .....	27
2.4. Acs zīlītes dinamikas ieraksts .....	28
1.2. Statistika.....	29
3. REZULTĀTI UN DISKUSIJA .....	30
3.1. Baltai gaismai adaptētas zīlītes diametra fluktuācijas .....	30
3.2. Zīlītes diametra adaptācija dažādas grūtības kognitīvai slodzei .....	31
3.3. Zīlītes gaismas refleksa parametri .....	32
3.4. Kognitīvas slodzes ietekme uz zīlīšu refleksa parametriem .....	33
3.4.1. Zīlīšu refleksa latentais periods .....	33
3.4.2. Zīlīšu refleksa amplitūda .....	34
3.4.3. Gaismas stimula izsuktās zīlītes sašaurināšanās ātrums .....	35
3.4.4. Kognitīvas slodzes ietekme uz zīlīšu refleksa parametriem (individuālie dati) .....	37
3.5. Sinusoidālas gaismas stimula izraisīto zīlīšu diametra fāziskās maiņas.....	38
3.5.1. Zīlīšu reakcijas uz sinusoidālu stimulu parametru (amplitūdas un aizkaves) atkarība no stimula frekvences .....	38
3.5.2. Zīlīšu reakcijas uz sinusoidālu stimulu parametru (amplitūdas un aizkaves) atkarība no testa kognitīvās slodzes grūtības pakāpes .....	39
SECINĀJUMI .....	44
PATEICĪBAS .....	45
IZMANTOTĀ LITERATŪRA .....	46

## IEVADS

Starp vienlaicīgi notiekošām somatiskām, veģetatīvām, sensorām un psihiskām funkcijām pastāv būtiskas savstarpējas ietekmes. Tās realizējas funkciju vadības līmenī. Intensīvi tiek pētīta, piemēram, kognitīvas aktivitātes (apzinātas prātošanas) kortikālo mehānismu saikne ar somatisko funkciju vadības zemgarozas centriem, centrālo kustību paternu generatoru un pat spinālo centru darbību.

Neirozinātnē un psihofizioloģijā aktuāls izpētes aspekts ir garozas neirālo mehānismu saikne ar veģetatīvās nervu sistēmas darbību. Šajā jomā ērts pētījumu modelis ir zīlīšu radiālā un cirkulārā muskulatūra, kas atrodas tiešā simpātiskās un parasimpātiskās eferentācijas pakļautībā. Zīlītes muskulatūras reakcijas ir viegli un precīzi kontrolējamas. Bez teorētiskās intereses, vilinošs šķiet pieņēmums, ka (sakarā ar minēto ciešo saikni starp garozas informācijas apstrādes mehānismiem un veģetatīvo funkciju vadības mehānismiem) zīlīšu reakciju kvantitatīva izvērtēšana var kalpot kā metode indivīda psihisko funkciju īpatnību identificēšanai (Steinhauer & Hakerema, 1992).

Neskatoties uz lielo pētījumu skaitu šajā jomā, tajos galvenokārt analizētas tikai zīlītes diametra toniskās maiņas un zīlītes gaismas refleksa amplitūdas atkarība no kognitīvās slodzes grūtības pakāpes. Nav veikti pētījumi par kognitīvās slodzes smaguma ietekmi uz zīlīšu muskulatūras reakciju pārējiem parametriem (latento periodu, zīlītes diametra maiņas ātrumu, reakcijas aizkavi, ja gaismas refleksu izsauc sinusoidāls gaismas signāls). Līdz ar to, nav noskaidrots, vai pastāv kāda viennozīmīga likumsakarība starp visu minēto parametru izmaiņām kognitīvas slodzes ietekmē.

**Pētījuma mērķis:** Noskaidrot un kvantitatīvi raksturot kognitīvas slodzes ietekmi uz acs zīlīšu diametru un zīlītes gaismas refleksa parametriem.

### **Uzdevumi:**

1) Noskaidrot monohromatiskas gaismas stimula (456 nm) izraisīta zīlītes refleksa parametrus (latentais periods, amplitūda, sašaurināšanās ātrums –  $t_{50\%}$ ).

2) Noskaidrot trīs dažādas intensitātes kognitīvo slodžu ietekmi uz zīlītes diametru nemainīga apgaismojuma apstākļos.

3) Noskaidrot trīs dažādas intensitātes kognitīvo slodžu ietekmi uz zīlīšu gaismas refleksa parametriem.

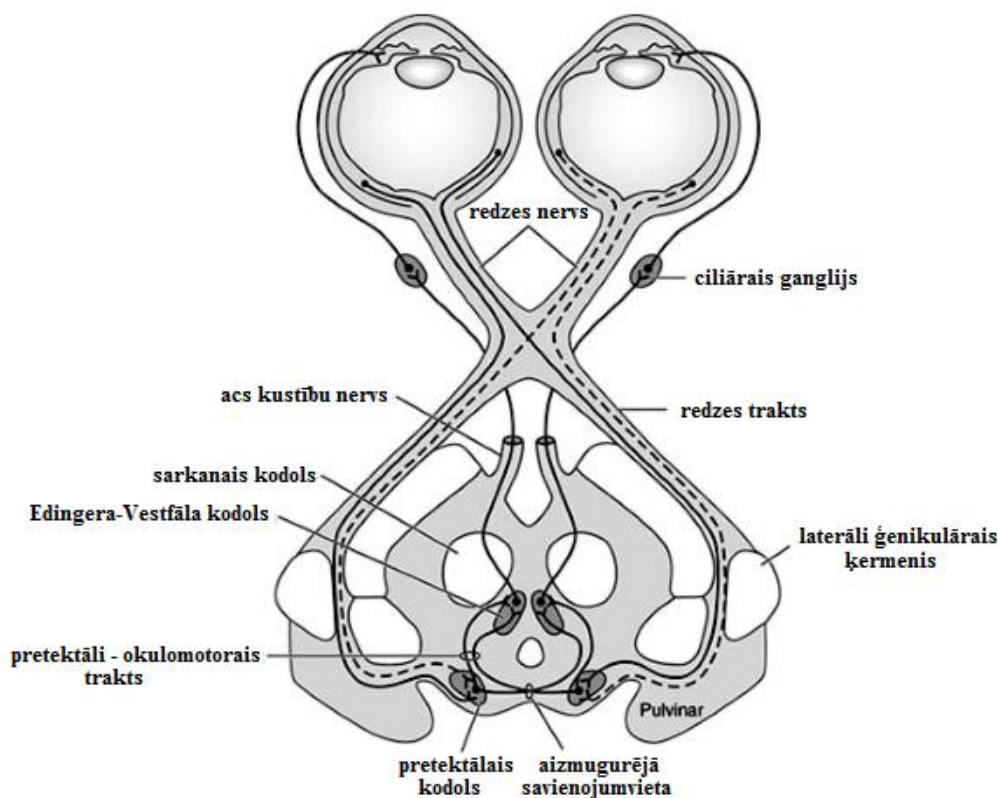
4) Noskaidrot sinusoidāla gaismas stimula izraisīto zīlīšu diametra fāzisko maiņu parametrus (amplitūdu un aizkavi) bez kognitīvas slodzes un dažāda smaguma kognitīvo slodžu laikā.

# 1. LITERATŪRAS APSKATS

## 1.1. Acs zīlīte un zīlītes gaismas reflekss

Acs zīlīte (*pupilla*) ir atvērums, kas novietots acs varavīksnenes (*iris*) centrā, un ļauj redzamajai gaismai nokļūt līdz tīklenei (*retina*). Zīlīte izskatās melna, jo lielākā daļa gaismas, kas tai iziet cauri, tiek absorbēta acs iekšējos audos. (Snell et al., 2006; Schiefer et al., 2007) Optiskā ziņā acs zīlīte ir apertūra vai atvērums, savukārt varavīksnene ir šīs apertūras veidojošais elements. Acs zīlīte normā ir apaļa un simetriska, kā arī reaģē uz gaismu un arī akomodācijas un konverģences izraisītu atbildi. (Schiefer et al., 2007)

Acs zīlītes gaismas refleksa ceļš sniedz optimālu modeli, lai pētītu sensorās un fizioloģiskās kavējošās ietekmes, kas tiek saistītas ar dažādu gaismas režīmu aktivizēšanu. Gaismas refleksa lieluma samazinājums psihosensoru stimulāciju laikā ir labi izpētīts gan dzīvniekiem, gan cilvēkiem. (1. attēls) (Steinhauer et al., 2000)



1. attēls. Acs zīlītes gaismas refleksa ceļa modelis. (Schiefer et al., 2007)

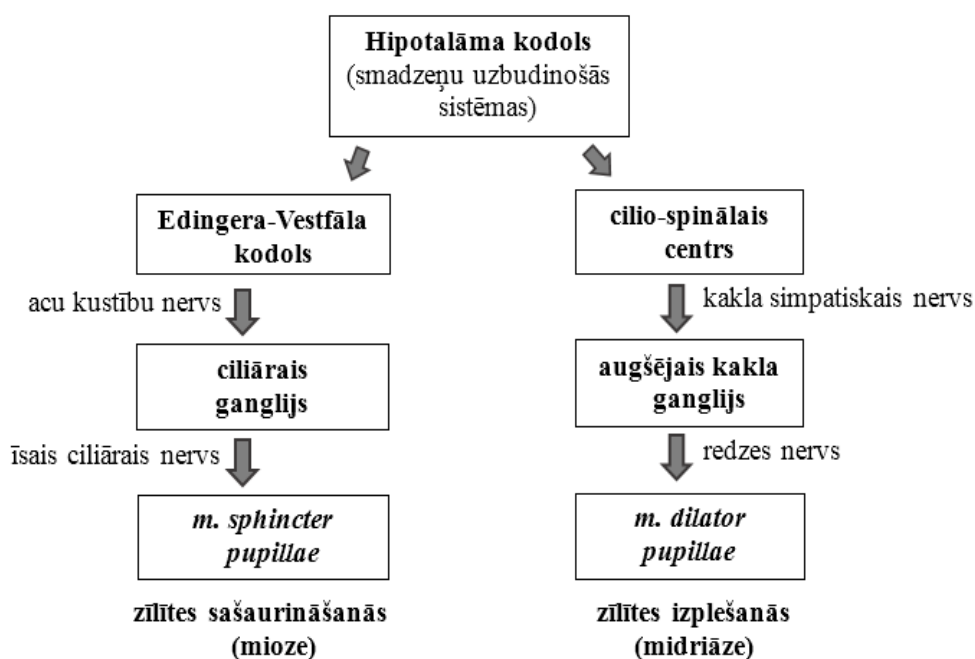
Figure 1. Model for the eye pupillary light reflex pathway. (Schiefer et al., 2007)

Parasimpātiskais eferentais ceļš iet no vidussmadzenēm līdz varavīksnenei, savukārt aferentais ceļš iet no tīklenes līdz vidussmadzenēm. Šie abi ceļi veido acs zīlītes gaismas

refleksa ceļu. Arī kavējošie signāli no centrālās simpātiskās nervu sistēmas var ietekmēt vidussmadzeņu darbību, veidojot papildus eferento ceļu uz zīlīti, inervējot paplašinātājmuskuli (*m. dilator pupillae*). Lai gan simpātiskais ceļš nav tieši iesaistīts zīlītes gaismas refleksā, tas var samazināt zīlītes atbildes reakciju uz gaismu. (1. attēls, 2. attēls) (Kennard et al., 2011)

Aferentais ceļš no tīklenes receptoriem iesaista tikai sinapsi pretektālajā kodolā, pirms otrās krustotās un nekrustotās projekcijas sasniedz motoro centru trešā nerva jeb acs muskuļa nerva (*n. oculomotorius*) kodolā. Savukārt eferentais ceļš iesaista sinapsi ciliārajā ganglijā ar galējo motoro neironu, savienojot sinapses zīlītes savilcējmuskulī (*m. dilator pupillae*), lai nodrošinātu acs zīlītes saraušanās jeb miozes galveno komponenti. (1. attēls., 2. attēls) (Steinhauer et al., 2000)

Papildus kavējošas ietekmes zīlīšu saraušanos regulējošajā parasimpātiskajā centrā jeb acs kustību kodola Edingera-Vestfāla apvidū ietver dilstošas garozas eferentācijas. Tādējādi ir iespējams, ka garozas ietekmes, tai skaitā kognitīvā aktivizācija, varētu atstāt efektu uz zīlītes gaismas reakciju. (Steinhauer et al., 2000)



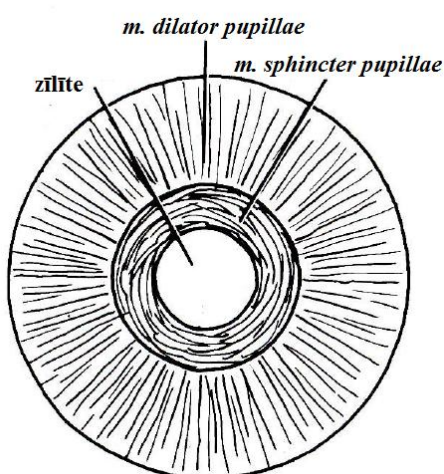
2. attēls. Neuroloģiska acs zīlītes muskuļu vadības shēma. (Snell et al., 2006)

Figure 2. Scheme of the neurological control for the eye pupillary muscles. (Snell et al., 2006)

Jāņem vērā arī zīlītes inervācijas specifika. Kā zināms, acs zīlītes inervācijā dominē parasimpātiskā neirālā vadība. Zīlītes savilcējmuskulis (*m. dilator pupillae*) ir relatīvi vājš muskulis, kas ir iestiprināts varavīksnenes stromā, turpretim paplašinājmuskulis (*m. sphincter*

*pupillae*) dominē zīlītes gaismas atbildes reakcijā, jo galvenokārt saņem signālus no parasimpātiskās nervu sistēmas. (3. attēls) (Zangemeistar et al., 2009)

Zīlītes sašaurinātājmuskulim (*m. sphincter pupillae*) ir lentveidīga forma, un tas ieskauj zīlītes malas. Muskulim ir muskarīna receptori, un to inervē parasimpātiskā nervu sistēma. Sašaurinātājmuskulis ir 0.10 līdz 0.17 mm biezs, savukārt paplašinātājmuskulis ir 0.01 mm plāns mioepiteliālo šūnu slānis, kas izplatās viscaur varavīksnenei. Paplašinātājmuskulim ir dažas sasaistes vietas ar sašaurinātājmuskuli, un tas beidzas varavīksnenes pamatā. Paplašinātājmuskulim pārsvarā ir alfa-2 adrenalģiskie receptori, un to inervē simpātiskā nervu sistēma. (3. attēls) (Kennard et al., 2011)



3.attēls. Acs zīlītes muskuļu šķiedru izkārtojums paplašinātājmuskulim (*m. dilator pupillae*) un sašaurinātājmuskulim (*m. sphincter pupillae*). (Snell et al., 2006)

Figure 3. Diagram showing the arrangement of the fibers of the dilator pupillae and the sphincter pupillae. (Snell et al., 2006)

Tomēr centrālās simpātiskās nervu sistēmas neirālās aktivitātes kavēšana (inhibīcija) Edingera-Vestfāla kodolu (*nuclei accessorii nervi oculomotorii*) līmenī arī varētu būt nozīmīgs faktors zīlītes atbildes vadībā. Neironu, kas aktivizē zīlītes sašaurināšanos, aktivācija Edingera-Vestfāla kodolā ir augsta, ja nav ārējas ietekmes, līdz ar to acs zīlītes izmērs var būt neliels. (Wilhelm et al., 2002)

Krēslas vai tumsas apstākļos zīlīte var palielināties līdz vidēji 7 mm diametram ar standartnovirzi līdz aptuveni 0.9 mm, savukārt normālas gaismas apstākļos tā ir vidēji 3 mm liela. Tādējādi apgaismojuma izmaiņas var ierosināt zīlītes izplešanos par vairāk kā 2 reizēm no tās ierastā izmēra (aptuveni par 120%). Zīlītes atbildes reakcijas norit patvaļīgi, un tās ir

sarežģīti kontrolēt. (Laeng et al., 2012) Acs zīlīte var pat sasniegt 10 mm diametru. Jāatzīst, ka tās izmērs ir atkarīgs arī no cilvēka vecuma. (Kennard et al., 2011)

## 1.2. Acs zīlītes lielumu ietekmējošie faktori

Līdz šim zināms, ka zīlītes izmēru ietekmē tādi faktori kā: 1) uz tīklenes krītošā apgaismojuma līmenis, 2) acs akomodācijas stāvoklis, 3) dažādi sensorie un emocionālie apstākļi, 4) kognitīvās un emocionālās informācijas apstrāde. (Adrian, 2003)

Cilvēka acs zīlītes izmērs mainās atkarībā no tīkļenei pievadītā gaismas daudzuma, respektīvi, palielinoties gaismas daudzumam, zīlītes diametrs samazinās, savukārt, ieplūstot maz gaismai, acs zīlīte paplašinās. Tā ir daļa no adaptācijas procesa, ar ko redzes sistēma pielāgo savu jutību dominējošajiem vides apstākļiem. Ir pieņemts, ka šos adaptācijas procesus vadīja tikai signāli no nūjiņām un vālītēm, taču jaunākie pētījumi apliecina, ka daļa no tīklenes ganglionārajām šūnām projicējas uz laterālo ģenikulāro ķermeni (*corpus geniculatum laterale*) un tad uz pretektālajiem olīvu kodoliem (*nucleus olivaris*), kas ir vidussmadzeņu daļa, kas iesaistīta zīlīšu gaismas refleksā. (Boyce, 2014) Šis mehānisms izskaidro, kādēļ zinātnieks *Gamlin* ar kolēģiem eksperimenta laikā, kad signāli uz vālītēm un nūjiņām bija bloķēti, nepārtraukta apgaismojuma laikā vēl joprojām saglabājās zīlīšu reakcija. Līdz ar to tika veikts atklājums, ka tīklenes ganglionārajām šūnām ir nozīme acs zīlītes izmēra maiņā. Visi trīs fotoreceptoru veidi – nūjiņas, vālītes un tīklenes ganglionārās šūnas – ir iesaistīti zīlītes vadības mehānismā dažādās kombinācijās, kas ir atkarīgas no gaismas daudzuma un pēc laika, kas pagājis kopš apgaismojuma līmeņa izmaiņām. (Gamlin et al., 2007)

Tiek uzskatīts, ka zīlītes mehānisma spektrālā jutība ir lielāka redzamās gaismas spektra zilajā daļā, salīdzinot ar redzes sistēmas jutību spektra zaļajā daļā. No tā izriet, ka zilās gaismas ietekmē novērojamas šaurākas zīlītes, salīdzinot ar zīlītēm, kas atrodas citas gaismas apstākļos pie tāda paša spilgtuma. (Adrian et al., 2003)

Primātiem acs zīlītes atbilde uz tīklenē ieplūstošās gaismas plūsmas palielinājumu vai samazinājumu galvenokārt ir atkarīga no subkortikālās projekcijas caur pretektālo apvidu uz Edingera-Vestfāla kodoliem. Izmaiņas vizuālo stimulu krāsā, telpiskajā struktūrā un kustībā sniedz informāciju par īslaicīgu acs zīlītes saraušanos, pat ja tā neizraisa vispārējas izmaiņas vai, pareizāk sakot, samazinājumu, vidējā tīklenes apgaismojumā. Piemēram, cilvēkiem ar bojātu primāro redzes garozu šādas īslaicīgas zīlītes saraušanās ir maz novērojamas vai ļoti samazinātas. Pieņemot, ka garozas (kortikālie) ceļi ir atbildīgi par īslaicīgām zīlītes konstrikcijām, varētu sagaidīt, ka tās latence (laiks no fotoreceptoru stimulācijas brīža, kamēr notiek atbildes reakcijas izpausme) pārsniegtu zīlītes normālo reakciju uz gaismu. Vēl jo vairāk, ņemot vērā, ka zīlītes īslaicīgās saraušanās nav subjektīvi kontrolējamas, tās latence

varētu kalpot kā jutīgs indikators tam redzes ceļa līmenim, kurā tiek analizēti dažādi stimulu raksturlielumi. (Barbur et al., 1998)

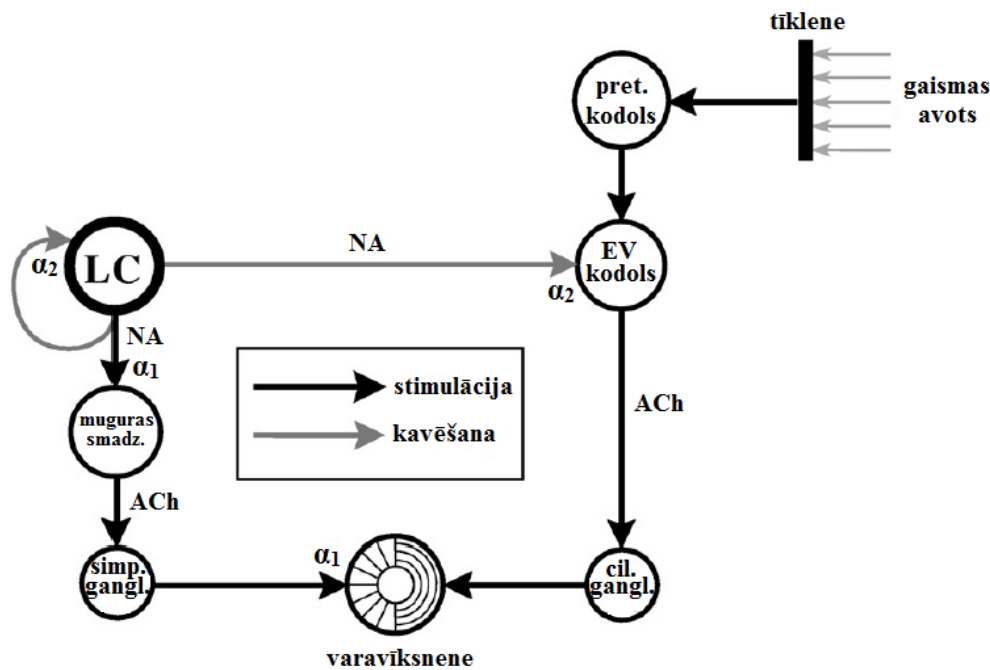
Garākas pārejošu konstrikciju latences uz krāsu izmaiņām, iespējams, atspoguļo apstrādes aizkavēšanos, kas rodas garozā. Taču iesaistītie garozas ceļi, kā redzams, nav tie paši, kas nosaka uztveres jeb percepcijas reakcijas laiku. Pretēji, acs zīlītes atbilde un ieteicamais laiks parāda būtisku atkarību no mainītā redzes raksturlieluma. Normālā redzes garozā sinaptiskā aizkave ir tuva 10 ms. Katrs posms kortikālajā hierarhijā var iesaistīt vairāk kā vienu sinapsi, līdz ar to eksperimentālo uzdevumu izpildītāju sniegums, iespējams, nav atkarīgs no to smadzeņu apvidu ietekmes, kas ir vairāk atdalīti šajā hierarhijā. (Barbur et al., 1998)

Novērots, ka nemierīgiem vai satrauktiem cilvēkiem ir spontānas vai patvaļīgas zīlītes svārstības, kuras tiek dēvētas par “nemierīgām zīlītēm”. Kad tiek izslēgts apgaismojums, svārstības pēkšņi beidzas. Palielinot apgaismojumu līdz 400 cd/m<sup>2</sup>, tika novērots frekvences un amplitūdas palielinājums. Taču, palielinot virs 400 cd/m<sup>2</sup>, abi parametri samazinājās. Jauniem un uzbudināmiem cilvēkiem ir novērojama tendence, ka gaismas ierosinātās svārstības ir izteiktākas. (Warga et al., 2008)

Spontāna vai patvaļīga zīlītes uzvedība tumsas apstākļos sniedz informāciju par eksperimenta dalībnieka modrības līmeni. Šī uzvedība parāda raksturīgas izmaiņas pārmērīgā dienas laika miegainumā – respektīvi, miegainiem eksperimenta dalībniekiem, kā dominējošās, var novērot lēnas svārstības ar pieaugošu amplitūdu (noguruma viļņi), un zīlītes diametrs nepārtraukti samazinās. Tanī pat laikā modriem cilvēkiem ilgu laiku acs zīlītes izmērs saglabājas nemainīgs, svārstoties ar  $\approx 1$  Hz frekvenci, un amplitūda ir 0.3 mm. (Luedtke et al., 1998)

Pētījumā par diabēta pacientu zīlīšu atbildēm uz konstantu un sinusoidālu gaismas stimulu tika secināts, ka statistiski nozīmīgs zīlītes diametra samazinājums ir autonomās neiropātijas agrīna pazīme. (Zangemeister et al., 2009)

Tāpat arī ir atrasta cieša saikne starp smadzeņu stumbra kodolu *locus coeruleus*, kas uzskatāms par noradrenāliskās sistēmas centru, un acs zīlītes izplešanos. Tiek domāts, ka *locus coeruleus* varētu būt galvenais kodols neirālajā tīklā, kas arīdžan kontrolē varavīksnenes muskuļus, līdz ar to šīs sistēmas aktivitāte izpaužas kā zīlītes paplašināšanās. (4. attēls) (Laeng et al., 2012)



4.attēls. *Locus coeruleus* nozīme acs zīlītes diametra maiņā. Perifērais stimulējošais simpātiskās nervu sistēmas ceļš iet caur muguras smadzenēm un augšējo kakla gangliju uz paplašinātājmuskuli (*m. dilator pupillae*) varavīksnenē. Centrālais kavējošais ceļš iet uz Edingera-Vestfāla kodolu un izmanto noradrenalīnu kā transmiteru. Apzīmējumi: LC – *Locus coeruleus*, EV kodols – Edingera-Vestfāla kodols, pret. kodols – pretektālais kodols, NA – noradrenalīns, Ach – acetilholīns,  $\alpha_1$  – alfa 1 receptors,  $\alpha_2$  – alfa 2 receptors. (Wilhelm et al., 2009)

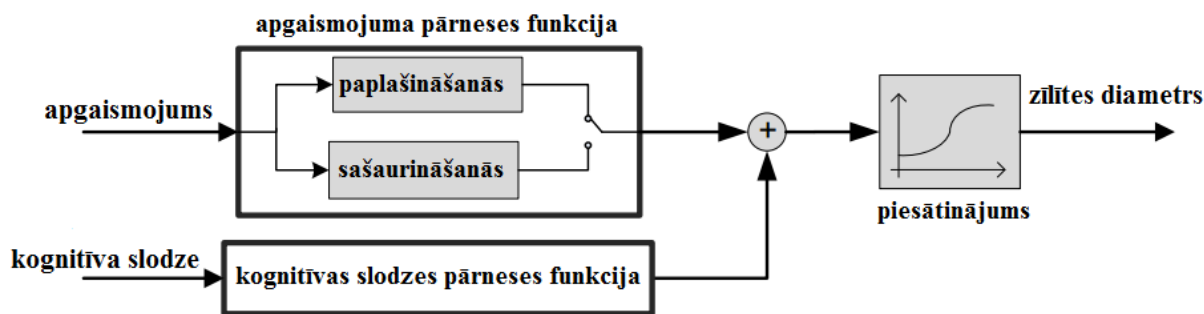
Figure 4. The role of the *Locus Coeruleus* in the regulation of pupil diameter. The peripheral excitatory sympathetic pathway runs via the spinal cord and the superior cervical ganglion to the dilator muscle in the iris. The central inhibitory pathway runs to the EW nucleus and uses noradrenaline as transmitter. (Wilhelm et al., 2009)

### 1.2.1. Kognitīvas slodzes ietekme

Kognitīvās jeb ar izziņu saistītās norises ir psiholoģiskie procesi, kas ir iesaistīti zināšanu iegūšanā un izpratnē, uzskatu un attieksmju izveidē, kā arī lēmumu veidošanā un problēmu risināšanā. Tie ir saistīti ar mentāliem uztveres procesiem, atmiņu, saprātu un spriestspēju pretēji emocionālajiem un gribas procesiem. Kognitīvo kapacitāti mēra ar inteliģences koeficienta testiem. (Gazzaniga, 2004)

Kognitīvā slodze apraksta garīgo jeb mentālo resursu līmeni, kas ir nepieciešams jebkurai personai katru mirkli. Tā ietekmē personas spēju apstrādāt informāciju, reaģēt uz apkārtējās vides faktoriem un pieņemt lēmumus. Tāpat kognitīva slodze parāda kopējo apjomu garīgajai jeb mentālajai piepūlei, kas tiek pielietota, izmantojot atmiņas procesus. Ar uzdevuma pildīšanu izsauktas acs zīlītes atbildes reakcijas ir uzticams un jutīgs mērs, lai noteiktu kognitīvo slodzi, jo tā ir tiešā veidā saistīta ar īstermiņa atmiņu. Smagas pakāpes

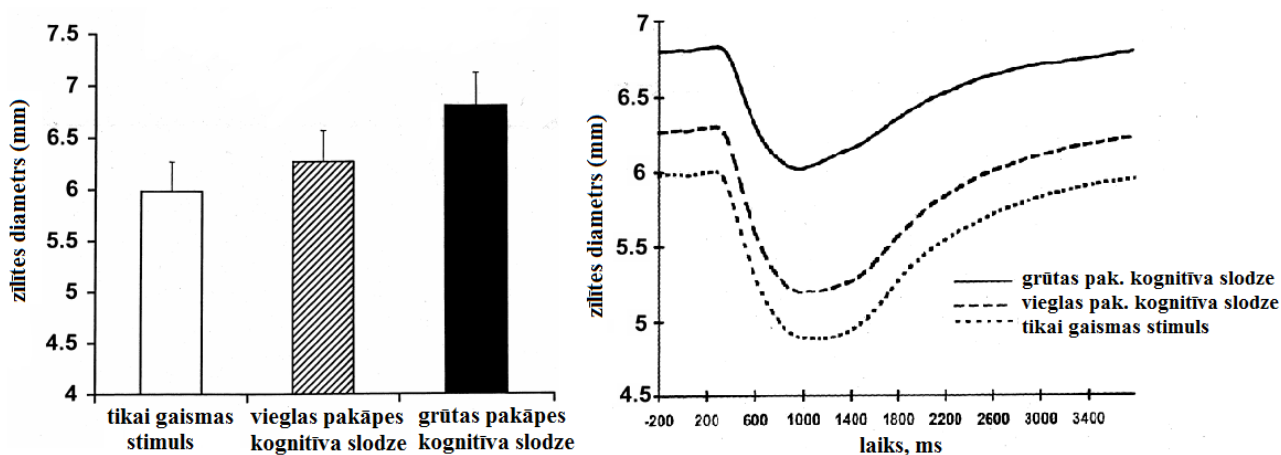
kognitīva slodze var atstāt negatīvas sekas uz uzdevuma pabeigšanu, jo katram ir individuāla kognitīvās slodzes kapacitāte. (5. attēls) (Moresi et al., 2007; Gazzaniga, 2004)



5. attēls. Apgaismojuma un kognitīvās slodzes ietekme uz zīlītes diametra izmaiņām. (Gazzaniga, 2004)

Figure 5. Block diagram model of the influence of illumination and cognitive load on pupil diameter. (Gazzaniga, 2004)

Kognitīvo slodžu izraisītās vai ar kāda uzdevuma veikšanu saistītās izmaiņas acs zīlītes izmērā ir jutīgs mērs, lai noteiktu apstrādei pieliktās slodzes un resursu izmantošanas daudzumu. Proti, jo lielāka ir zīlīte, jo lielāka mentālā slodze pielikta vai lielāks informācijas apjoms ir jāanalizē. Šādi novērojumi ir bijuši vairākos eksperimentos gan par valodas apstrādi, uztveri vai percepciju, atmiņu, sarežģītu uzdevumu risināšanu, gan uzmanību. Visur ir novērota tendence, ka acs zīlīte palielinās, palielinot uzdevuma grūtības pakāpi. (6. attēls) (Moresi et al., 2007; Laeng et al., 2012)



6.attēls. Vidējās zīlītes gaismas reakcijas uz dažāda veida kognitīvajām slodzēm, salīdzinot ar nulles kontroli. (Steinhauer et al., 2000)

Figure 6. Average pupillary light responses to the different kind of cognitive workloads compared with the control subjects. (Steinhauer et al., 2000)

Neliels stimula garums arī aizkavē sekundārās zīlītes saraušanās un atjaunošanās gaismas reakcijas komponentes novērtēšanu, kas tiek novērotas tikai tad, ja ir izmantots garāks stimuls, piemēram, viena sekunde. (Steinhauer et al., 2000)

Acs zīlītes diametra palielinājums varētu tikt saistīts ar augstāku parasimpātisko aktivizāciju vai arī lielāku tonisko kavēšanu Edingera-Vestfāla centrā, proti, zīlītes diametra izmaiņas parāda uzdevuma grūtības pakāpes radīto efektu. (Steinhauer et al., 2000)

Katra zīlītes diametra pieauguma iespējamais kavēšanas iemesls uzdevuma veikšanas brīdī palielināja tīklenes aktivizēšanu, kas ir viens no primārajiem Edingera-Vestfāla kompleksa kavēšanas cēloņiem. Tādējādi jebkurš psihosensorās stimulācijas pieaugums vai cita centra aktivizēšana varētu tūlītēji izpausties kā palielināts zīlītes diametrs, kas tiktu saistīts ar palielinātu retikulārās formācijas uzbudinājumu. (Steinhauer et al., 2000) Savukārt *Heller* ar kolēģiem atklāja, ka tikai parasimpātiskā ceļa centrālā kavēšana (inhibīcija) ir atbildīga par zīlīšu gaismas refleksa pavājināšanos. Ja ir stiprāki stimuli, tie var ierosināt sākotnēju zīlītes saraušanos zem 200 ms. (Heller et al., 1990)

Vairumā pētījumu, kuros mērīts zīlītes diametrs kognitīva uzdevuma laikā, garīgā slodze tika mainīta, palielinot uzdevuma grūtību. Šis uzdevuma grūtības pakāpes pieaugums palielināja zīlītes izmēru, taču nav skaidrs, vai šīs izmaiņas ir saistītas ar mentālās aktivitātes intensitāti (respektīvi, atmiņai pieliktās slodzes palielinājumu) vai arī šis palielinājums parāda, cik grūts šis uzdevums šķitis pašam eksperimenta dalībniekam. *Zenon* un kolēģu rezultāti parāda, ka zīlītes izmērs atšķiras arī atbilstoši fiziskas slodzes percepcijai, un tas liek nosvērties par labu otrajam no diviem iepriekš izteiktajiem minējumiem. (Zenon et al., 2014)

Gan garīgas, gan fiziskas slodzes pielietošana rada ievērojamas izmaiņas. Garīgā slodze tiek saistīta ar kognitīvo resursu pielietošanu, savukārt fiziskā slodze – ar muskuļu kontrakcijām. Uz šīm dažādajām slodzēm ir līdzīgas ķermeņa atbildes, piemēram, ilgstošas slodzes rada nogurumu. Savukārt garīgais nogurums rada fiziskās izturības mazināšanos. Jaunākajos pētījumos ir novērots, ka gan mentāla, gan fiziska piepūle rada tai proporcionālu zīlītes diametra pieaugumu. (Zenon et al., 2014)

Saistība starp zīlītes atbildes reakciju un šiem diviem acīmredzami atšķirīgajiem uzvedības faktoriem vedina domāt par iesaistītajiem mehānismiem. Kopsaucējs šīm parādībām varētu būt autonomās nervu sistēmas aktivizēšana, kura noris gan fizisku, gan mentālu aktivitāšu laikā. Ciliārais ganglijs, kas ir atbildīgs par zīlītes saraušanos, ir daļa no parasimpātiskās autonomās nervu sistēmas un saņem signālus no parasimpātiskā preganglionārā Edingera-Vestfāla kodola, kamēr zīlītes izplešanās tiek kontrolēta ar simpātisko augšējo kakla gangliju. (Zenon et al., 2014)

Par spīti labi zināmajai sakarībai starp zīlītes izmēru un garīgo slodzi, maz ir pētīts fiziskas slodzes radītais efekts uz zīlītes diametra izmaiņu. Šādas sakarības atainošana varētu palīdzēt noteikt ar piepūli saistīto zīlītes atbildes reakciju funkcionālo nozīmīgumu. (Zenon et al., 2014)

Informācijas apstrādes resursu aktivizēšanai ir dažādu veidu ietekmes uz nervu sistēmu. Acs zīlītes kontrolējošas sistēmas modelis paredz, ka nepārtraukta kognitīvas slodzes aktivizācija varētu izpausties kā acs kustību kodola (*n. III* vidussmadzenēs) līmenī notiekošas gaismas reakcijas bloķēšana (inhibīcija). *Steinhauer* ar kolēģiem pētīja zīlītes gaismas refleksa atbildes un ar to saistītos parametrus, mainot kognitīvās slodzes. Pētījumā tika novērotas divu veidu izpausmes: pirmkārt, toniskajā fāzē zīlītes diametrs palielinājās, paaugstinot kognitīvo slodzi līdz vieglai pakāpei, salīdzinot ar nulles kontroli, kas vispār nebija pielikta slodze, un, otrkārt, fāziskās gaismas reakcijas pakāpe bija nozīmīgi samazināta, un arī latence zīlītes saraušanās beigu posmā bija nozīmīgi kritusies pie augstas grūtības pakāpes kognitīvas slodzes, salīdzinot gan ar nulles kontroli, gan brīdi, kad pielikta vieglas pakāpes kognitīvā slodze. Šajā gaismas atbildes reakcijā un mehānismā ir iesaistīts vidussmadzenēs esošais Edingera-Vestfāla kodols, kurš ir motorais centrs zīlītes savilcējmuskulim. Dilstošās garozas ietekmes kavē (inhibē) Edingera-Vestfāla kompleksa aktivitāti. Tādējādi palielinātajai aktivizēšanai ir tonisks kavējošs efekts uz šo centru, bet tanī pat laikā augstākas apstrādes sarežģītības pakāpes rada atsevišķu kavēšanas komponenti, kas mijiedarbojas ar funkcionālu aktivizāciju šajā vidussmadzeņu atrašanās vietā. Autori ierosina, ka pārmaiņas gaismas stimula reakcijā kvantitatīvi reaģē uz informācijas apstrādes slodžu pārmaiņām. (5. attēls) (*Steinhauer et al.*, 2000)

Acs zīlītes izmērs būtiski samazinās novecojot, šī parādība tiek saistīta ar *senile miosis*. Tā saucamā vecuma vai senilā mioze rodas varavīksnenē esošā paplašinātājmuskuļa (*m. dilator pupillae*) deģenerācijas dēļ, kas izraisa ar novecošanos saistītu acs zīlītes izmēra lineāru samazinājumu. Tā kā simpātiskā nervu sistēma tiek saistīta ar funkciju aktivizēšanu, tiek uzskatīts, ka vecu cilvēku zīlītēm ar izziņas procesiem saistīta palielināšanās vāji korelē ar mentālās aktivitātes izmaiņām. Kopumā veciem cilvēkiem var novērot divas sakarības: pirmkārt, acs zīlīte palielinās kā pārmērīgas atmiņas slodzes vai jauna stimula rezultāts, otrkārt, novērojama mazāka diametra palielināšanās, salīdzinot ar jauniem cilvēkiem, kas ir *m. dilator pupillae* fizioloģisko īpašību pasliktināšanās izraisīts rezultāts. (*Van Gerven et al.*, 2004)

Tiek aprakstītas trīs iespējamās kognitīvās slodzes izsuktās acs zīlītes atbildes: 1) acs vidējā zīlītes izmēra palielināšanās laika intervālā pēc stimula, 2) maksimālā palielināšanās, kas ir lielākais izmēra pieaugums konkrētā laika intervālā, 3) vidējā latence, kas ir laiks, kas

pagājis no stimula sākuma un zīlītes maksimālās paplašināšanās parādīšanās. (Van Gerven et al., 2004)

## 1.2. Acs zīlītes mērīšana – pupillometrija

Pupillometrija ir neinvazīva acs zīlītes diametra izmaiņu novērošanas un ierakstīšanas tehnika. Tā ir sistēma un mērījuma metode, lai pētītu zīlītes izmēra mainīgumu laikā, nodrošinot objektīvu un neinvazīvu acs zīlītes izmēra mainības izmeklēšanu. (Jainta et al., 2010) Mūsdienās ir izveidotas sistēmas, kas uzņem gan monokulārus, gan binokulārus, ātrus un precīzus uzņēmumus vai ierakstus, kas parāda zīlītes izmēra maiņas dažādos tipus, kas ir sinhroni ar citiem bioloģiskajiem signāliem. Vairākums pupillometrijas metožu ir balstītas uz specializētām video sistēmām, kas ieraksta zīlītes izmēru infrasarkanajā gaismā. (Adrian, 2003)

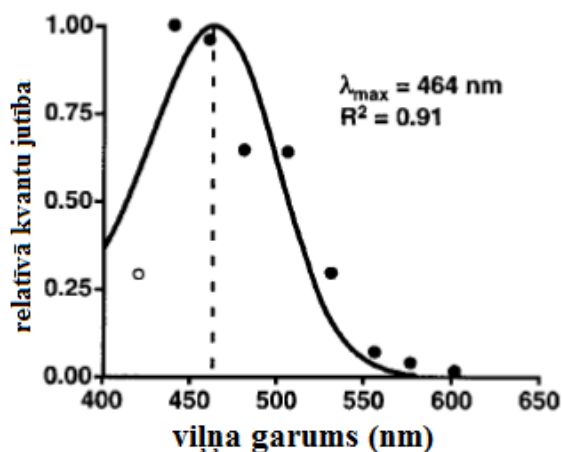
Kognitīvās darbības robežās ir pierādīts, ka pupillometrija ir uzticams un precīzs mentālās aktivitātes mērs. (Van Gerven et al., 2004)

## 1.2. Tīklenes ganglionārās šūnas

Cilvēka tīklene (*retina*) ir tikai 0.5 mm bieza, tomēr sastāv no desmit slāņiem, tai skaitā fotoreceptoru slāņa un ganglionāro šūnu slāņa. (Snell et al., 2006) Tīklenes ganglionārajām šūnām ir zema jutība uz gaismu. Atbildes latence ir proporcionāli apgriezta ar stimula intensitāti, un blāvas gaismas apstākļos tīklenes ganglionārajām šūnām nepieciešamas vairākas sekundes, lai sasniegtu maksimālo atbildi. Šī atbilde var arī turpināties vairākas minūtes pēc stimula pārtraukšanas. (Nilius et al., 2012)

Cilvēka tīklenē ir aptuveni 100 miljoni vāļišu un nūjiņu, taču melanopsīna šūnu ir salīdzinoši maz – daži tūkstoši. (Kennard et al., 2011) Zinātnieki tīklenes ganglionārajās šūnās noteica nūjiņu un vāļišu vadītās iekšējās atbildes un noteica šo šūnu aktivizējošo signālu ietekmi. Melanopsīna vadītajām tīklenes ganglionāro šūnu iekšējām atbildēm tika novērots augstāks izstarojums, precīzāk, tas bija lielāks par  $11 \log \text{ kvanti/cm}^2/\text{s}$ , un šo atbilžu spektrālā jutība bija tuva pigmenta darbības spektram ar maksimumu pie 483 nm. (7. attēls) Citos pētījumos, kuros novērotas cilvēku tīklenes, tika secināts, ka fotopiskos apstākļos vāļītes iedarbojas tikai uz sākotnēji ierosināto gaismas stimula radīto acs zīlītes saraušanos. Turpretim nūjiņu un iekšēji ierosināto tīklenes ganglionāro šūnu aktivizēšana pamatā visu laiku toniski ietekmē zīlītes saraušanos. (Kankipati et al., 2010)

Piemēram, *Brainard* un kolēģu pētījuma mērķis bija radīt melatonīna supresijas aktivitātes jutības līkni, kas palīdzētu izskaidrot fotoreceptorās sistēmas, kas regulē cilvēka epifizi. Melatonīna supresija jeb apslāpēšana tika radīta, lietojot specifisku viļņu garumus. (7. attēls) (Brainard et al., 2001)



7. attēls. Melatonīna supresijas aktivitātes jutības līkne (n=72). (Brainard et al., 2001)

Figure 7. The action spectrum for melatonin suppression in 72 healthy human subjects. (Brainard et al., 2001)

Nūjiņas, vāļītes un melanopsīns, kas satur iekšēji gaismjūtīgās tīklenes ganglionārās šūnas, darbojas saskaņoti, lai regulētu acs zīļītes diametra izmaiņas. Jāatzīst, ka ganglionāro šūnu īpašības ir atšķirīgas no vāļīšu un nūjiņu īpašībām, tai skaitā garākas latences un ilgstošas signalizēšanas pēc gaismas izslēgšanas. (Joyce et al., 2015)

Gaismjūtīgajām tīklenes ganglionārajām šūnām (RGC) ir divas primārās funkcijas: attēlu neveidojošās redzes veidošana un aferentācijas sūtīšana uz suprahiazmatiskā kodola (SCN) cirkadiānās periodikas vadību, kā arī acs zīļītes diametra maiņa caur olīvveida pretektālā kodola projekcijām. (Joyce et al., 2015)

Tīklenes ganglionārās šūnas tīklenes iekšējā slānī signalizē informāciju par gaismu caur iekšējo fotopigmentu melanopsīnu. Aprēķināts, ka šī atbilde ilgst no apmēram 1 min pie RGC slietkšņa līdz vairākiem simtu milisekunžu piesātināta starojuma laikā ar pīķi 3 sekunžu intervālā. Primātiem un cilvēkiem iekšējā melanopsīna ietekmi tieši novēro kā ilgstošu acs zīļītes saraušanos pēc gaismas izslēgšanas. RGC arīdzan saņem ārējus signālus no tīklenes vāļītēm un nūjiņām, līdz ar to iekšējo un ārējo signālu savienojums regulē acs zīļītes diametra izmaiņas. (Joyce et al., 2015)

Ir maz zināms par melanopsīnam pienākošās informācijas summāro efektu uz attēlu neveidojošās redzes procesiem zīļītes regulācijā, tieši pēc apgaismojuma izslēgšanas notiekošo zīļītes atbildes un konstrikcijas amplitūdu. Attēlu veidošajai redzei stimula starojums un ilgums ir proporcionāli apgriezti lielumi. Parādība novērojama laika periodā no aptuveni 75 vai 100 ms tumsas adaptācijas apstākļos. (Joyce et al., 2015)

Savukārt citu autoru rezultāti liecina, ka individuāla atšķirība zīļītes diametra (laukuma) izmaiņās pozitīvi korelē ar gaismas izraisīto melatonīna supresiju jeb nomākšanu un ka zīļītes

diametrs krēslas apstākļos ir indikators individuālai gaismas izraisītai melatonīna koncentrācijas izmaiņas supresijai. (Higuchi et al., 2008)

Zinātnieki pētīja peles, kurām iztrūka melanopsīna gēna, salīdzinot ar savvaļas tipa pelēm. Gan nūjiņu, gan vālišu sistēmai un melanopsīna ganglionārajām šūnām darbojās zīlīšu gaismas reflekss. Atbilde uz krēslas apgaismojumu bija līdzīgs gan pelēm ar melanopsīna šūnām, gan mutantiem. Taču tikai savvaļas tipa pelēm, kurām ir melatonīna šūnas, tika novērota zīlītes diametra samazināšanas augstas intensitātes gaismas apstākļos. Kā izrādās, zīlīšu atbildes var bloķēt ar ķīmisko savienojumu 2-aminoetoksidifenilborānu, kas ir iedarbīgs *in vitro* gaismjutīgo tīklenes ganglionāro šūnu inhibitors. (Kennard et al., 2011)

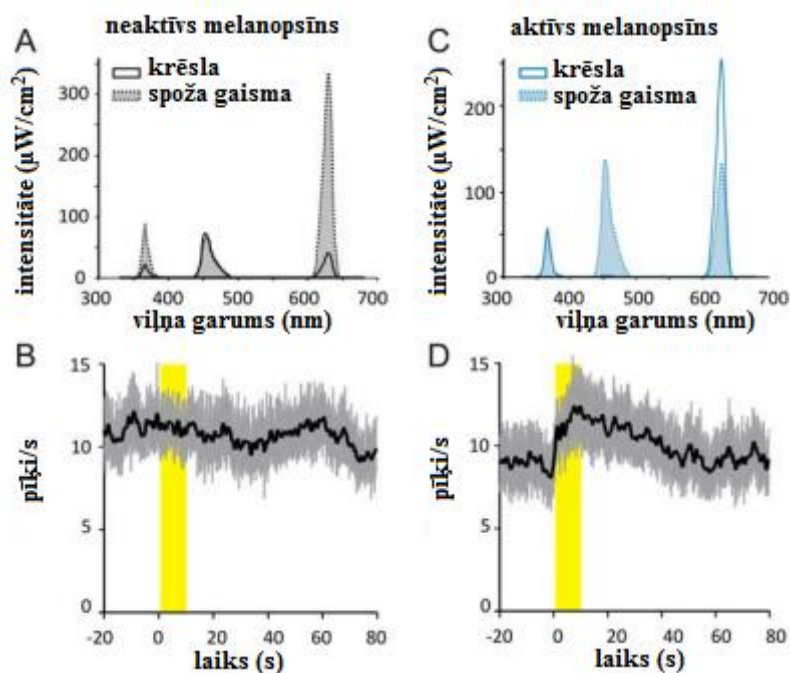
Lai novērtētu fotoreceptoru, arī ganglionāro šūnu nozīmīgumu, tiek veikti pētījumi ar neredzīgiem cilvēkiem. Zaidi ar kolēģiem savā pētījumā ierosināja, ka tīklenes ganglionārās šūnas/melatonīna vadītā sistēma varētu būt neskarta akliem cilvēkiem, un ar īso viļņu garumu stimuliem varētu atklāt neirālās uzvedības atbildes, turpretim klasisko fotoreceptoru trūkums (nūjiņas un vālītes) varētu novērst jebkādas atbildes uz vidējo viļņu garumu 555 nm gaismu. (Zaidi et al., 2007)

Ar kvantitatīvās pupillometrijas palīdzību, lietojot monohromatisko gaismu plašā viļņu garuma un starojuma ( $10^{11}$ - $10^{16}$  log fotoni/cm<sup>2</sup>/s) diapazonā ar 10 s eksponēcijas laiku, tika parādīts, ka neredzīgajam eksperimenta dalībniekam ir funkcionējoša pupillomotorā sistēma, kas reaģē uz spilgtu gaismu. Zīlītes saraušanās atbildes reakcija visspēcīgākā bija pie 476 nm. (Zaidi et al., 2007)

Tāpat iegūtie rezultāti parāda, ka zīlītes saraušanos vada tikai fotopigments (opsīns). Spektrālais maksimums pie 476 nm atbilst tīklenes ganglionāro šūnu darbības spektram gan cilvēkiem (483 nm), gan primātiem (482 nm). Cilvēku nūjiņām maksimālais viļņa garums ( $\lambda_{\max}$  ~498 nm), bet īso, vidējo un garo viļņu jutīgajām vālītēm  $\lambda_{\max}$  attiecīgi ir ~420, 534 un 563 nm. Secināts, ka eksperimenta dalībniekiem ir neskartas gan retinopretekstālās projekcijas, piemēram, zīlītes konstrikcijas, gan retinohipotalāmiskās projekcijas (diennakts ciklu regulēšana). Tāpat arī redzams, ka šīs atbildes uz gaismu tiek vadītas vienīgi ar īso gaismas viļņu garumu jutīgajām tīklenes ganglionārajām šūnām tiem cilvēkiem, kam nav nūjiņu un vālišu, līdz ar to nav nepieciešami gaismas sistēmas radīti signāli. (Zaidi et al., 2007)

Jaunākie atklājumi pētījumos ar primātiem parāda, ka tīklenes ganglionārās šūnas projicē uz dorsālo laterālo genikulāro ķermeni, – tā ir caur talāmu vadīta informācijas plūsma, kas nodrošina tiešus signālus uz redzes garozu. Pētījumā tika vērtēts spektrālais stimuluss, kas atšķiras izstarojumā, bet ne melanopsīna apgaismojuma stiprumā (spožā apgaismojumā novērotas 4 reizes lielāka kopējā fotonu plūsma nekā krēslas apstākļos). (8.A attēls). Tāpat arī vidējā standartnovirze neironu aktivitātei pārejā starp diviem stimuliem (8.B attēls). Tika

konstatēts, ka spektrāls stimuls, kas būtiski atšķiras melanopsīna apgaismojuma stiprumā (spožā apgaismojumā novērota 21 reizi lielāka kopējā fotonu plūsma nekā krēslas apstākļos), bet ne kopējā fotonu plūsmā (<1% atšķirība). Melanopsīns ir aktīvs. (8.C attēls) Visbeidzot tika noteikta vidējā standartnovirze neironu aktivitātei pārejā starp diviem stimuliem. Pāreja uz spožā apgaismojuma stāvokli ierosināja statistiski būtisku neironu aktivitātes palielinājumu ( $P=0.014$ ,  $n=131$ ) (8.D attēls). (Zaidi et al., 2007)

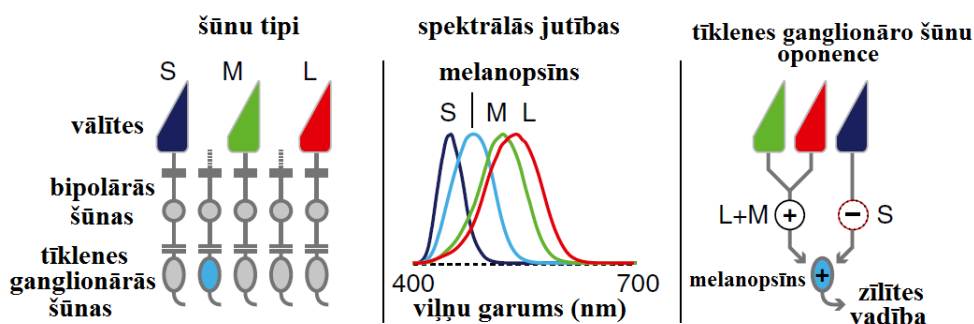


8. attēls. Melanopsīna jutības ietekme uz olīvu pretektālo kodolu atbildi spektrāliem stimuliem pelēm, kam nav nūjiņu un vāļišu. Dzeltēnā josla C un D attēlos norāda spoža apgaismojuma stimulu, pārējā laikā ir krēslas apstākļi. (Brown et al., 2013)

Figure 8. The melanopic sensitivity function accounts for olivary pretecal nucleus responses to spectrally modulated stimuli in rodless/coneless mice. Yellow bar in C & D indicates presentation of the “bright” stimulus, with dim stimulus present at all other times. (Brown et al., 2013)

Neirāli-anatomiskie atklājumi ar grauzējiem parāda, ka melanopsīnu saturošās ganglionārās šūnas projicējas uz daudziem kodoliem, kas saņem signālus no tīklenes, tai skaitā olīvu-pretektālajiem kodoliem, kas ir iesaistīti zīlītes saraušanās atbildes reakcijā. (8. attēls) (Zaidi et al., 2007)

Savukārt cilvēka redzes uztvere dienas gaismas apstākļos rodas no signāliem, ko rada trīs vāļišu fotoreceptoru klases – S, M un L tipa vāļītes jeb attiecīgi īso, vidējo un garo redzamās gaismas viļņu jutīgās vāļītes. (9. attēls) (Spitschan et al., 2014)

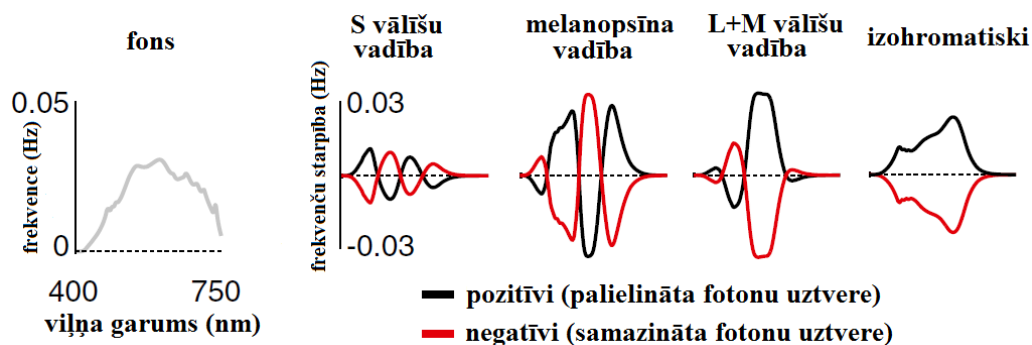


9. attēls Triju tipu vālīšu, bipolāro šūnu un ganglionāro šūnu hierarhija cilvēka tīklenē. (Spitschan et al., 2014)

Figure 9. Hierarchy of the L, M, and S cones, bipolar cells and melanopsin-containing retinal ganglion cells in the human retina. (Spitschan et al., 2014)

Visas L, M un S tipa vālītes ar melanopsīnu saturošajām tīklenes ganglionārajām šūnām pielāgo savu atbildi dienas mainīgajos gaismas apstākļos. Vālīšu spektrālā jutība ir redzamās gaismas diapazonā no aptuveni 400 nm līdz 700 nm. Melanopsīnam spektrālā jutība ir uz 480 nm, kas ir diapazonā starp S un M tipa vālīšu jutību. Tīklenes ganglionāro šūnu fizioloģiskie mērījumi parāda, ka L un M tipa vālītes vada uzbudinošus signālus uz melanopsīnu saturošajām ganglionārajām šūnām un tālāk uz acs zīlītes vadības centru, turpretim S tipa vālītes vada kavējošus signālus. (9. attēls, 10. attēls) (Spitschan et al., 2014)

Pētījumos ar primātu tīklenēm atklāts, ka L un M tipa vālīšu signāli darbojas kopā ar melanopsīnu, lai izsauktu tīklenes ganglionāro šūnu atbildes. Savukārt īso gaismas viļņu jutīgajām jeb S tipa vālītēm ir kavējoša ietekme. (10. attēls) (Spitschan et al., 2014)



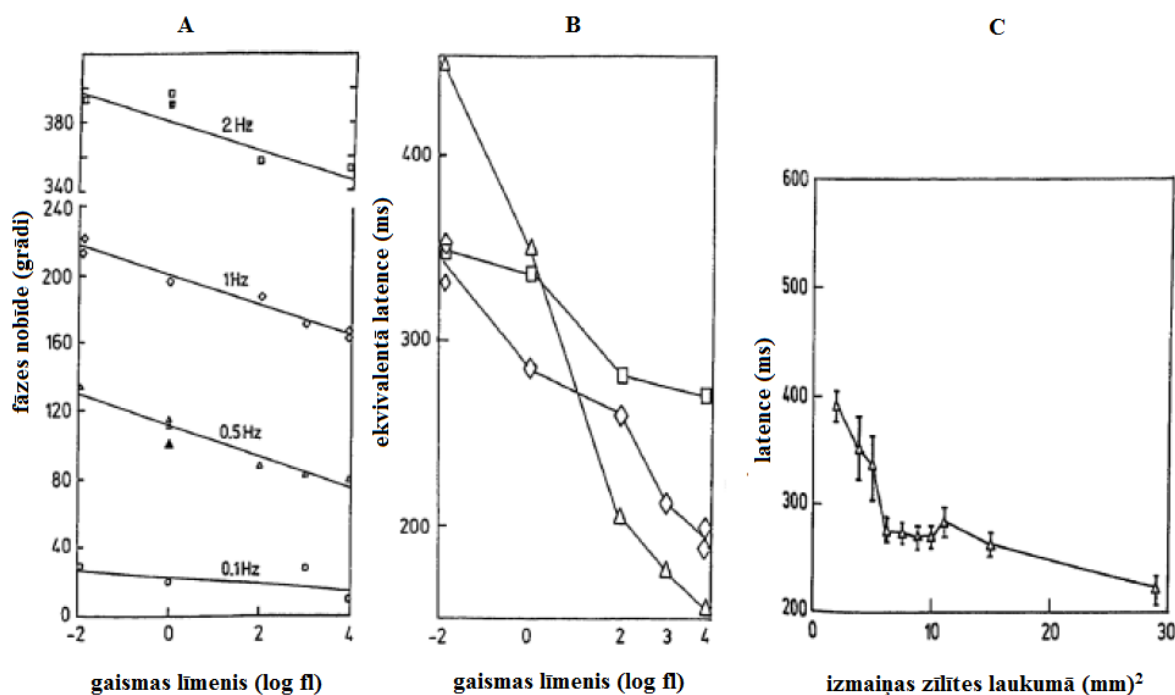
10. attēls. Fotoreceptoru vadītās modulācijas. Līdzsvarotas izmaiņas redzamās gaismas spektrā, kas ir tuvu fona spektram, izolē ierosinātos fotoreceptorus. (Spitschan et al., 2014)

Figure 10. Photoreceptor-directed modulations. Balanced changes in the spectrum of light around a background spectrum nominally isolate targeted photoreceptors. (Spitschan et al., 2014)

Atsevišķas modulācijas jeb signāla izmaiņas, kas mainīja gan spilgtumu, gan frekvenci, tika sagatavotas melanopsīnam, S tipa vāļītēm un L+M tipa vāļītēm kopā. Izohromatiskas signāla izmaiņas tika panāktas, apvienojot visu veidu fotoreceptoru: melanopsīns + S + M + L tipa vāļītes. (10. attēls) (Spitschan et al., 2014)

### 1.3. Fotoreceptoru gaismas jutība

Cilvēka fotoreceptoriem, tieši vāļītēm, ir plašs spilgtuma uztveršanas diapazons. Tas svārstās no mezopiskiem jeb krēslas ( $10^{-3}$  līdz  $10 \text{ cd/m}^2$ ) līdz fotopiskiem jeb gaismas ( $10$  līdz  $>10^{16} \text{ cd/m}^2$ ) apstākļiem, pielāgojoties dabiskās gaismas intensitātei no zvaigžņu līdz saules izstarotajai gaismai. Pielāgošanās spējas tiek panāktas, kombinējot gan lēnu, gan ātru gaismas intensitātes pieauguma noteikšanu, tādējādi nodrošinot atbildi pat uz neliela kontrasta izmaiņām uz jebkura spilgtuma fona. (10. attēls) (Van Hateren et al., 2007)



11. attēls. Fāzes nobīde un ekvivalentā latence zīlītes atbildei uz sinusoidālu gaismas stimulu tiek samazināta, palielinot vidējo gaismas līmeni. A) Fāzes nobīde; B) Atbilstošā ekvivalentā latence; C) Acu zīlīšu gaismas atbildes reakcijas kā atbildes lieluma funkcija. Jāņem vērā, ka gaismas apstākļos zīlītes atbildes reakcijas laikā atbildes lielums palielinās, pieaugot stimula lielumam. (Zangemeister et al., 2009)

Figure 11. Phase lag and equivalent latency of pupil responses to sinusoidal light stimuli are reduced by increased mean light level. A) phase lag data; B) corresponding equivalent latencies computed from phase lag; C) latency of PLR as function of response size. Note that in the light-pupil responses the response size increases with increasing stimulus size. (Zangemeister et al., 2009)

Normālai acs zīlītei cauri izejošais gaismas daudzums, kas sasniedz tīklieni dažādā frekvenču diapazonā, samazina fāzu nobīdi un ekvivalento latenci atbilstošajai zīlītes atbildei. (10. attēls) (Zangemeister et al., 2009)

Autori salīdzināja frekvenču sadalījumu laikā, izmantojot Furjē transformācijas analīzi, un parādīja milzīgu zemo frekvenču mainīguma vai nepastāvības samazinājumu diabēta (*diabetes mellitus*) pacientiem fāziskā zīlītes refleksa laikā. Tāpat arī tika atklāts statistiski nozīmīgāks augsto frekvenču sastāvs gan acs zīlītes gaismas atbildes, gan saraušanās un izplešanās laikā. Šo parādību varētu skaidrot ar lielāku varavīksnenes muskuļu mazkustīgumu, ko radījuši gan biomehāniskās, gan neirālās vadības cēloņi. (Zangemeister et al., 2009)

Trolands (*td*) ir mērvienība, ar ko mēra uz tīklenes krītošo apgaismojumu, un tas tiek definēts kā apgaismojuma (kandelas uz kvadrātmetru ( $\text{cd}/\text{m}^2$ )) un zīlītes laukuma ( $\text{mm}^2$ ) reizinājums. Vālīšu modelis tiek balstīts uz agrāk pētītiem un radītiem modeļiem, kas veidoti, aprakstot makaku horizontālās šūnas diapazonā no 1 līdz 1000 td. (Van Hateren et al., 2007)

Uz tīklieni krītošais apgaismojums ir atkarīgs no vairākiem faktoriem, tai skaitā, stimula spilgtumu, zīlītes diametrs, acs izmērs un optiskās vides gaismas caurlaidība. To aprēķina pēc formulas  $E_r = \left(\frac{A_p}{d^2}\right) \tau_l L$ , kur  $E_r$  – uz tīklieni krītošais apgaismojums (*td*),  $A_p$  – zīlītes laukums ( $\text{mm}^2$ ),  $d$  – acs aizmugurējais nodālais garums (pieņemts, ka 12.5 mm),  $\tau_l$  – optiskās vides caurlaidība pie noteikta viļņa garuma,  $L$  – stimula spilgtums ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ). (Mactier et al., 2008)

## 2. MATERIĀLI UN METODES

Pētījums tika veikts Latvijas Universitātes Cietvielu fizikas institūtā (LU CFI), Redzes uztveres laboratorijā, Rīgā.

### 2.1. Dalībnieki

Pētījumā piedalījās 20 dalībnieki, tai skaitā, 16 sievietes un 4 vīrieši vecumā no 20 līdz 25 gadiem. Visi brīvprātīgie eksperimenta dalībnieki bija ar apmierinošu veselības stāvokli. Dalībnieki bija ar normālu (emetropi) vai izkorigētu redzes asumu, ja lietoja kontaktlēcas. Nevienam no eksperimenta dalībniekiem nebija neiroloģisku vai patoloģisku saslimšanu. Visas eksperimentālās procedūras noritēja saskaņā ar Helsinku deklarācijas norādījumiem.

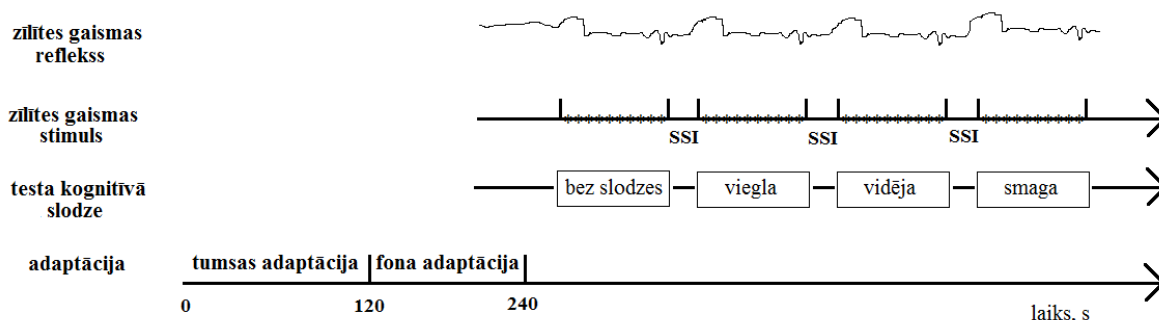
Katrs no pētījuma dalībniekiem pirms eksperimenta uzsākšanas aizpildīja veidlapu, apstiprinot, ka viņam vai viņai nav nepieciešama redzes korekcija (ir pieļaujams, ka dalībnieks lieto kontaktlēcas precīzai redzes korekcijai), nav cukura diabēta (*diabetes mellitus*), neiroloģisku saslimšanu, izteiktas noguruma sajūtas un iedzimts vai iegūts krāsu redzes defekts.

### 2.2. Metode

Eksperiments sastāv no divām daļām: 1) zīlītes dinamikas ieraksta atkarībā no konstanta stimula ar papildus pievienotas testa kognitīvas slodzes; 2) zīlītes dinamikas ieraksta atkarībā no stimula frekvences izmaiņām, papildus pievienojot kognitīvu slodzi jeb ar domāšanu saistītu uzdevuma veikšanu.

Eksperimenta pirmā daļa ietver četrus dažādus posmus: tumsas adaptācija (2 min), fona adaptācija (2 min), stimulš (8 s) un starpstimulu intervāls (SSI) (5 s). Tumsas adaptācijas laikā pētījuma dalībnieks 2 minūšu garumā pavada mākslīgi aptumšotā telpā, lai izvairītos no blakus faktoriem, kas ietekmējuši fotoreceptoru aktivitāti, tādējādi izvairītos no nevēlamiem efektiem. Savukārt fona adaptācijas laikā, kas ir 2 minūšu ilgs periods, kad noris auksti baltas gaismas (6500 K) spīdēšana, fotoreceptori tiek adaptēti gaismas apstākļiem. Stimulš ir 8 sekunžu ilgs periods, kurā spīd stabila jeb taisnstūrveida stimula vai sinusoidāla stimula zilās gaismas diode (456 nm) ar izvēlētu frekvenci, proti, 0.25 Hz vai 0.50 Hz. Zilās gaismas stimulš aktivizē melanopsīnu, kam ir nozīmīga loma acs zīlītes diametra regulācijā (Gamlin et al., 2007). Zināms, ka astoņas sekundes ir pietiekami ilgs laiks, lai eksperimenta dalībnieks spētu noturēt skatu uz konkrēto punktu, nemirkšķinot acis, jo šajā laika periodā vēl nav saplīsusi asaru plēvīte, kas uztur radzenes mitrumu. Visbeidzot ir starpstimulu intervāls (SSI). Šajā laikā, kas ilgst 5 sekundes, pētījuma dalībnieks nenoslogo redzes sistēmu un drīkst

aizvērt vai mirkšķināt acs plakstiņus, lai atjaunotu asaru plēvīti uz radzenes, un spētu turpināt eksperimentu. Kopumā katrai frekvencei ir 10 cikli, ietverot stimulus un starpstimulu intervālus. (11. attēls)



11. attēls. Eksperimenta protokols. Eksperimenta mēģinājumu sastāvs: A) tumsas adaptācija (2 min), fona adaptācija (2 min), nepārtraukts, taisnstūrveida vai sinusoidāla zilās gaismas (456 nm) diodes stimulss (8 s), SSI – starpstimulu intervāls (5 s) – nepārtraukts auksti baltas gaismas stimulss. Katram posmam paralēli tiek pielikta kognitīvā slodze.

Figure 11. Experimental design in details. The experimental trials consist of: A) dark adaptation (2 min) under dark conditions, background adaptation (2 min) under cool white light emitting diode (LED), constant, square pulse or sinusoidal blue LED (456 nm) stimulus (8 s), SSI – inter-stimulus interval (5 s) constant stimulus under cool white LED.

Otrajā eksperimenta daļā paralēli stimulam tika pielikta kognitīvā slodze, precīzāk, pētījuma dalībniekam bija jāveic triju dažādu grūtības pakāpju ar domāšanu saistītu uzdevumu veikšana (Qu, 2014) pie konstanta stimula vai dažādām frekvencēm: 1) vieglas pakāpes kognitīvā slodze – ciparu skaitīšana galvā dilstošā kārtībā ik pa viens (piemēram, 400, 399, 398 utt.); 2) vidējas pakāpes kognitīvā slodze – ciparu skaitīšana galvā dilstošā kārtībā ik pa trim (piemēram, 400, 397, 394 utt.); 3) smagas pakāpes kognitīvā slodze – ciparu skaitīšana dilstošā secībā ik pa septiņi (piemēram, 400, 393, 386 utt.). Tā kā sejas muskuļu kustības nav pieļaujamas, dalībnieks paralēli rakstīja skaitīšanas ceļā iegūtos skaitļus uz iepriekš sagatavotas baltas lapas, lai pārbaudītu, vai viņš vai viņa izpilda eksperimenta nosacījumus.

Pētījuma dalībniekam pirms eksperimenta uzsākšanas tika dotas norādes, ka brīdī, kad ir zilās gaismas stimulss, tad ir jāskatās uz punktu virs kameras objektīva, acis nemirkšķinot, savukārt brīdī, kad ir baltas gaismas stimulss, tad var mirkšķināt vai aizvērt acis. Mērījuma brīdī ir jāizvairās no kustībām, jo īpaši sejas muskuļu, lai nemainītu kameras fokusa attālumu.

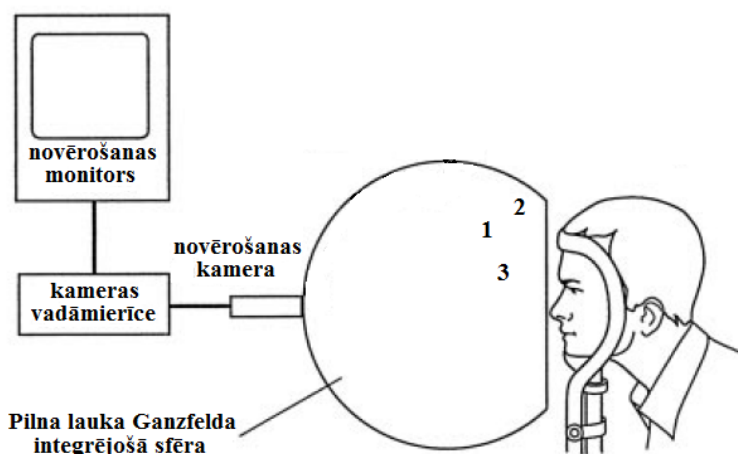
Pirms eksperimenta uzsākšanas katrs no dalībniekiem ērti iekārtojās krēslā un novietoja savu zodu uz paliktņa, savukārt eksperimenta veicējs pielāgoja kameru, lai mērījuma brīdī tā būtu fokusā un varētu nomērīt acs zilītes virsmas laukuma izmaiņas laikā atkarībā no gaismas stimula izmaiņām.

Acu zīlīšu dinamikas ieraksti tika veikti monokulāri, precīzāk, labajai acij. Ierakstīšanas biežums bija 60 kadri/sekundē.

### 2.3. Aparatūra

Iepriekš tika sagatavota pilna lauka (Ganzfelda) integrējošā sfēra, kuras diametrs ir 0.35 m. Tās iekšējā virsma tika nokrāsota baltā neluminiscējošā krāsā, lai vienmērīgi atstarotu visu krāsu stimulus. Integrējošās sfēras sienā tika izurbts caurums, kurā ievietota kamera. Kameras fokuss tika regulēts ar pielāgotu kameras vadāmierīci. (12. attēls)

Pie Ganzfelda integrējošās sfēras iekšējās virsmas tika piestiprinātas triju veidu gaismu izstarojošās diodes (LED): zilas gaismas (456 nm), baltas gaismas (6500 K) un infrasarkanās gaismas (850 nm). Infrasarkanā diode tika izmantota, lai ar infrasarkanā filtra kameru varētu uztvert acs zīlītes laukuma izmaiņas. Tā bija ieslēgta visu mērījuma laiku. (12. attēls)



12. attēls. Eksperimentālā iekārta mērījumu veikšanai. Pilna lauka integrējošās sfēras iekšpusē ir iestiprinātas gaismas diodes: 1 – zilas gaismas diode (456 nm), 2 – infrasarkanās gaismas diode (850 nm), 3 – auksti baltas gaismas diode.

Figure 12. The experimental electronic, optic, and Ganzfeld dome exposure array. Three kinds of light emitting diodes (LED) were fixed into the Ganzfeld dome: 1 – blue LED (456 nm), 2 – infrared LEDs (850 nm), 3 – cool white LED.

Arvien biežāk ikdienā, kā arī zinātnē, tai skaitā redzes zinātnē, kā gaismas avots tiek izmantotas gaismu izstarojošās diodes jeb LED. Tas saistīts ar nelielajām lietošanas izmaksām un plašajām iespējām nodrošināt gaismas stimulus redzes zinātnes pētījumos. (Milone et al., 2013) Ar LED var nodrošināt vieglāk regulējamu gaismas raksturlielumu vadību. Tāpat gaismu izstarojošās diodes ir tikpat kā monohromatiskas gaismas avots, kuram joslas platums

pie 50% gaismas intensitātes ir 20 līdz 30 nm, tādējādi nodrošinot tikpat kā lineāras gaismas izstarošanu (Teikari, 2012). (1. tabula)

1. tabula.

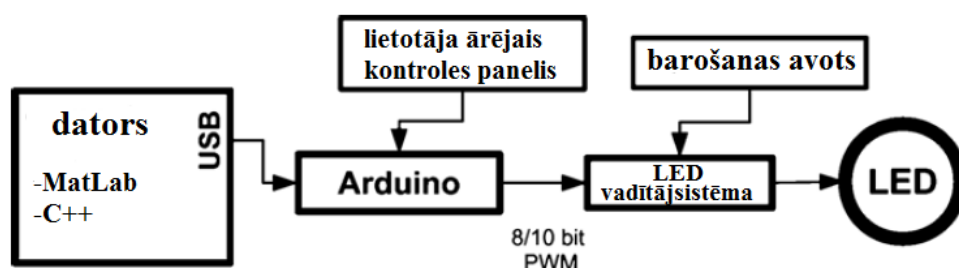
Eksperimentā izmantoto LED viļņu garums un apgaismojums.

Table 1.

Wavelength and illumination of LEDs used in the experiment.

Nr.p.k.	Gaisma	Apgaismojums, $\text{cd/m}^2$	Viļņu garums, nm
1	Zila	10.22	456
2	Balta	10.32	-
3	Infrasarkana	-	850

Kā LED vadības sistēma tiek izmantota atvērtā koda elektronikas prototipēšanas platforma *Arduino*, kas ir balstīta uz viegli vadāmu un viegli lietojamu aparatūru un programmatūru. *Arduino* tiek izmantots līdzīgā veidā kā datu iegūšanas ierīces, lai nolasītu analogos/ciparu signālus no ārējiem slēdžiem, pogām vai sensoriem, tādējādi darbojoties neatkarīgi no LED vadītājsistēmas (Teikari, 2012). (13. attēls)

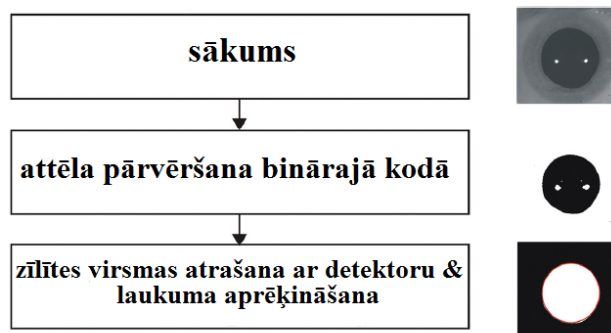


13. attēls. Gaismu izstarojošās diodes vadītājsistēmas blokshēma. PWM (pulse-width modulation) - impulsu platuma modulācija. (Teikari, 2012)

Figure 13. Block diagram of LED driving scheme. Simple scheme of computer-controlled LED driving with *Arduino*. PWM - pulse-width modulation. (Teikari, 2012)

#### 2.4. Acs zīlītes dinamikas ieraksts

Acs zīlītes dinamikas ierakstu nodrošināja speciāls algoritms, kas ietvēra acs zīlītes attēla pārvēršanu binārajā kodā, acs zīlītes virsmas atrašanu ar malas detektoru un galu galā zīlītes laukuma aprēķināšanu. Attēla apstrādes modulis analizēja ierakstīto attēlu secību un novērtēja nomērītos acs zīlītes parametrus kadru pēc kadra ar biežumu 60 kadri/sekundē labajai acij. (14. attēls)

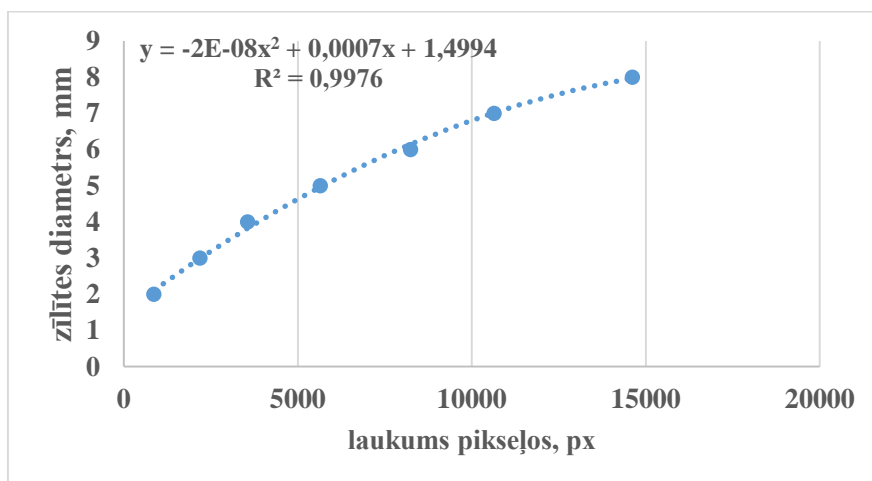


14. attēls. Zīlītes izmēru analizējošais algoritms.

Figure 14. Flowchart of the pupil image analysis algorithm.

Algoritms nolasīja pikselus jeb vismazākos attēla elementus, lai aprēķinātu zīlītes formas raksturlielumus. Brīdī, kad digitālais attēls tika pārvērsts binārajā attēlā (kodā), tika noņemti iespējamie artefakti, tai skaitā atspīdumi, kas radās procedūras laikā. Pēc tam ar malas detektoru tika atrastas acs zīlītes virsmas malas koordinātas un noteikts tās laukums. Tālākajos aprēķinos acs zīlītes diametra aprēķināšanai tika izmantots otrās pakāpes kvadrātvienādojums  $y = -2E - 08x^2 + 0.0007x + 1.499$ , kur  $x$  - acs zīlītes laukums (px).

(15. attēls)



15. attēls. Kvadrātvienādojums acs zīlītes diametra aprēķināšanai.

Figure 15. Quadratic equation for calculating the diameter of the eye pupil.

## 1.2. Statistika

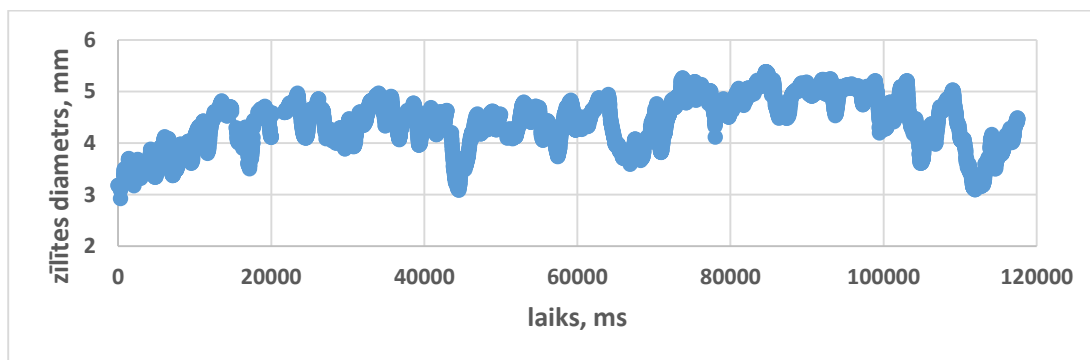
Lai novērtētu rezultātu statistisko ticamību starp divām savstarpēji atkarīgām grupām, iegūtos rezultātus analizēja ar t-testu.

### 3. REZULTĀTI UN DISKUSIJA

Maģistra darba ietvaros autore analizē auksti baltai gaismai adaptētus zīlīšu refleksa parametrus, tai skaitā, sašaurināšanās latentu periodu, amplitūdu un laika konstanti stabila apgaismojuma apstākļos ar dažādas intensitātes testa kognitīvo slodzi vai bez tās. Tāpat tiek analizēta sinusoidālas stimulācijas ietekme uz zīlītes reflektorās reakcijas laika aizkavi un amplitūdas svārstībām. Tālākajā apstrādē tika izmantoti 15 eksperimenta dalībnieku dati.

#### 3.1. Baltai gaismai adaptētas zīlītes diametra fluktuācijas

Pētījuma gaitā tika analizētas auksti baltai gaismai adaptētas acs zīlītes diametra svārstības noturīga apgaismojuma ( $10.32 \text{ cd/m}^2$ ) apstākļos. Novērojamas individuāli ļoti atšķirīgas amplitūdas, iespējams, tās ir atkarīgas no apkārtējās vides apstākļiem. (16. attēls)



16. attēls. Auksti baltai gaismai ( $10.32 \text{ cd/m}^2$ ) adaptētas zīlītes diametra spontānās fluktuācijas.

Figure 16. Eye pupillary diameter spontaneous fluctuations adapted under cool white light ( $10.32 \text{ cd/m}^2$ ) conditions.

Analizējot iegūtos datus, bija redzams, ka acs zīlītes diametrs bija laikā mainīgs stabila apgaismojuma apstākļos, precīzāk, 15 pētījuma dalībnieku izlasei zīlītes minimālais diametrs svārstījās robežās no 2.06 mm līdz 3.49 mm, vidēji sasniedzot  $2.68 \pm 0.51$  mm, savukārt maksimālais diametrs starp pētījuma dalībniekiem bija intervālā no 3.72 mm līdz 5.83 mm, vidēji sasniedzot  $4.84 \pm 0.62$  mm. Acs zīlītes diametra amplitūda variēja no 1.37 mm līdz 5.14 mm, vidēji sasniedzot  $2.25 \pm 0.11$  mm. (16. attēls)

### 3.2. Zīlītes diametra adaptācija dažādas grūtības kognitīvai slodzei

Autore salīdzināja auksti baltai gaismai adaptētas zīlītes diametrus situācijās, kad uzsākta testa kognitīvā slodze, bet vēl netika doti stimuli refleksa izsaukšanai. Otrā tabula ilustrē to, ka, pieaugot slodzes smagumam, auksti baltā gaismā adaptētam zīlītes diametram ir tendence sašaurināties.

2. tabula

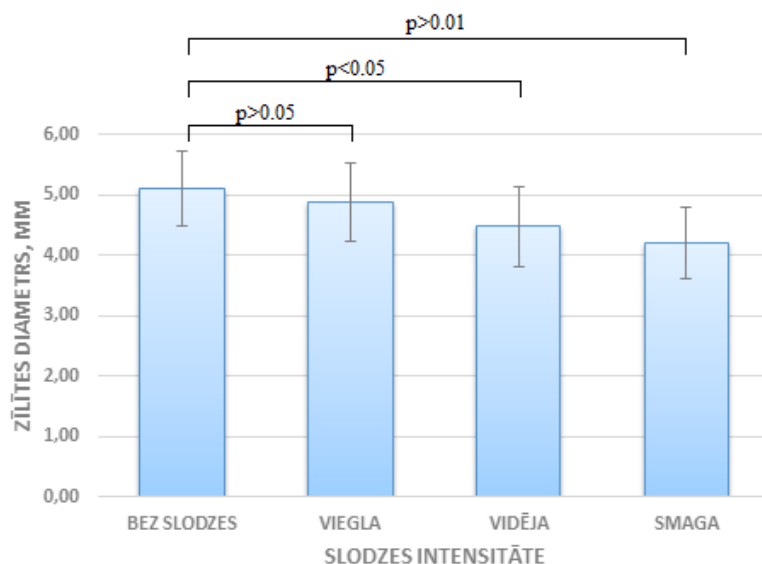
Baltai gaismai adaptētas zīlītes diametra atkarība no kognitīvas slodzes.

Table 2

Dependence of the cognitive load to the pupillary diameter adapted under cool white light.

Zīlītes diametrs, mm	Slodzes intensitāte			
	bez slodzes	viegla	vidēja	smaga
	5.11±0.61	4.87±0.64	4.47±0.65	4.20±0.59

Rezultāti uzrāda, ka, palielinoties testa kognitīvas slodzes intensitātei, zīlītes diametrs sašaurinās, respektīvi, situācijā, kad nav veikts ar domāšanu saistīts uzdevums, zīlītes diametrs svārstās 5.11±0.61 mm apmērā, savukārt pie vieglas grūtības pakāpes slodzes novērojams 4.87±0.64 mm mazs diametrs, kas turpina sarauties pie vidējas un smagas grūtības pakāpes testa kognitīvas slodzes, attiecīgi līdz 4.47±0.65 mm un 4.20±0.59 mm. (2. tabula, 17. attēls)



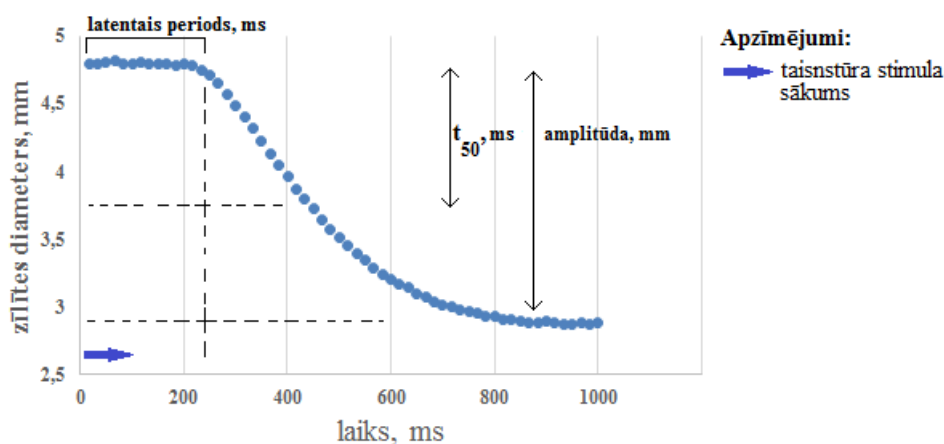
17. attēls. Kognitīvas slodzes ietekme uz baltai gaismai adaptētas zīlītes diametru.

Figure 17. Impact of cognitive load on pupillary diameter adapted under cool white light.

Veicot statistisko analīzi, tika uzrādīts, ka starp zīlītes diametru tad, kad nav slodzes un kad pielikta vieglas grūtības pakāpes testa kognitīvā slodze, nepastāv statistiski ticamas atšķirības ( $p > 0.05$ ). Savukārt statistiski būtiska atšķirība parādās, salīdzinot zīlītes diametru pie vidējas slodzes, proti,  $p < 0.05$ ,  $p = 0.013$ . Arīdzan baltai gaismai adaptētas zīlītes diametra lielums pie smagas testa kognitīvās slodzes uzrāda statistiski ticamu rezultātu, respektīvi,  $p < 0.01$ ,  $p = 0.00047$ . Līdz ar to smagas pakāpes kognitīvajai slodzei ir būtiska ietekme uz zīlītes diametra sašaurināšanos. (17. attēls)

### 3.3. Zīlītes gaismas refleksa parametri

Acs zīlītes laukuma mērījumi, no kuriem vēlāk aprēķināts diametrs, veikti ar biežumu 60 reizes sekundē, tātad ik pa 16.67 milisekundēm (ms). Kā zināms, konstanta jeb taisnstūra stimula izraisīto zīlīšu gaismas reakciju raksturo tādi parametri kā latentais periods, amplitūda un zīlītes sašaurināšanās ātrums, kuru savukārt raksturo laiks, kurā zīlīte sašaurinājās par 50% no sava sākotnējā diametra ( $t_{50\%}$ , ms). Šie parametri analizēti 15 pētījuma dalībniekiem. (18. attēls)



18. attēls. Zīlītes gaismas reakciju raksturojošie parametri: latentais periods, saraušanās ātrums, amplitūda.

Figure 18. Parameters describing pupillary light reflex: latency, time delay, amplitude.

Pētījuma gaitā tiek analizētas zīlītes gaismas refleksa parametru, respektīvi, latentā perioda, amplitūdas un sašaurināšanās ātruma, atkarība no stabilas auksti baltas gaismas. (3. tabula)

Zīlītes gaismas refleksa parametru vidējās vērtības (n=15) bez kognitīvas slodzes ietekmes.

Average values (n=15) of pupillary light reflex parameters without cognitive load effects.

	Latentais periods, ms	Amplitūda, mm	t <sub>50%</sub> , ms
Vidējā vērtība	203.82 ± 30.21	1.04 ± 0.33	206.58 ± 49.97
Maksimālā vērtība	227.82 ± 47.96	1.48 ± 0.48	262.55 ± 78.98
Minimālā vērtība	187.54 ± 14.44	0.44 ± 0.13	122.25 ± 14.44

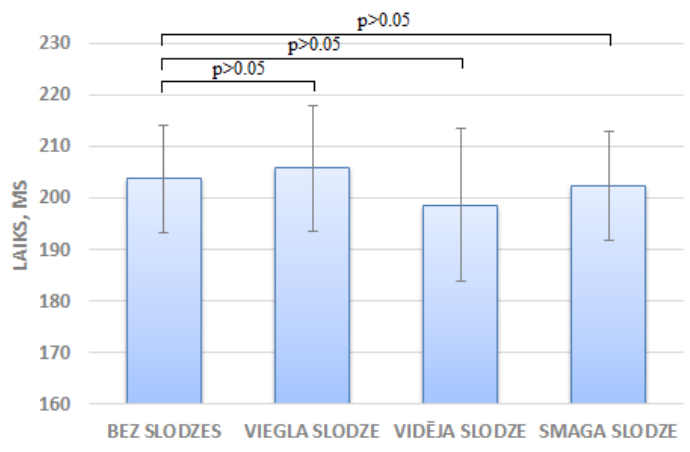
Noskaidrots, ka latentā perioda minimālais laiks 15 eksperimenta dalībnieku vidū bijis 187.54 ± 14.44 ms, savukārt maksimālais laiks, lai aizsāktos reakcija, – 227.82 ± 47.96 ms. Vidējais latentais periods ir 203.82 ± 30.21 ms. Savukārt amplitūdas vidējā vērtība ir 1.04 ± 0.33 mm, tās minimālais diametrs ir 0.44 ± 0.13 mm, bet maksimālais diametrs ir 1.48 ± 0.48 mm. Arīdzan, vērtējot zīlītes sašaurināšanās ātrumu, kuru raksturo laiks, kurā zīlītes sašaurinājās par 50% no sava sākotnējā diametra (t<sub>50%</sub>, ms). Noteikts, ka minimālais t<sub>50%</sub> ilgums ir 122.25 ± 14.44 ms, bet maksimālais ilgums ir 262.55 ± 78.98 ms. Vidējais ilgums sašaurināšanās ātrumam ir 206.58 ± 49.97 ms. ( 3. tabula)

### 3.4. Kognitīvas slodzes ietekme uz zīlīšu refleksa parametriem

#### 3.4.1. Zīlīšu refleksa latentais periods

Lai izvērtētu dažādu grūtības pakāpju (viegla, vidēja un smaga) testa kognitīvo slodžu ietekmi uz acs zīlīšu refleksa latentu periodu, respektīvi, novērtētu laika periodu, kas ilgst no brīža, kad ieslēgts gaismas stimul un kad aizsākas acs zīlītes atbildes reakcija. Tika noskaidroti un salīdzināti latentie periodi 15 pētījuma dalībniekiem, pildot vieglas, vidējas un smagas grūtības pakāpes ar domāšanu saistītus testa uzdevumus, ieslēdzot zilu konstantu (456 nm) stimulu. (19. attēls)

Latentais periods pieauga, veicot vieglas pakāpes testa kognitīvo slodzi, precīzāk, skaitot dilstošā secībā ik pa viens, pētījuma dalībniekiem latentais periods bija 205.83 ± 12.14 ms, un tas bija robežās no 177.81 līdz 229.68 ms. Tomēr, veicot vidējas pakāpes testa kognitīvo slodzi (skaitot dilstošā kārtībā ik pa trīs), latentā perioda vidējais laiks saruka līdz 198.64 ± 14.84 ms, un tas bija diapazonā no 161.14 līdz 220.04 ms. Arī smagas grūtības pakāpes testa kognitīvā slodzes ietekmē latence bija samazinājusies līdz vidēji 202.45 ± 10.60 ms, tā svārstījās robežās no 183.37 līdz 216.71 ms. (19. attēls)



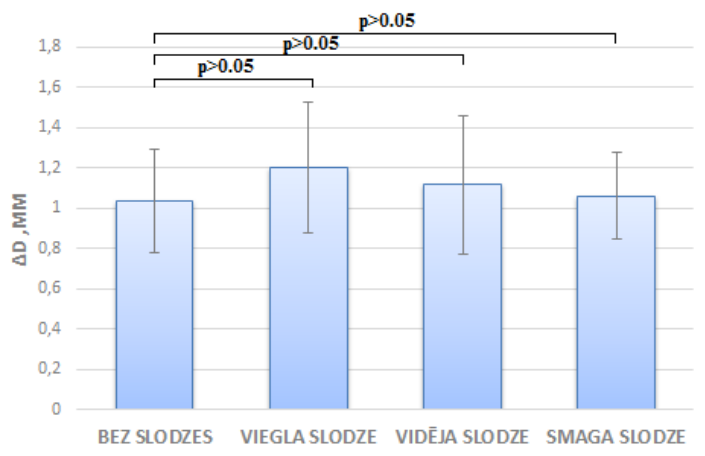
19. attēls. Vidējais latents periods pētījuma dalībniekiem (n=15) dažādām testa kognitīvajām slodzēm pie 456 nm taisnstūra stimula.

Figure 19. Average latencies for all subjects (n=15) in different kind of cognitive loads under 456 nm square pulse stimulus.

Rezultātu statistiskā analīze parāda, ka visai datu kopai (n=15) nepastāv statistiski būtiskas atšķirības ( $p > 0.05$ ) starp latento periodu garumiem, salīdzinot reakcijas atbildes, kad nav pielikta slodze un kad pielikta vieglas, vidējas vai smagas grūtības pakāpes testa kognitīvā slodze. (19. attēls)

### 3.4.2. Zīlīšu refleksa amplitūda

Tāpat pētījuma ietvaros tika analizēta acs zīlīšu refleksa izraisītās atbildes reakcijas vidējās amplitūdas atkarība no dažādu grūtības pakāpju testa kognitīvajām slodzēm.



20. Attēls. Vidējās amplitūdas pētījuma dalībniekiem (n=15) dažādām testa kognitīvajām slodzēm pie 456 nm konstanta stimula.

Figure 20. Average amplitudes for all subjects (n=15) in different kind of cognitive loads under 456 nm square pulse stimulus.

. Proti, tika analizētas diametra svārstības nemainīga viļņu garuma (456 nm) un apgaismojuma ( $10.22 \text{ cd/m}^2$ ) apstākļos, nosakot starpību starp zīlīšu diametra minimālajām un maksimālajām vērtībām, pieliekot testa kognitīvo slodzi taisnstūra stimula apstākļos. (20. attēls)

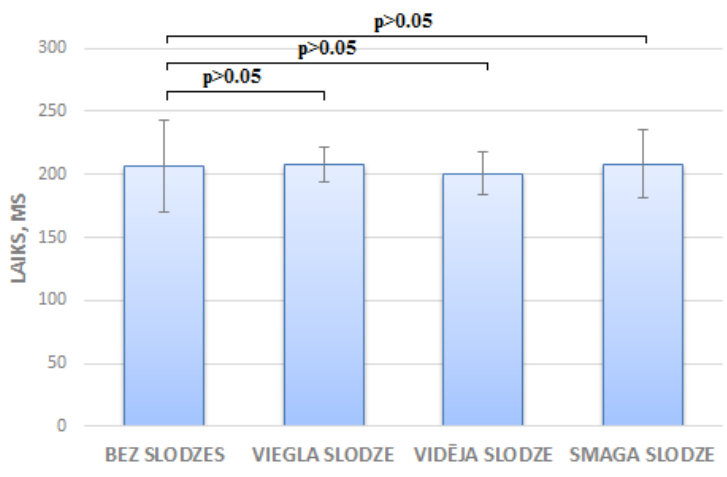
Noskaidrots, ka, pildot vieglas pakāpes testa kognitīvo slodzi, pētījuma dalībniekiem vidējā amplitūda palielinājās līdz  $1.20 \pm 0.32 \text{ mm}$ , tā bija diapazonā 0.49 – 1.68 mm. Savukārt vidējas grūtības pakāpes testa kognitīvas slodzes laikā vidējā amplitūda svārstījās no 0.43 līdz 1.89 mm, vidēji sasniedzot  $1.12 \pm 0.35 \text{ mm}$ . Smagas grūtības pakāpes testa kognitīvās slodzes ietekmē amplitūda svārstījās intervālā no 0.60 līdz 1.43 mm, vidēji sasniedzot  $1.06 \pm 0.22 \text{ mm}$ . (20. attēls)

Iegūtie rezultāti, salīdzinot brīdi, kad nav veikts ar domāšanu saistīts uzdevums un kad pielikta vai nu vieglas, vai vidējās, vai smagas grūtības pakāpes testa kognitīvā slodze, neuzrāda statistiski nozīmīgu atšķirību ( $p > 0.05$ ). Respektīvi, testa kognitīvā slodze neradīja vērā ņemamas amplitūdas izmaiņas. (20. attēls) Šajā pētījumā nevienai personai nav viennozīmīga refleksa latentā perioda (LP), refleksa amplitūdas (RA) un zīlītes sašaurināšanās (ZS) vērtību pieauguma, palielinoties kognitīvās slodzes grūtumam. Apmēram trešdaļai personu citu autoru novērotā sakarība apstiprinājās, bet tikai slodzes grūtuma diapazonā līdz vidējai grūtības pakāpei. Iespējamais skaidrojums – stresa situācija, risinot ļoti grūtos uzdevumus.

Citi autori ir pētījuši parādību, kad mentāli procesi inhibē Edingera-Vestfāla kodolu, tādējādi izraisot savilcējmuskuļa (*m. sphincter pupillae*) atslābšanu vai relaksāciju, izraisot acs zīlītes palielināšanos. Viscerālā, somatiskā un ožas sensorā informācija tiek pārraidīta uz hipotalāmu un tālāk konverģēta uz eferento simpātisko šķiedru sistēmu. Tā izraisa zīlīšu paplašināšanos. (Privitera et al., 2008)

### **3.4.3. Gaismas stimula izsuktās zīlītes sašaurināšanās ātrums**

Viens no parametriem, kas parāda gaismas ierosināto zīlīšu refleksu, ir acs zīlītes diametra sašaurināšanās ātrums. To raksturo laiks ( $t_{50\%}$ , ms), kurā zīlīte sašaurinājās uz pusi no sava sākotnējā diametra. Tika salīdzināti un padziļinātāki analizēti reakcijas laiki trīs dažādu grūtības pakāpju (viegla, vidēja un smaga) testa kognitīvajām slodzēm pie 456 nm konstanta stimula. (21. attēls)



21. attēls. Vidējie reakcijas laiki ( $t_{50\%}$ ) pētījuma dalībniekiem ( $n=15$ ) dažādām testa kognitīvajām slodzēm pie 456 nm konstanta stimula.

Figure 21. Average reaction time ( $t_{50\%}$ ) for all subjects ( $n=15$ ) in different kind of cognitive loads under 456 nm square pulse stimulus.

Rezultāti parāda, ka laikā, kurā zīlīte sašaurinājās par 50% no sava sākotnējā diametra, pielietojot vieglas grūtības pakāpes testa kognitīvo slodzi, novērojama tendence, ka vidējā vērtība palielinājās līdz  $207.70 \pm 13.92$  ms, ietilpstot intervālā no 183.37 līdz 227.13 ms. Konkrētās izlases ietvaros vidējas grūtības pakāpes testa kognitīvās slodze izraisījusi  $200.73 \pm 16.93$  ms ilgu  $t_{50\%}$  reakcijas laiku, un tas svārstās robežās no 174.11 līdz 233.38 ms. Vislielākā  $t_{50\%}$  laika vērtība sasniegta smagas grūtības pakāpes (skaitīšana galvā dilstošā secībā ik pa septiņi) testa kognitīvas slodzes laikā, proti, svārstoties no 171.46 ms līdz 260.47 ms, tā vidēji bijusi  $208.36 \pm 26.79$  ms ilga. (21. attēls)

Pētījuma gaitā tika atklāts, ka nav novērojama statistiski būtiska tendence ( $p > 0.05$ ) starp reakcijas laikiem, kādi bija zīlīšu refleksam bez testa kognitīvās slodzes, salīdzinot ar tendenci, kad tiek pildīts ar domāšanu saistītu dažādas grūtības pakāpju testa uzdevums. Tiek secināts, ka testa kognitīvajai slodzei nav statistiski nozīmīgas ietekmes uz reakcijas ātrumu. (21. attēls)

Šajā pētījumā tika salīdzinātas zīlītes toniskā diametra (nemainīga apgaismojuma apstākļos) un vairāku gaismas refleksa parametru (latences, amplitūdas un zīlītes sašaurināšanās ātruma) saistība ar kognitīvās slodzes grūtuma pakāpi. *Steinhauera* secinājums, ka smaga kognitīvā slodze inhibē zīlīšu parasimpātisko inervāciju (Steinhauer et al., 2004), pie tam kavējošās ietekmes realizējās dažādos smadzeņu stumbra un vidussmadzeņu struktūrās (Steinhauer et al., 2015).

### 3.4.4. Kognitīvas slodzes ietekme uz zīlīšu refleksa parametriem (individuālie dati)

Lai gan visai dalībnieku grupai netika novērotas izteiktas tendences, tomēr daļai izmeklējamo personu bija redzama zīlīšu refleksa parametru atkarība no vienlaikus veiktās testa kognitīvās slodzes grūtības pakāpes. Tendence novērota, apskatot parametrus bez slodzes apstākļos, ar vieglas un vidējas grūtības pakāpes testa kognitīvo slodzi. Smagas grūtības pakāpes testa kognitīvajai slodzei netika novērotas tendences. Šajā gadījumā tika apskatīti un analizēti 15 eksperimenta dalībnieku dati.

Visjutīgākais parametrs izrādījās zīlītes reflektorais sašaurināšanās ātrums ( $t_{50\%}$ , ms). Novērots, ka 7 no 15 personām testa kognitīvās slodzes ietekmē  $t_{50\%}$  saīsinājās, un saīsināšanās pakāpe pieauga līdz ar slodzes grūtības palielināšanos. Savukārt 5 eksperimenta dalībniekiem zīlītes sašaurināšanās amplitūda palielinājās testa kognitīvās slodzes ietekmē, bet 4 personām testa kognitīvās slodzes ietekmē pagarinājās zīlītes refleksa latentais periods. Ceturtajā tabulā apkopoti šo personu grupu vidējie rezultāti. (4. tabula)

4. tabula.

Vidējie parametri pētījuma dalībniekiem dažādām testa kognitīvajām slodzēm pie 456 nm konstanta stimula.

Table 4

Average parameters of different test cognitive load under constant 456 nm stimulus for all of the participants.

Parametrs	skaits	Slodzes intensitāte			
		bez slodzes	viegla	vidēja	smaga
$t_{50\%}$ , ms	7	229.24 ± 61.06	212.85 ± 33.14	195.50 ± 29.65	225.04±48.10
Amplitūda, mm	5	1.15 ± 0.36	1.39 ± 0.40	1.50 ± 0.47	1.23±0.36
Latentais periods, ms	4	199.29 ± 33.32	206.52 ± 31.58	213.38 ± 26.28	209.15±27.17

Var secināt, ka testa kognitīvajai slodzei pastāv ietekme uz zīlītes refleksa parametriem, taču tendence izpaužas tikai daļai eksperimenta dalībnieku.

Ir vairāki acs zīlītes muskulatūras reakciju tipi:

- 1) zīlītes reakcijas uz apgaismojuma intensitātes maiņu; to izcelsme ir autonomās nervu sistēmas refleksi, kas realizējas vidussmadzeņu jumta (Edingera-Vestfāla kodola) līmenī;
- 2) zīlītes pārejoša (īslaicīga, atgriezeniska) konstrikcijas reakcija, ko izraisa vizuālā stimula analīze nemainīga apgaismojuma apstākļos; šīs reakcijas saistītas ar vizuālo stimulu percepciju redzes garozā, kad primārās redzes garozas līmenī tiek identificēta redzes ainas struktūra, krāsa, kustība (Barbur et al., 1992); atsevišķo vizuālā stimula komponentu percepcija nenotiek vienādi strauji un sinhroni (Barbur et al., 1998; Zeki et al., 1997);

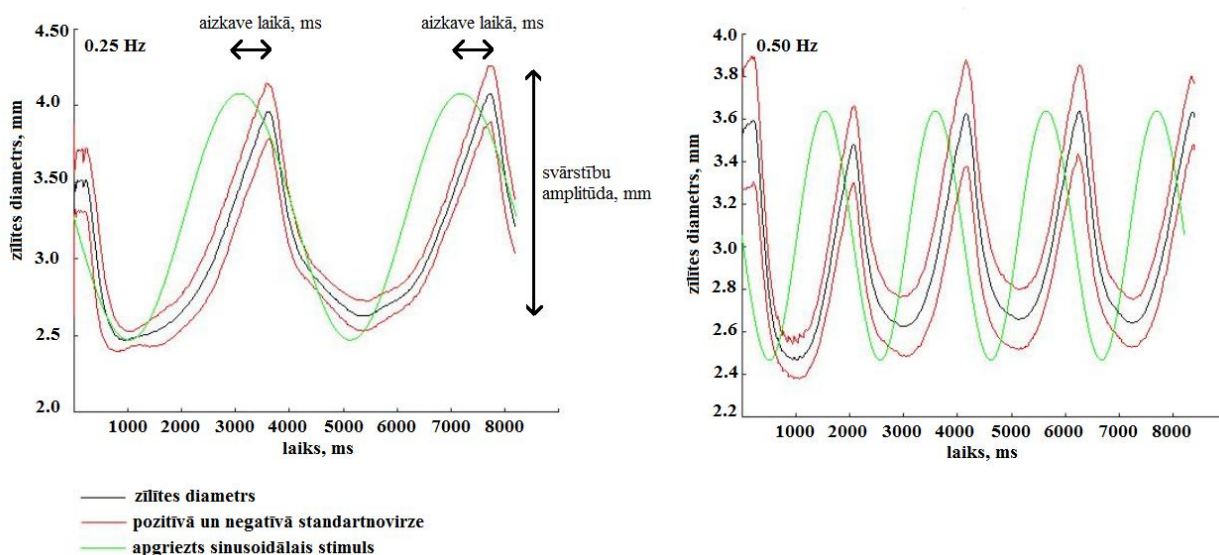
3) zīlītes diametra (Klingner et al., 2008; Bourisly A.K., 2015) un reflektoro reakciju modulācijas, kuru izcelsme saistīta ar kognitīviem procesiem (uzmanības piesaisti, prātošanu,) lielo pusložu garozā (Binda P. & Murray S.O., 2015; Kruger et al., 2001), atmiņā ielāgotās informācijas aktualizāciju apziņā (Greeven van et al., 2004; Rijn et al., 2012) un emocijām (Bradley et al., 2008). Zīlīšu diametra maiņas un gaismas refleksa parametri variē atkarībā no kognitīvās slodzes veida, smaguma, emocionālā fona un citiem apstākļiem (Steinhauer et al., 2000; Koelewijn et al., 2014; Zenon A., Sidibe M., Olivier E., 2014).

### 3.5. Sinusoidālas gaismas stimula izraisīto zīlīšu diametra fāziskās maiņas

Eksperimentālās daļas ietvaros tika analizēta zilu (456 nm) sinusoidālu gaismas stimulu, precīzāk, 0.25 Hz un 0.50 Hz, konstanta apgaismojuma ( $10.22 \text{ cd/m}^2$ ) ietekme uz tādiem parametriem kā: 1) diametra svārstību amplitūda; 2) zīlītes diametra svārstību laika aizkave.

#### 3.5.1. Zīlīšu reakcijas uz sinusoidālu stimulu parametru (amplitūdas un aizkaves) atkarība no stimula frekvences

Novērots, ka dažādu sinusoidālu stimulu ietekmē (0.25 Hz un 0.50 Hz) acs zīlītes refleksa parametri, tieši amplitūda un frekvence, ir atšķirīgi. (22. attēls)



22. attēls. Zīlīšu diametra svārstību amplitūdas un aizkaves laika atkarība no sinusoidālas gaismas stimula.

Figure 22. Pupil diameter fluctuation amplitude and delay time dependence of sinusoidal light stimulus.

Aizkaves laika vērtība tika noteikta, salīdzinot diametra maksimālo vērtību (pīķu) nobīdi laikā. Savukārt svārstību amplitūda tika noteikta, salīdzinot minimālās un maksimālās diametra vērtības viena sinusa cikla laikā (Zangemeister et al., 2009).

Pie 0.25 Hz sinusoidāla stimula, kad ik pa četrām sekundēm veic vienu pilnu sinusoīdas ciklu, vidējā amplitūda svārstījās  $0.93 \pm 0.33$  mm diapazonā. Savukārt aizkaves laiks bija  $507.43 \pm 41.41$  ms ilgs. (5. tabula)

5. tabula.

Aizkaves laika atkarība no sinusoidāla stimula frekvences.

Table 5.

Delay time dependence of sinusoidal light frequency

Frekvence	0.25 Hz	0.50 Hz
Amplitūda, mm	$0.93 \pm 0.33$	$1.06 \pm 0.28$
Aizkave laikā, ms	$507.43 \pm 41.41$	$558.88 \pm 31.78$

Savukārt 0.50 Hz stimula ietekmē, kad 8 sekunžu stimula ekspozīcijas laikā noritēja četras pilnas sinusoidālas svārstības, abi parametri palielinājās. Proti, amplitūda svārstījās  $1.06 \pm 0.28$  mm apmērā, un tā bija pieaugusi par apmēram 0.13 mm, salīdzinot ar 0.25 Hz stimulu. Savukārt aizkaves laiks pie 0.50 Hz stimula bija  $558.88 \pm 31.78$  ms, un tas bija pieaudzis par aptuveni 51 ms. (5. tabula)

### 3.5.2. Zīlīšu reakcijas uz sinusoidālu stimulu parametru (amplitūdas un aizkaves) atkarība no testa kognitīvās slodzes grūtības pakāpes

Apskatīts gadījums, kad dažādu sinusoidālu stimula laikā (0.25 Hz un 0.50 Hz) tiek pielikta atšķirīgas intensitātes (vieglas, vidējas un smagas) testa kognitīvā slodze. Rezultātu analizē novērojamas parametru atšķirības gan atkarībā no testa slodzes intensitātes, gan no frekvenču izmaiņas. (6. tabula)

6. tabula.

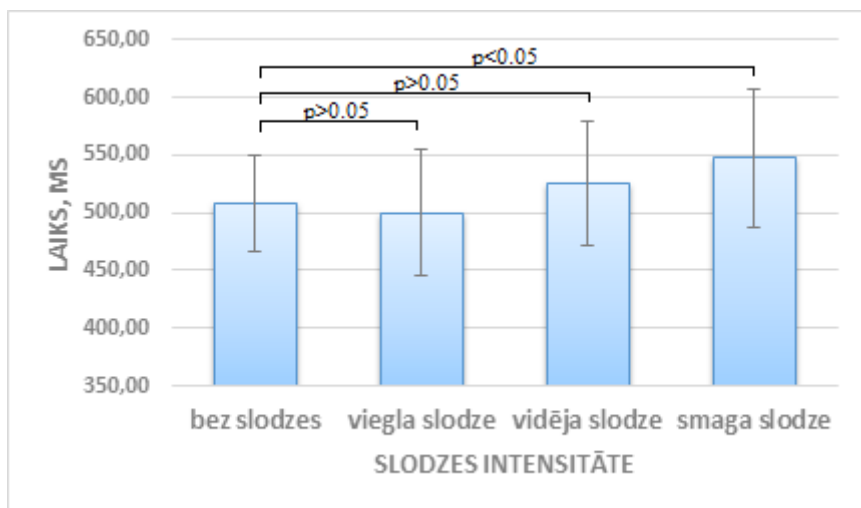
Dažādu intensitāšu slodžu aizkaves laika atkarība no sinusoidāla stimula frekvences.

Table 6

Delay time of different intensities load dependency of sinusoidal light frequency.

frekvence	0.25 Hz	0.50 Hz
slodzes intensitāte	aizkave, ms	
bez slodzes	$507.43 \pm 41.41$	$558.88 \pm 31.78$
viegla	$499.80 \pm 54.78$	$561.11 \pm 46.05$
vidēja	$525.73 \pm 54.14$	$602.93 \pm 108.55$
smaga	$547.20 \pm 60.34$	$577.55 \pm 26.97$

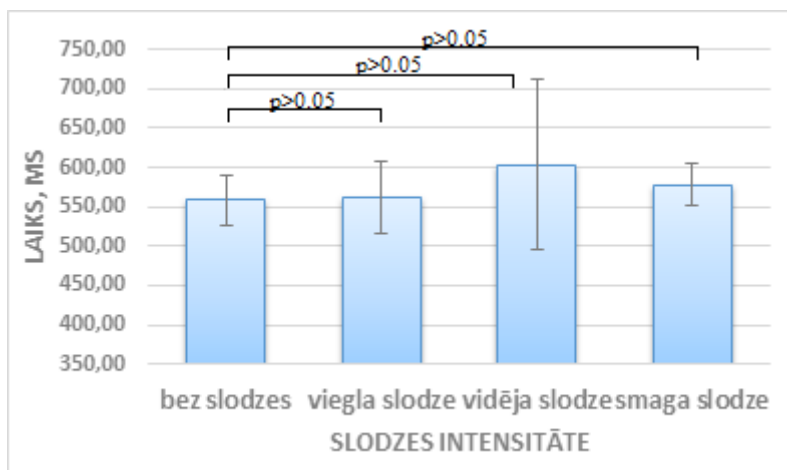
Konstatēts, ka pie 0.25 Hz sinusoidālas gaismas stimula aizkaves laiks, pieliekot vieglas grūtības pakāpes testa kognitīvo slodzi, svārstās  $499.80 \pm 54.78$  ms intervālā. Pieaugot testa kognitīvās slodzes intensitātei, arī aizkaves laiks paildzinājās, respektīvi, vidējas grūtības pakāpes testa kognitīvās slodzes laikā aizkaves laiks palielinājās līdz  $525.73 \pm 54.14$  ms, bet smagas grūtības testa kognitīvās slodzes laikā tas paildzinājās līdz  $547.20 \pm 60.34$  ms. (23. attēls, 7. tabula)



23. attēls. Testa kognitīvās slodzes ietekme uz 0.25 Hz sinusoidālu gaismas stimula izraisītu zīlītes diametra svārstību aizkaves laiku

Figure 23. Test cognitive load effect of 0.25 Hz sinusoidal light stimulus induced pupil diameter fluctuation delay time.

Turpretim 0.50 Hz sinusoidālas gaismas stimula laikā, pieliekot vieglas pakāpes testa kognitīvo slodzi, zīlītes diametra svārstību aizkave svārstījās  $561.11 \pm 46.05$  ms diapazonā. Salīdzinot ar 0.25 Hz sinusoidālās gaismas stimulu, aizkaves laiks bija pieaudzis par aptuveni 62 ms. Arī 0.50 Hz stimula gadījumā tika novērota tendence, ka, pieaugot testa kognitīvās slodzes intensitātei, aizkaves laika vērtība palielinājās, proti, vidējas grūtības pakāpes slodzes laikā aizkave bija  $602.93 \pm 108.55$  ms. Tomēr smagas pakāpes slodzes ietekmē aizkaves laika izmaiņas nepakļaujas iepriekšminētajai tendencei, līdz ar to aizkaves laiks svārstījās  $577.55 \pm 26.97$  ms robežās. (6. tabula, 24. attēls)



24. attēls. Testa kognitīvas slodzes ietekme uz 0.50 Hz sinusoidālu gaismas stimula izraisītu zīlītes diametra svārstību aizkaves laiku

Figure 24. Test cognitive load effect of 0.50Hz sinusoidal light stimulus induced pupil diameter fluctuation delay time.

Salīdzinot abas izmantotās stimulu frekvences, novēroja, ka augstākas frekvences gadījumā (0.50 Hz) zīlītes svārstību aizkave ir lielāka ( $p < 0.05$ ). Piemēram, 0.25 Hz stimulāciju raksturo aizkaves laika pagarināšanās, pieaugot kognitīvās slodzes intensitātei. 0.50 Hz stimulu gadījumā šāda likumsakarība neparādījās. (24. attēls)

Tāpat tika izvērtēta amplitūdas atkarība gan no atšķirīgām frekvencēm (0.25 Hz un 0.50 Hz), gan no dažādu intensitāšu testa kognitīvās slodzes smaguma pakāpes. Iegūtie rezultāti apkopoti 7. tabulā.

7. tabula.

Dažādu intensitāšu slodžu amplitūdas atkarība no sinusoidāla stimula frekvences.

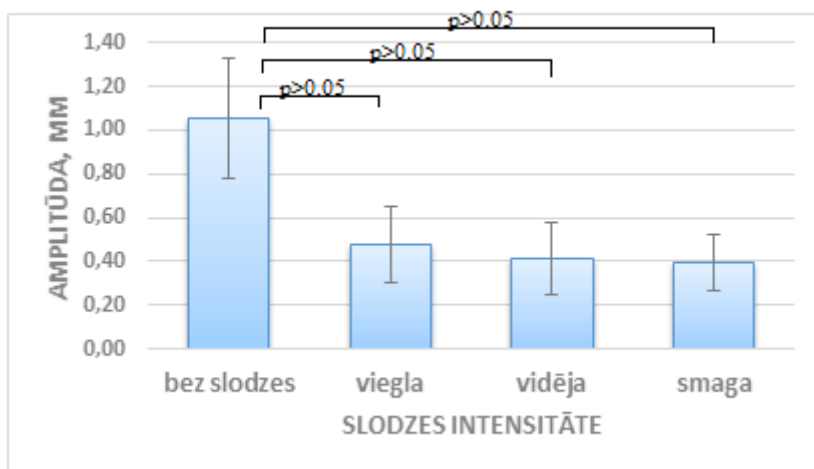
Table 7

Different intensity load amplitude dependency of sinusoidal light frequency.

frekvence	0.25 Hz	0.50 Hz
slodzes intensitāte	amplitūda, mm	
bez slodzes	1.06±0.28	1.43±1.06
viegla	0.48±0.18	1.69±0.48
vidēja	0.41±0.16	1.66±0.41
smaga	0.39±0.13	1.53±0.39

Izvērtējot 0.25 Hz sinusoidāla stimula ietekmi uz zīlītes diametra svārstību amplitūdu, bija redzams, ka vieglas grūtības pakāpes testa kognitīvās slodzes apstākļos diametra amplitūda variēja 0.48±0.18 mm intervālā. Pieaugot testa slodzes intensitātei, svārstību amplitūda samazinājās līdz 0.41±0.16 mm vidējas kognitīvās testa slodzes apstākļos. Savukārt smagas grūtības pakāpes testa slodzes apstākļos amplitūda variēja 0.39±0.13 mm diapazonā.

Tādējādi tika novērota tendence, ka palielinoties testa kognitīvās slodzes intensitātei, samazinājās zīlītes diametra amplitūda. (7. tabula, 25. attēls)

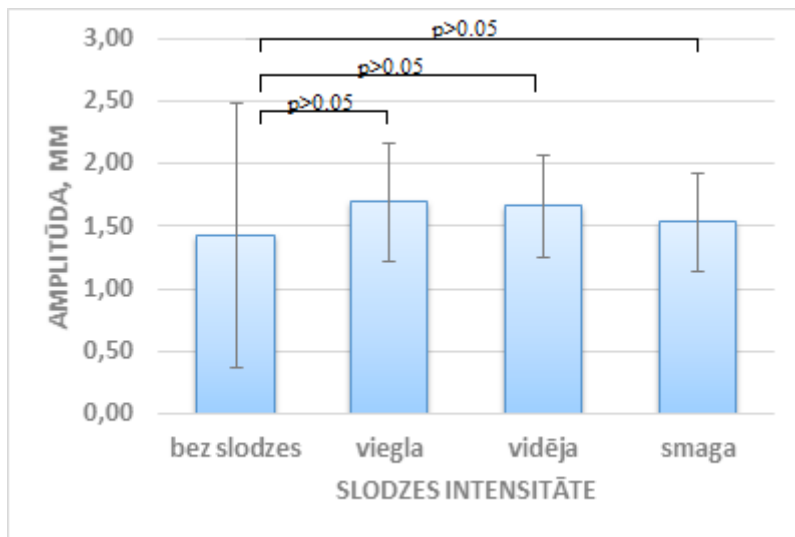


25. attēls. Testa kognitīvās slodzes ietekme uz 0.25 Hz sinusoidālu gaismas stimula izraisītu zīlītes diametra svārstību amplitūdu.

Figure 25. Test cognitive load effect of 0.25Hz sinusoidal light stimulus induced pupil diameter fluctuation amplitude.

Analizējot 0.50 Hz sinusoidālas gaismas stimula ietekmē notiekošās zīlītes diametra amplitūdas svārstības, redzams, ka vieglas grūtības pakāpes testa kognitīvās slodzes apstākļos amplitūda ir  $1.69 \pm 0.48$  mm robežās. Pieaugot testa slodzes intensitātei, svārstību amplitūda nedaudz samazinājās, respektīvi, vidējās grūtības pakāpes testa kognitīvās slodzes apstākļos amplitūda bija  $1.66 \pm 0.41$  mm intervālā. Smagas grūtības pakāpes slodzes apstākļos tendence turpinājās, un amplitūda variēja  $1.53 \pm 0.39$  mm diapazonā. Tātad kognitīvās slodzes intensitātes ietekmē diametra svārstību amplitūda samazinās. (7. tabula, 26. attēls)

Salīdzinot zīlītes diametra amplitūdas svārstības atšķirīgu frekvenču laikā, novērojams, ka pie 0.50 Hz sinusoidālas gaismas stimula svārstību amplitūda ir lielākā nekā pie 0.25 Hz stimula un tām ir dīlstoša tendence. (7. tabula)



26. attēls. Testa kognitīvās slodzes ietekme uz 0.50 Hz sinusoidālu gaismas stimula izraisītu zīlītes diametru svārstību amplitūdu.

Figure 26. Test cognitive load effect of 0.50 Hz sinusoidal light stimulus induced pupil diameter fluctuation amplitude.

Pēc statistiskās analīzes datiem, nevienā no gadījumiem, proti, salīdzinot situāciju, kad nav pielikta kognitīva slodze ar brīdi, kad ir vai nu vieglas, vai vidējas, vai smagas pakāpes kognitīvā slodze nav statistiski ticamas atšķirības. (26. attēls)

## SECINĀJUMI

1. Palielinoties kognitīvās slodzes grūtības pakāpei, auksti baltai gaismai adaptētais zīlītes diametrs sašaurinās, uzrādot statistiski būtisku ietekmi, kad pielikta vidējās ( $p < 0.05$ ) un smagas ( $p < 0.01$ ) grūtības pakāpes kognitīvā slodze.
2. Individuāli vērtējot, trīs dažādas intensitātes testa kognitīvās slodzes rada ietekmi uz zīlīšu refleksa parametriem – izmeklēto personu grupas vidējie rādītāji neuzrāda viennozīmīgu ietekmi. Daļai indivīdu latentais periods paildzinājās, zīlītes svārstību amplitūda palielinājās, bet laika konstante  $t_{50\%}$  samazinājās.
3. Divu atšķirīgu frekvenču (0.25 Hz un 0.50 Hz) sinusoidāla gaismas stimula izraisītā zīlīšu diametra amplitūda un aizkaves laiks ( $p < 0.05$ ) palielinājās līdz ar frekvenci.
4. Trīs dažāda smaguma kognitīvo slodžu laikā aizkaves laiks paildzinājās līdz ar kognitīvās slodzes intensitātes palielināšanos.

## PATEICĪBAS

Autore izsaka pateicību maģistra darba vadītājam, vadošajam pētniekam Dr. fiz. Sergejam Fominam par eksperimentālās iekārtas sagatavošanu, programmatūras radīšanu un ieteikumiem darba izveidē.

Liels paldies tiek sacīts maģistra darba konsultantam Dr. hab. biol., prof. Jurim I. Aivaram par darba tēmas ieteikšanu, vērtīgu padomu sniegšanu darba izstrādē un pilnveidē, par veltīto laiku un enerģiju, kā arī veiksmīgu sadarbību izstrādes procesā.

Tiek izteikta pateicība visiem brīvprātīgajiem eksperimenta dalībniekiem par to, ka veltīja savu laiku un izrādīja interesi piedalīties pētījuma norisē.

Paldies Latvijas Universitātes Bioloģijas fakultātes akadēmiskajam personālam, jo īpaši Cilvēka un dzīvnieku fizioloģijas katedras pasniedzējiem, par sniegtajām zināšanām.

## IZMANTOTĀ LITERATŪRA

- Adrian W. 2003. Spectral sensitivity of the pupillary system. – *Clinical and Experimental Optometry*, 86(4): 235–238
- Barbur J.L., Harlow A.J., Sahraie A. 1992. Pupillary responses to stimulus structure, color, movement. – *Ophthalmic Physiol Opt.* 12:137–141.
- Barbur J.L., Wolf J., Lennie P. 1998. Visual processing levels revealed by response latencies to changes in different visual attributes. – *Proceedings Royal Society*, 265: 2321–2325
- Binda P., Murray S.O. 2015. Spatial attention increases the pupillary response to light changes. *Journal of Vision*, 15(1): 34-41.
- Bourisly A.K. 2015. Pupil response diameter is modulated as a function of cognitive load during mental addition: a psychophysiological protocol and study. – *J Advanced Neurosc Res*, 2: 1-6.
- Boyce P.R. 2014. *Human Factors in Lighting, Third Edition*. CRC Press: 107 – 111
- Bradley M.M., Miccoli L., Escrig M.A., Lang P.J. 2008. The pupil as a measure of emotional arousal and autonomic activation. *Psychophysiology*, 45(4): 602–607.
- Brainard C., Hanifin J.P., Greeson J.M., Byrne B., Glickman G. , Gerner E., Rollag M.D. 2001. Action spectrum for melatonin regulation in humans: Evidence for a novel circadian photoreceptor. – *The Journal of Neuroscience*, 21(16): 6405–6412.
- Brown T.M., Allen A.E., al-Enezi J., Wynne J., Schlangen L., Hommes V., Lucas R.J. 2013. The Melanopic Sensitivity Function Accounts for Melanopsin-Driven Responses in Mice under Diverse Lighting Conditions. – *PloS ONE* 8(1): 1–8
- Gamlin P.D., McDougal D.H., Pokorny J., Smith V.C., Yau K.W., Dacey D.M. 2007. Human and macaque pupil responses driven by melanopsin-containing retinal ganglion cells. – *Vision Research*, 47: 946–954
- Heller P.H., Perry F., Jewett D.L., Levine J.D. 1990. Autonomic components of the human pupillary light reflex. – *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 31(1): 156-62.
- Higuchi S., Ishibashic K., Aritakea S., Enomotoa M., Hidaa A., Tamuraa M., Kozakic T., Motohashib Y., Mishimaa K. 2008. Inter-individual difference in pupil size correlates to suppression of melatonin by exposure to light. – *Neuroscience Letters* Volume, 440(1): 23–26
- Howells F.M., Stein D.J., Russell V.A. 2010. Perceived mental effort correlates with changes in tonic arousal during attentional tasks. – *Behavioral and Brain Functions*, 6: 39–54.
- Jainta S., Baccino T. 2010. Analyzing the pupil response due to increased cognitive demand. – *International Journal of Psychophysiology*, 77(1): 1–7
- Joyce D.S., Feigl B., Cao D., Zele A.J. 2015. Temporal characteristics of melanopsin inputs to the human pupil light reflex. – *Vision Research*, 107: 58–66

- Kankipati L., Girkin C.A., Gamlin P.D. 2010. Post-illumination Pupil Responses in Subjects without Ocular Diseases. – *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 51(5): 2764–2769
- Kennard C., Leigh R.J. 2011. *Neuro-ophthalmology: Handbook of Clinical Neurology*, Vol 102. – Elsevier: 428–430
- Laeng B., Sirois S., Gredebaeck G. 2012. Pupillometry: A Window to the Preconscious? – *Perspectives on Psychological Science* 7(1) 18–27
- Luedtke H., Wilhelm B., Adler M., Schaeffel, Wilhelm H. 1998. Mathematical procedures in data recording and processing of pupillary fatigue waves. – *Vision Research*, 38: 2889–2896
- Mactier H., Maroo S., Bradnam M., Hamilton R. 2008. Ocular Biometry in Preterm Infants: Implications for Estimation of Retinal Illuminance. – *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 49(1): 453–457
- Milone F.F., Minelli A.T., Cian R. 2013. Alpha Rhythms Response to 10 Hz Flicker Is Wavelength Dependent. – *Neuroscience & Medicine*, 4: 94–100
- Moresi S., Adam J.J., Rijcken J., Van Gerven P.W.M., Kuipers H., Jolles J. 2007. Pupil dilation in response preparation. – *International Journal of Psychophysiology*, 67(2): 124–130
- Nilius B., Amara S.G., Gudermann T., Jahn R., Lill R., Offermanns S., Petersen O.H. 2012. *Reviews of Physiology, Biochemistry and Pharmacology: Volume 162* Springer Science & Business Media
- Klingner J., Kumar R., Hanrahan P. 2008. Measuring the task-evoked pupillary response with remote eye tracker. – *ETRA*, 69 -73.
- Koelewijn T., Shinn-Cunningham B., Zekveld A. 2014. The pupil response is sensitive to dividend attention during speech processing. *Hearing Research*, 312:114-120.
- Kruger F., Nuthmann A., Van der Meer E. 2001. Pupillometric indices of temporal representation in semantic memory. *Zeitschrift fur Psychol. Psychol.*, 209:402–415.
- Privitera C. M., Renninger, L. W. , Carney, T., Klein,S., Aguilar M. 2008. The pupil dilation response to visual detection. – *Human Vision and Electronic Imaging XIII, Proc. of SPIE-IS&T Electronic Imaging*, SPIE Vol. 6806, 68060T: 1-11
- Qu, X. 2014. Age-related cognitive task effects on gait characteristics: do different working memory components make a difference. – *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 11(149): 1-9
- Rijn van H., Dalenberg J.R., Borst J.P., Sprenger S.A. 2012. Pupil dilation co-varies with memory strength of individual traces in a delayed response paired-associate task. – *PLoS One*, 7(12): e51134.
- Spitschan M., Jain S., Brainard D.H., Aguirre G.K. 2014. Opponent melanopsin and S-cone signals in the human pupillary light response. – *PNAS* 111(43): 15568–15572

- Steinhauer S.R., Hakarem G. 1992. The pupillary response in cognitive psychophysiology and schizophrenia. In: D. Friedman & G. Bruder (Eds.) *Psychophysiology and experimental psychopathology*. NY Acad Sc, 658: 182 – 204.
- Steinhauer S.R., Condray R., Kasperek. 2000. Cognitive modulation of midbrain function: task-induced reduction of the pupillary light reflex. – *Int J Psychophysiol*, 39(1): 21 – 30.
- Steinhauer S.R., Siegle G.J., Condray R. 2004. Sympathetic and parasympathetic innervation of pupillary dilation during sustained processing. *Int J Psychophysiol*, 52(1):77–86.
- Steinhauer S.R., Condray R., Pless M.L. 2015. Pharmacological isolation of cognitive components influencing the pupillary light reflex. *J Ophtalmol*, vol. 2015, pp. 1-7.
- Teikari P., Najjar R.P., Malkki H., Knoblauch K., Dumortier D., Gronfier C., Cooper H.M. 2012. An inexpensive Arduino-based LED stimulator system for vision research. – *Journal of Neuroscience Methods* 211: 227–236
- Van Gerven P.W.M., Paas F., Van Merrienenboer J.J.G., Schmidt H.G. 2004. Memory load and the cognitive pupillary response in aging. – *Psychophysiology*, 41: 167–174
- Van Hateren J.H., Snippe H.P. 2007. Simulating human cones from mid-mesopic up to high-photopic luminances. – *Journal of Vision*, 7(4): 1–11
- Warga M., Luedtke H., Wilhelm H., Wilhelm B. 2008. How do spontaneous pupillary oscillations in light relate to light intensity? – *Vision Research*, 49: 295–300
- West K.E., Jablonski M.R., Warfield B., Cecil K.S., James M., Ayers M.A., Maida J., Bowen C., Sliney D.H., Rollag M.D., Hanifin J.P., Brainard G.C. 2011. Blue light from light-emitting diodes elicits a dose-dependent suppression of melatonin in human. – *Journal of Applied Physiology*, 110(3): 619–626
- Wilhelm B.J., Wilhelm H., Moro S., Barbur J.L. 2002. Pupil response components: studies in patients with Parinaud’s syndrome. – *Brain*, 125: 2296–2307
- Wilhelm B.J., Widmann A., Durst W., Heine C., Otto G. 2009. Objective and quantitative analysis of daytime sleepiness in physicians after night duties. – *International Journal of Psychophysiology* 72: 307–313
- Zaidi F.H., Hull J.T., Peirson S.N., Wulff K, Aeschbach D. 2007. Short-wavelength Light Sensitivity of Circadian, Pupillary and Visual Awareness in Humans Lacking an Outer Retina. – *Current Biology*, 17(24): 2122–2128
- Zangemeister W.H., Gronow T., Grzyska U. 2009. Pupillary responses to single and sinusoidal light stimuli in diabetic patients. – *Neurology International*, 1(1): 65–71
- Zeki S., Moutoussis K. 1997. Temporal hierarchy of the visual perceptive systems in the Mondrian world. *Proc Biol Sci*, 264(1387): 1415 – 1419.
- Zenon A., Sidibe M., Olivier E. 2014. Pupil size variations correlate with physical effort perception. – *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 8 (286): 1–8

Pielikumi

## 1. pielikums

Dažādu intensitāšu slodžu amplitūdas atkarība no sinusoidāla stimula frekvences visiem dalībniekiem.

Frekvence	0.25 Hz				0.50 Hz				
	Slodzes intensitāte				Slodzes intensitāte				
	Persona	bez slodzes	viegla	vidēja	smaga	Persona	bez slodzes	viegla	vidēja
D1	0.30±0.52	0.51±0.13	0.42±0.12	0.42±0.10	D1	0.99±0.32	0.88±0.32	1.05±0.30	0.99±0.32
D2	0.30±0.47	0.49±0.13	0.42±0.12	0.42±0.10	D2	0.87±0.32	1.23±0.31	1.11±0.30	1.06±0.32
D3	0.31±0.43	0.51±0.13	0.43±0.12	0.43±0.11	D3	1.02±0.33	0.98±0.33	1.05±0.31	0.95±0.33
D4	0.32±0.37	0.53±0.14	0.44±0.12	0.45±0.11	D4	0.89±0.34	1.04±0.34	1.06±0.32	0.85±0.34
D5	0.79±0.26	0.54±0.14	0.46±0.13	0.45±0.11	D5	0.77±0.36	0.94±0.35	1.05±0.34	0.91±0.34
D6	1.01±0.21	0.56±0.15	0.48±0.14	0.47±0.11	D6	1.09±0.37	1.13±0.36	1.04±0.35	0.96±0.35
D7	1.17±0.19	0.58±0.15	0.51±0.14	0.49±0.12	D7	1.26±0.38	1.43±0.38	1.82±0.37	1.62±0.36
D8	1.30±0.18	0.57±0.15	0.48±0.14	0.50±0.11	D8	1.30±0.38	1.86±0.39	1.70±0.31	1.61±0.35
D9	1.36±0.19	0.38±0.16	0.37±0.15	0.38±0.11	D9	1.03±0.35	0.35±0.31	1.25±0.25	1.29±0.32
D10	1.43±0.20	0.40±0.17	0.39±0.16	0.40±0.11	D10	1.03±0.36	0.36±0.32	1.32±0.25	1.71±0.33
D11	1.47±0.22	0.44±0.18	0.38±0.18	0.32±0.12	D11	1.05±0.36	1.23±0.34	1.11±0.24	1.03±0.17
D12	1.66±0.25	0.49±0.20	0.42±0.20	0.34±0.13	D12	0.73±0.34	0.67±0.37	0.83±0.26	0.80±0.18
D13	1.58±0.24	0.54±0.23	0.47±0.22	0.38±0.15	D13	0.69±0.37	1.48±0.37	1.23±0.29	1.07±0.20
D14	1.55±0.25	0.56±0.26	0.52±0.26	0.36±0.17	D14	0.56±0.35	0.57±0.30	0.59±0.30	0.66±0.22
D15	1.30±0.17	0.07±0.29	0.03±0.27	0.08±0.22	D15	0.65±0.16	1.06±0.05	1.05±0.07	0.93±0.12
<b>Vidēji Average</b>	<b>1.06±0.28</b>	<b>0.48±0.18</b>	<b>0.41±0.16</b>	<b>0.39±0.13</b>	<b>Vidēji Average</b>	<b>0.93±0.33</b>	<b>1.13±0.34</b>	<b>1.15±0.28</b>	<b>1.09±0.28</b>

