

**БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ
ИНСТИТУТ ПО НЕВРОБИОЛОГИЯ**

Цветалин Тотев Тотев

**Механизми, определящи скоростта на зрителното
възприятие на стимули с различна пространствена
честота**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за присъждане на образователна и научна степен “Доктор”

Професионално направление 4.3 „Биологически науки“

Научна специалност „Физиология на животните и човека“

Научен ръководител: доц. Димитър Митов дб

Официални рецензенти:

Проф. Ангел Василев, дмн

Проф. Стефан Матеев, дбн

София

2015

Дисертационният труд е написан на 126 стандартни машинописни страници и е онагледен с 16 фигури и 1 таблица. Библиографията включва 132 заглавия от които 8 са на кирилица и 124 на латиница.

Дисертацията е обсъдена и предложена за защита на научен колегиум на Института по невробиология БАН, състоял се на 15.01.2015 г.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на .29.09.2015 г. от 14:00 часа в залата на Института по невробиология – БАН, ул. „Ак. Г. Бончев“ бл. 23, ет. 2. Материалите по защитата са на разположение в канцеларията на Института по невробиология – БАН, ул. „Ак. Г. Бончев“ бл. 23, ет. 2.

СЪДЪРЖАНИЕ

1. Въведение.	5
2. Цел и задачи.	6
3. Методика.	6
3.1. Апаратура.	6
3.1.1. Блок за синхронизация и развивка.	7
3.1.2. Генератор на пространствено-периодични зрителни стимули.	7
3.1.3. Цифрово програмируем атенюатор.	8
3.1.4. Линеаризация на модулационната характеристика на монитора.	9
3.2. Експериментални процедури.	10
3.2.1. Процедури за измерване на ВР.	10
3.2.2. Прагова процедура.	10
4. Зависимост на ВР за откриване на стимули-решетки от ПЧ при различни нива на надпраговия контраст. Колко канала определят ВР за откриване на стимули-решетки?	11
5. Време-сумационни свойства на механизмите определящи ВР за откриване на стимули-решетки.	15
6. Пространствено-честотна неопределеност и ВР за откриване на стимули-решетки.	20
7. Изследване на зависимостта на ВР за откриване на стимули-решетки от техния контраст (функция на Ригон). Описват ли се всички ВР получени при различни стойности на контраста и ПЧ с една „уникална“ функция на Ригон?	25
8. Ефект на ширината на стимулите-решетки върху ВР за тяхното откриване. Абсолютната ъглова ширина или броят на периодите в решетката определя ВР?	34
9. Заключение.	43
10. Приноси	44
11. Публикувани статии по темата	46
12. Цитирания	46
13. Доклади пред научни мероприятия в чужбина или пред научни мероприятия у нас	47

Използвани специфични съкращения.

ВР – време на реакция

ВЧ – времева честота

ЗПП – зрителни предизвикани потенциали

мс – милисекундна

ПЧ – пространствена честота

РП – рецептивно поле

с – секунда

хц – херци

ц/гр – цикли в градус

fMRI - изображение базирано на функционалния магнитно-ядрен резонанс

SD – standard deviation, стандартно отклонение

1. Въведение.

Още от времето на гешталт-психологията са известни факти, даващи основания да се счита, че зрителното възприятие е последователен във времето процес. Първоначално се възприемат по-грубите и по-големи елементи или ниските пространствени честоти (ПЧ) на изображенията и едва по-късно - техните по-фини и малки детайли или високите ПЧ. Това предполага, че описанията на изображенията в зрителната система първоначално би следвало да бъдат груби и размити и едва по-късно – по-фини и резки. Съществуват две принципни възможности където това би могло да се случи:

1) Първите нива на зрителната система преработват информацията за всички части от ПЧ-ния спектър на стимулите едновременно, но висшите когнитивни механизми анализират първоначално информацията за грубите елементи (ниските ПЧ) и едва по-късно и информацията за фините детайли (високите ПЧ).

2) Още първите нива на зрителната система преработват пространствената информация последователно от ниски към високи ПЧ, поради което и висшите когнитивни процеси протичат в същия ред.

Има ред доказателства в подкрепа на втората теза. Показано е че дори при такива прости перцептивни задачи като откриване на синусоидални решетки или различаването им по ПЧ или ориентация времето на реакция (ВР), а от там и латентността на възприятието, нарастват с повишаването на ПЧ. Това позволява да се заключи, че още на първите нива на зрителната система се осъществява последователно описание на изображенията от ниски към високи ПЧ. Това от своя страна предопределя и времевата организация на висшите когнитивни етапи на преработка на зрителната информация също като последователна от ниски към високи ПЧ.

Като основна причина за нарастването на латентността с повишаването на ПЧ повечето автори изследвали този феномен (Breitmeier, 1975; Vassilev & Mitov, 1974, 1976; Lupp, Hauske & Wolf, 1976; Harwerth & Levi, 1978; Митов, 1983; Mitov, 1999; Barr, 1986; Felipe, Buades & Artigas, 1993) посочват наличните в литературата данни (Nachmias 1967; Kulikowski & Tolhurst, 1973; Tolhurst, 1975; Legge, 1978) че каналите настроени към ниска ПЧ отговарят с бърза фазична активност, докато каналите настроени към високи ПЧ демонстрират по-бавна активност от тоничен тип.

Съществуват обаче и някои данни, които се интерпретират като доводи срещу валидността на подобен многоканален модел. Parker & Salzen (1977) изтъкват факта, че в зависимостта на времето на реакция (ВР) от ПЧ не се наблюдава никаква по-рязка промяна на ВР при определена ПЧ, каквато би могло да се очаква ако става дума за преход от един тип към друг тип механизми. Освен това, Thomas, Fagerholm & Bonnet (1999) са показали, че ПЧ-ната неопределеност, т.е. представянето на решетките с различна ПЧ в случаен и неизвестен за изследваното лице ред, няма ефект върху ВР за откриване на решетките. Това също е дало основания да се предположи, че ВР при различни ПЧ се определя не от различни механизми, а от един единствен такъв настроен към широка лента от ПЧ. Освен това, Saleh & Bonnet (1998) привеждат данни, че всички ВР измерени при различни стойности на ПЧ и контраста конвергират към една единствена функция на Pignon (зависимостта на ВР от

контраста) ако в качеството на независима променлива на тази функция се вземе производението на контраста и пространствения период на решетките. От това според тях следва, че ПЧ няма самостоятелен ефект върху ВР, а е компонент на т. нар. „локален интензитет“ и свързан с вероятностната пространствена сумация между отделните единици реагиращи на светлинни инкременти и декременти.

Важността на въпроса за времевата организация на зрителните процеси от една страна и наличието на противоречащи си данни за механизмите определящи тази организация като последователна във времето са и основната причина за проведените в тази дисертация изследвания.

2. Цел и задачи.

Целта на настоящата работа е да се проведе подробно изследване на зависимостта на времето на реакция от пространствената честота при различни нива на надпрагов контраст и ширина на стимулите. Получените данни да бъдат интерпретирани в подкрепа на някой от двата типа модели, обясняващи влиянието на ПЧ върху относителната латентност на зрителното възприятие – едноканален и многоканален. За постигането на

целта бяха поставени следните задачи:

1) Изследване на зависимостта на ВР от ПЧ при различни нива на контраст с оглед търсенето на доказателства че при определени ПЧ се осъществява преход от един тип механизми към друг тип

2) Изследване на времесумационните свойства на механизмите отговорни за ВР чрез:

а) вариране продължителността на стимулите при една и съща контрастна „енергия“

б) вариране продължителността на фронта на тяхното включване.

3) Изследване на ефекта на ПЧ-на неопределеност върху ВР.

4) Измерване на ВР към стимули решетки с фиксиран брой периоди при различни ПЧ и контраст, като диапазонът на изменение на контраста да бъде достатъчно широк и еднакво число пъти над съответните прагове за откриване.

5) Изследване ефекта на ширината на тестовите решетки както и на броя цикли в тях върху ВР, с оглед установяване кой от тези два параметъра е определящ за ВР.

3. Методика.

3.1. Апаратура.

Стимулите бяха генерирани с помощта на апаратура, разработена в нашата лаборатория. Тя бе управлявана от персонален компютър, който изчисляваше в цифров вид всяка стойност на стимула (яркостта на всеки ред), управляваше останалата апаратура, така че да бъде осъществена съответната психофизична процедура и записваше резултатите от експеримента (Mitov & Gigov, 1987). Стимулите бяха представени на екрана на монитор Tektronix 608 (фосфор P4). Кадровата честота можеше да заема 4 стойности – 125, 250, 500 и 1000 хц, а броят на редовете съставляващи изображението ~ 1000 . В експериментите включени в настоящата дисертация бе използвана кадрова честота 1000 хц. Средната

стойност на яркостта върху екрана беше 50 cd/m^2 , като не се променяше от включването и изключването на стимула.

Апаратурата се състоеше от следните устройства:

3.1.1. Блок за синхронизация и развивка.

Този блок генерираше трионообразни сигнали, които подадени на X и Y входовете на монитора осъществяваха наличието на raster върху неговия екран. В основата му стоеше кварцово стабилизиран генератор с честота 1 мхц от който се изработваха трионообразните сигнали за редовата развивка, а след делене на тази честота на 1000 – сигналите и за кадровата развивка. При по-ниски честоти на развивка (500, 250 и 125 хц) честотата на тактовия кварцов генератор се делеше съответно на 2, 4 или 8. По такъв начин в един кадър се съдържаха 1000 реда, като продължителността на един кадър бе 1, 2, 4 или 8 мсек, т.е. кадровата честота бе 1000, 500, 250 или 125 кадъра в секунда. Сигналът от този блок се подаваше към монитора посредством свръхбързи буфери с импеданс 50 ом, така че да е налице пълно съгласуване с входния импеданс на монитора, както и с вълновото съпротивление на свързващия кабел. По такъв начин се избягваше и наличието на отразен сигнал, който също можеше да влоши картината.

Блокът за синхронизация и развивка генерираше и гасящи импулси по време на обратния ход по редове и кадри, които се подаваха на бланкиращия вход на монитора. Това се осъществяваше също посредством буфери с импеданс 50 ом, с цел пълно съгласуване с входния импеданс на монитора и вълновото съпротивление на свързващия кабел. По такъв начин гасящите импулси съпадаха по време точно с обратния ход на лъча и не се наблюдаваше пълно или частично гасене на лъча по време на началото на правия ход, когато се представят стимулите.

Изработените от този блок гасящи импулси по кадри се използваха като тактови сигнали за управление на 10 канален цифров таймер, който от своя страна управляваше времевата последователност на стимулацията (включване и изключване на различните използвани видеосигнали). По този начин комутацията на видеосигналите ставаше по време на обратния ход по кадри, когато лъчът на екрана е загасен и преходните процеси от комутацията на видеосигнала не се наблюдават.

3.1.2. Генератор на пространствено-периодични зрителни стимули.

Това устройство представлява двуканален генератор на периодични електрически сигнали, тригирани от кадровите гасящи импулси създавани от блока за синхронизация и развивка (3.1.1.). В основата му лежат статична памет, цифро-аналогов преобразувател (ЦАП), както и система за управление, като генераторът е с осем битова резолюция. В режим на програмиране на генератора компютърът изчислява последователно стойностите на сигнала съответстващи на яркостта на всеки ред от стимула (общо 1000 стойности) и ги записва в паметта на генератора. Тази памет е организирана като 16 страници по 1 килобайт, като във всяка страница 24 адреса остават неизползвани. В режим на четене, т.е. когато се представя стимул, с началото на всеки редови гасящ импулс се извиква пореден адрес от паметта и информацията прочетена от този адрес се подава на ЦАП, който я преобразува в електрически сигнал със съответната амплитуда. Този сигнал се подава на видео (Z) входа на монитора и по такъв начин модулира яркостта на съответния

ред от растера върху екрана. Четенето на информацията от адресите на паметта започва от началото на обратния ход по редове за да има достатъчно време тази информация да бъде прочетена и след това преобразувана в аналогов видеосигнал до приключването на обратния ход по редове, т.е. когато лъчът е загасен. В противен случай по време на правия ход по редове биха се наблюдавали промени в яркостта на всеки ред, предизвикани от преходните процеси съпътстващи четенето на паметта и преинициализацията на ЦАП. Изходът на ЦАП е снабден с буферен свръхбърз повторител с изходен импеданс 50 ом, така че да е налице пълно съгласуване с входния импеданс на монитора и вълновото съпротивление на свързващия кабел. Четенето на паметта на генератора може да започва при всеки кадър от един и същ адрес, като по този начин стимулите върху екрана са неподвижни, а чрез избора на този адрес да се определя пространствената фаза на стимула спрямо определена точка върху екрана (обикновено центъра). Това четене може и да започва при всеки кадър от различен адрес (напр. нарастващ или намаляващ с дадена стъпка) и по този начин да се реализира движение на стимула в една или друга посока перпендикулярно на редовете на растера, както и с различна скорост. При необходимост четенето на адресите на паметта може да се осъществява и от кадровите гасящи импулси като по този начин се генерира сигнал променящ се по зададен от нас начин във всеки отделен кадър, който може да се използва за модулирането на видеосигнала във времето (напр. единият канал работи в режим на четене от редовете гасящи импулси, т.е. генерира видеосигнал, а другият – в режим на четене от кадровите гасящи импулси, т.е. генерира модулиращ сигнал, променящ амплитудата на видеосигнала генериран от първия канал). По такъв начин е възможно контрастът на стимула генериран от първия канал да се модулира във времето по най-различни закони от втория канал, програмиран да реализира тези закони. Определянето на канала който се програмира, страницата от него, режима на работа на генератора (програмиране или четене), началният адрес от който се започва четенето при всеки кадър, т.е. пространствената фаза, стъпката и посоката с която тази фаза се променя при всеки кадър, т.е. скоростта и посоката на движение на стимулите, както и режимът на четене на паметта (от редовете или от кадровите гасящи импулси) се осъществява от системата за управление на генератора. Предвидено е също така и хардуерно управление за избор на страница от паметта посредством подаване на логическа нула на съответен вход, като при активиране на повече от един вход приоритет има по-старшият по номер вход.

3.1.3. Цифрово програмируем атенюатор.

Този блок е предназначен да регулира посредством цифрови команди амплитудата на създадения от генератора на пространствено-периодични зрителни стимули (3.1.2) видеосигнал. Това е необходимо, за да може да се регулира контрастът на стимулите в широки граници. Промяната на амплитудата на сигнала може да бъде постоянна и адаптивна, т.е., зависи от експерименталните условия или от отговора на изследваното лице. Това е така напр. при измерването на прагов контраст по метода на “стълбицата“, широко прилаган в настоящето изследване.

В основата си цифрово програмируемият атенюатор представлява CMOS цифрово-аналогов преобразувател, на който вместо референтното, строго

стабилизирано напрежение, се подава сигналът който трябва да бъде атенюиран (респ. усилен). Веднага възниква въпросът, не може ли функциите на подобни цифрово програмируеми атенюатори да се изпълняват по програмен път. Така, ако стимулт се синтезира цифрово както е в нашия случай, неговата амплитуда може да се променя чрез умножение на всяка стойност на стимула с константа или със стойност, съответстваща на определена модулираща функция. По принцип това е възможно, но е свързано с недостатъка, че колкото по-силна е зададената атенюация, толкова повече се намалява разрядността (броят битове) на получените изходни сигнали спрямо първоначалните и те започват да се различават все по-силно от зададената от нас първоначално функция на разпределение на яркостта върху екрана. И доколкото генерирането на видеосигналите в нашата система е с разрядност осем бита, а праговият контраст може да достига и до няколко хилядни, става ясно че програмният подход за регулиране на контраста на стимулите в тази система е неприложим.

За целта бе реализиран двуканален цифрово програмируем атенюатор, базиран на 17-битова CMOS R-2R матрица управлявана от 8-битови команди и включена във веригата за отрицателна обратна връзка на бърз операционен усилвател. Подобна структура позволява реализирането на атенюация с логаритмична стъпка, каквато се използва в повечето психофизични изследвания.

Към споменатия атенюатор бе добавен и двуканален цифрово управляем таймер, задаващ двата тестови интервала, необходими за реализирането на условията за двуинтервален принудителен избор при измерването на контрастни прагове.

3.1.4. Линеаризация на модулационната характеристика на монитора.

Известно е, че модулационната характеристика (зависимостта на яркостта върху екрана от модулиращия сигнал) на различните типове електронно-лъчеви тръби и кинескопи е силно нелинейна. Ето защо във всички системи за зрителна стимулация се използват системи за линеаризация. Това става като видеосигналът се подложи на изкривяване обратно на това което предизвиква мониторът. Подобна операция може да се осъществи по аналогов или цифров път. В използвания при изследванията включени в настоящата дисертация монитор Tektronix 608 се прилага аналогова линеаризация като за целта в усилвателя на видеосигнала е включен полупроводников диод, началната волт-амперна характеристика на който е подобна на обратната модулационна характеристика на електронно-лъчевата тръба на монитора. Въпреки това тази линеаризация е далеч от пълната такава и затова бе приложена и цифрова линеаризация. Единият от начините да се осъществи това е като изходът на цифровата памет със записани в нея стойности на яркостта която трябва бъде получена на екрана на монитора се включи към адресната шина на регистър. В самия регистър чрез шината за данни във всеки последователен адрес се записва точка по точка функцията за обратно изкривяване на сигнала, т.е. тази стойност на видеосигнала, която трябва да се подаде на видео входа на монитора така че възпроизведената яркост на екрана да съответства на стойността записана в паметта (LUT, look-up-table). Такъв метод е много удобен защото шината за данни на регистъра може да се свърже по подходящ начин с фотометриращо устройство, снабдено с аналогово цифров преобразувател (АЦП) и коригиращата нелинейна функция да се обновява периодично в зависимост от промените на параметрите на монитора.

Доколкото в използваната от нас система подобен регистър липсва, линеаризацията се извършва по програмен път, като изчислените от компютъра стойности на яркостта за всеки ред от изображението се умножават по отделните стойности на линеаризиращата функция и едва тогава се записват в паметта на генератора. Самата линеаризираща функция се получава чрез периодично измерване на модулационната крива на монитора и съответни изчисления.

3.2. Експериментални процедури.

3.2.1. Процедури за измерване на ВР.

Две различни процедури (Процедура 1 и Процедура 2) бяха използвани в тези експерименти. И при двете процедури изследваните лица сами запускаха всяка проба, натискайки ключ с левия си показалец, като това се маркираше с кратък звук (сигнал за готовност). Това спомагаше за по-добра акомодация и фиксация върху фиксационния знак разположен в центъра на екрана. *Процедура 1.* Тестовият интервал започваше 1000 msec след сигнала за готовност. По време на тестовия интервал се представяше или тестова решетка или стимул липсваше („празна проба“). Тестовите стимули и празните проби следваха равновероятно и в случаен ред. Задачата на изследваните лица бе да дадат двигателен отговор (натискане на ключ с десния показалец) колкото е възможно по-бързо само в случаите когато е бил представен стимул-решетка.

Процедура 2. Втори звуков сигнал, 500 msec след сигнала за готовност се появяваше за да маркира началото на следващия т. нар „подготвителен“ интервал. Тестовият интервал, по време на който винаги присъствуваше тестова решетка, следваше „подготвителния“ интервал. Продължителността на подготвителния период варираше случайно от 800 до 2000 ms следвайки експоненциален закон на разпределение с цел да се сведат до минимум т. нар. „антисипаторни“ отговори. Задачата на изследваните лица при тази процедура бе да натиснат ключ с десния си показалец колкото е възможно по-бързо само след като са видяли стимула.

3.2.2. Прагова процедура.

Контрастните прагове за откриване на стимулите бяха измервани по метода на двуинтервалния принудителен избор (2-IFC), комбиниран с метода на „стълбицата“. Синусоидална решетка беше представена по време на единия от тестовите интервали, а по време на другия интервал стимул липсваше, т.е. пробата бе „празна“. Стимулите бяха произволно и равновероятно разпределена между първият и вторият интервал. Двата времеви интервала бяха маркирани с краткотрайни (20 ms) тонове. Изследваното лице отбелязваше интервала, съдържащ стимул чрез натискане на съответен ключ. Контрастът се намаляваше след три последователни правилни отговора или се увеличаваше след всеки неправилен отговор с 0,094 логаритмични единици. Процедурата се провеждаше до натрупването на 12 обръщания на посоката на изменение на контраста, т.е. до натрупването на 12 прагови стойности. Изчисляваше се средна дневна стойност на прага като средна геометрична от последните 10 обръщания. Измерването се повтаряше в четири непоследователни дни и общата средна стойност се изчисляваше от всички последни 10 измерени стойности през различните експериментални сесии. 10

В повечето случаи разстоянието от което се наблюдаваше екрана бе 171

см, като при това той сключваше с окото зрителен ъгъл от 4° по ширина и 3° по височина. В някои случаи, разстоянието от което се наблюдаваше екрана се съкращаваше четири пъти, при което хоризонталният размер на екрана се увеличаваше до 16° , а вертикалният размер се запазваше на 3° с помощта на подходяща маска. Екранът беше заобиколен от поле с размери $20^\circ \times 20^\circ$, чиято яркост беше приблизително равна на средната яркост на екрана. Наблюдението при експериментите бе бинокулярно, без употребата на изкуствени зеници.

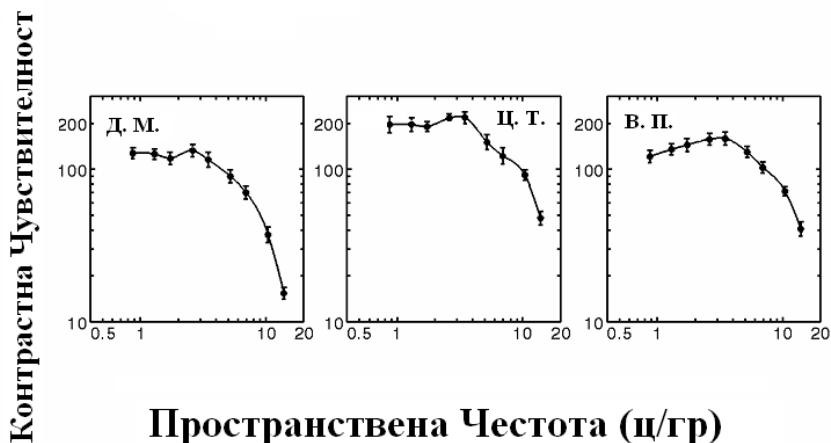
Изследваното лице седеше в удобно самолетно кресло, като главата му бе опряна в облегалката на креслото, фиксирайки по този начин разстоянието от което се наблюдаваше екрана. Лицето стартираше отделните проби и даваше своите отговори посредством клавиши разположени на двата подлакътника на креслото.

4. Зависимост на ВР за откриване на стимули-решетки от ПЧ при различни нива на надпраговия контраст. Колко канала определят ВР за откриване на стимули-решетки?

Съществуват множество данни, обясняващи нарастването на зрителната латентност с увеличаването на ПЧ както на базата на многоканален, така и с помощта на едноканален модел. Според многоканалния модел механизмите, опериращи при различни ПЧ имат различни времеви свойства, като механизмите настроени към по-високи ПЧ са по-бавни. Според повечето едноканални модели става дума за влиянието на интензитетни фактори. Всичко това показва необходимостта от оценка на броя на базисните механизми определящи зрителната латентност. Единият от подходите за това е да се търси по-рязка промяна в зависимостта на ВР от някои фактори като контраст и ПЧ.

Ако е вярна хипотезата, че две групи механизми са отговорни за ВР съответно при ниски и високи ПЧ, може да се предполага, че зависимостта на ВР и неговото стандартно отклонение (SD) от ПЧ ще се променят по форма при различни нива на контраст. По-специално, може да се очаква, че при ниски нива на контраст средната стойност на ВР и SD ще се променят рязко с промяна на ПЧ, в диапазона когато се извършва преход от един тип механизми към друг. При висок контраст би следвало да се очаква тези зависимости да бъдат гладки монотонни функции на ПЧ.

Стимулите използвани в тези експерименти бяха вертикални синусоидални решетки с ПЧ 0.87, 1.30, 1.73, 2.60, 3.47, 5.20, 6.93, 10.40 и 13.87 ц/гр. Решетките бяха модулирани по контраст с вертикален едномерен Гаусов прозорец с пространствена константа (σ) пропорционална на пространствения период на решетката, в случая 0,67 и 2.70 от този период за всяка конкретна ПЧ (0.67/ПЧ и 2.70/ПЧ). Гаусовият прозорец бе центриран в точката на фиксация, като решетките бяха в нулева фаза спрямо тази точка. Контрастът на стимулите бе 2, 4, 8, 16 и 32 пъти над съответния праг за откриване на решетките, измерен при ширина на стимулите 0.67 пространствени периода в предварителен експеримент с всяко едно от изследваните лица. Продължителността на стимулите бе 340 мс.



Фиг. 1. Зависимост на контрастната чувствителност за откриване на стимули-решетки от ПЧ. Отделните панели съответстват на трите изследвани лица, Д.М., Ц.Т. и В.П. Вертикалните линии представляват 95% доверителни интервали.

Три лица на възраст 55 (Д.М.), 26 (Ц.Т.) и 23 (В.П.) с нормална или коригирана до нормалната (6/6) зрителна острота, участваха като изследвани лица.

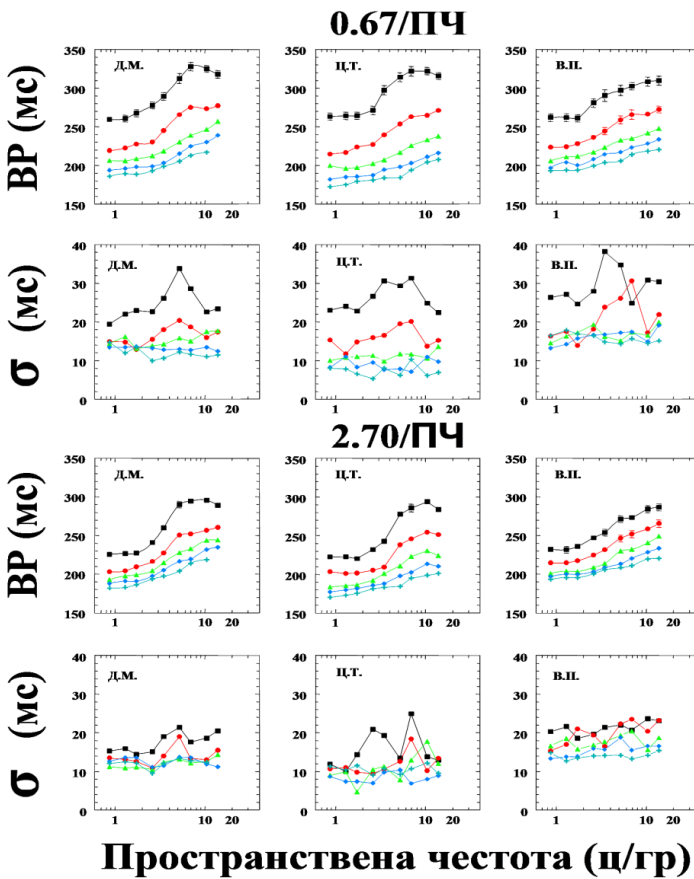
Резултатите от измерванията на контрастните прагове за откриване на тестовите решетки са показани **на Фиг. 1.**

Трите панела, съответстващи на данните получени с трите изследвани лица, Д. М., Ц.Т и В.П. показват контрастната чувствителност за откриване като функция на тяхната ПЧ. Данните позволяват да се определи контраста на решетките, използвани в експеримента за измерване на ВР като 2, 4, 8, 16 и 32 пъти над съответния праг за откриване за всеки наблюдател и всяка ПЧ.

Резултатите от измерванията на ВР са показани **на Фиг. 2.** Горните три панела за всяка използвана стойност на Гаусовия прозорец представляват стойностите на средното ВР като функция на стимулите, а долните три панела показват стойностите на средно-квадратичното отклонение (1σ) на ВР като функция от стимулната ПЧ. Както се вижда от **Фиг. 2.** при ниски стойности на контраста, 2 и 4 пъти над

прага за откриване, зависимостта на ВР от ПЧ е „S“-образна функция с два плато, различаващи се по ВР с 50-60 мс и преход между тях при ПЧ в диапазона 3 – 7 ц/гр. При по-висок контраст зависимостта на ВР от ПЧ е монотонно нарастваща функция без какъвто и да е по-рязък преход между две плато. Тези две различни функции на ВР от ПЧ са в добро съответствие със зависимостите на средно-квадратичното отклонение (SD) от ПЧ (долните панели). При ниски стойности на контраста средно-квадратичното отклонение нараства значително за ПЧ в диапазона от ПЧ 3 - 7 ц/гр и това съвпада с прехода на ВР от едно плато към друго. Статистическата значимост на промените на средно-квадратичното отклонение бе оценено с помощта на F-критерия. Установено бе, че тези промени са значими ($F > F_{0.05}$) само в диапазона 3 – 7 ц/гр и при нисък контраст (2 - 4 пъти над прага за откриване), където това отклонение отбелязва максимум и където се наблюдават и по-резки промени във ВР като преход от едно плато към друго. При по-висока стойност на контраста, стойността на средно-квадратичното отклонение не показва наличие на екстремуми в целият ПЧ-ен диапазон, както и статистически значими промени.

При представяне на стимул-решетка с нисък контраст може да се предполага, че за всяка ПЧ се активират един или най-много малка група канали, избирателно настроени към тази и съседни ПЧ, като най-чувствителният от тези канали определя праговият контраст за откриването на стимула. В този случай може да се предполага, че този най-чувствителен канал пръв достига критичното ниво и по този начин би следвало да определя и ВР. Наличието на две нива на ВР на **Фиг. 2.** може да се интерпретира като доказателство за наличието на две групи от механизми с различна латентност, които определят ВР. В зависимост от ПЧ, този канал може да принадлежи или към фазичния (при ниски ПЧ) или към тоничния (при високи ПЧ) път. Доказателство, че ВР може да се определя както от фазични, така и от тонични механизми следва от данните на Harwerth & Levi (1978), които показват че при междинни стойности на ПЧ и някои други определени условия зависимостта на ВР от контраста (функцията на Pieron) е двуфазна. Пикът на средно-квадратичното отклонение, наблюдаван за междинни стойности на ПЧ – 3÷ 7 ц/гр



Фиг. 2. Горните 3 панела за всяка използвана ширина на Гаусовия прозорец, 0.67 и 2.70 пъти пространствения период показват средна стойност на ВР като функция на ПЧ, долните три панела за всяка ширина – стандартно отклонение (SD) на ВР като функция на ПЧ.

в нашите експерименти, може да се дължи на факта, че в рамките на тази ПЧ-ен диапазон, контрастната чувствителност на двата типа механизми е сравнително близка по стойност и ВР във всяка проба би могла да се определи или от фазичния или от тоничния механизъм, в зависимост от шумовете и флукуациите в невронните отговори. При висок контраст, поради припокриване на функциите на контрастната чувствителност на фазичния и тоничния механизъм и двата механизма биха могли да отговарят в широк диапазон от ПЧ. И тъй като фазичният механизъм е по-бърз, би могло да се очаква че той определя ВР както за ниски, така и за по-високи ПЧ, независимо че отговорът му за високи ПЧ е по-слаб от тази на тоничния механизъм. Резултатите на **Фиг. 2.** може да се считат за подкрепящи такава хипотеза.

При висок контраст (8-32 пъти над прага за откриване) средната стойност на ВР не е независима от ПЧ, както може да се очаква, ако един тип механизми с постоянна латентност определя ВР за различни ПЧ, а нарастваща с ПЧ функция. Възможно е обаче да се очаква, че латентността на отделните ПЧ-ни-

канали във фазичния път да не е еднаква. В допълнение, контрастът на стимулите в нашите експерименти е избран да бъде еднакво пъти над съответния праг за откриване, измерен при относително продължителни стимул - 340ms. В този случай контрастните прагове за решетки с високи ПЧ е най-вероятно да се определят от тоничния път, доколкото той е по-чувствителен от фазичния път при високи ПЧ.

5. Време-сумационни свойства на механизмите определящи ВР за откриване на стимули-решетки.

Тестването на фазично-тоничната хипотеза относно механизмите определящи ВР при различни ПЧ би могло да стане и посредством друг подход – като се изследват времевите свойства на механизмите определящи ВР. С оглед на изказаната по-горе хипотеза, че ВР при различни ПЧ се определя от два различни или от един тип механизми в зависимост от контраста, би могло да се изследват време-сумационните свойства на зрителната система по отношение на ВР при различни нива на контраст. Това очевидно не може да бъде извършено само чрез варирането на продължителността на стимула, доколкото получените резултати ще зависят силно от избрания стимулен надпрагов контраст.

Една от възможностите да се оценят директно време-сумационните свойства на механизмите, определящи ВР произтича от дефиницията на закона на Блох, определящ времето за пълна сумация, като тази критична продължителност, до която ВР не се променя ако произведението на контраста и стимулната продължителност е постоянна величина. Друга възможност за оценка на време-сумационните свойства на ВР, макар и не толкова директна, е свързана с изследване на ефекта на продължителността на фронта на включване на стимула върху ВР. Тези два подхода за изследване на време-сумационните способности на зрителната система по отношение на ВР бяха използвани в настоящата работа.

Стимулите бяха вертикални синусоидални решетки с ПЧ 0.87, 3.47, 10.40 и 13.87 ц/гр. Решетките бяха модулирани по контраст с вертикален едномерен гаусов прозорец с пространствена константа (σ) пропорционална на пространствения период на решетката, в случая 0.67 от този период за всяка конкретна ПЧ (0.67/ПЧ). Гаусовият прозорец бе центриран в точката на фиксация, като решетките бяха в нулева фаза спрямо тази точка. Продължителността на стимулите варираше в диапазона 5 ÷ 80 мс. При всички използвани стимулни продължителности, произведението на контраста и продължителността, т.е. т.н. контрастна „енергия“ бе постоянна величина. Бяха използвани три различни стойности на контрастната „енергия“ – 0.15, 0.45 и 0.75 лог.ед. над праговата стойност на тази „енергия“ измерена в предварителни експерименти за всяко от изследваните лица. С едно от изследваните лица - Ц.Т. при ПЧ 13.87 ц/гр бе използвана и четвърта стойност на праговата „енергия“ – 0.30 лог.ед. над съответната прагова стойност.

В експериментите, в които се изследваше ефектът на продължителността на фронта на включване на стимулите върху ВР бяха използвани две вертикални синусоидални решетки с ПЧ 0.87 и 13.87 ц/гр като пространствената константа на Гаусовата апертура отново бе 0.67 пространствени периода на решетките. Гаусовата апертура бе центрирана в точката на фиксация, като решетките бяха в нулева фаза спрямо тази точка. Когато стимулите се включваха рязко (в рамките

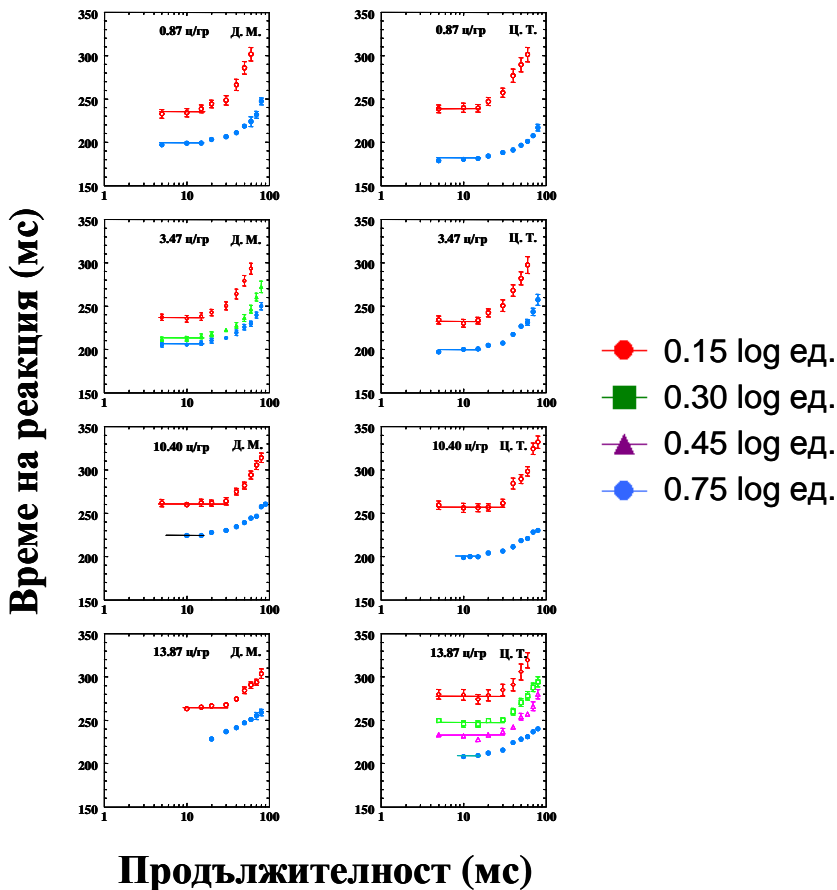
на един кадър), продължителността им бе 340 мс. Когато стимулите се включваха плавно, техният контраст първоначално нарастваше линейно от нула до зададената стойност, която след това се поддържаше постоянна определено време. При изключване на стимулите, техният контраст спадаше линейно до нулева стойност със същата скорост, както и при включването им. Продължителността на фронта на включване и изключване заемаше следните стойности 30, 60, 90, 120 и 150 мс, като общата продължителност на стимулите бе 370, 400, 430, 460 и 490 мс, съответно. По такъв начин контрастната „енергия“ на всички използвани стимули бе постоянна. Четири различни стойности на контраста на стимулите бяха използвани в тези експерименти – 2, 4, 8 и 16 пъти над праговете за тяхното откриване, измерени в предварителни експерименти.

Стимулите бяха представени в отделни блокове. Когато се оценяваше времето за пълна сумация на механизмите отговорни за ВР отделните блокове съдържаха стимули с фиксирани стойности на ПЧ, продължителността и нивото на контрастна „енергия“. Всеки блок се състоеше от 40 проби – 20 от тях със стимули и 20 „празни“. Главните експерименти бяха предшествувани от експерименти за обучение. Бяха събирани по сто стойности на ВР за всяка комбинация от стойности на ПЧ, на продължителността и нивото на контрастна „енергия“.

Когато се изследваше ефектът на продължителността на фронта на включване на стимулите върху ВР отделните блокове съдържаха стимули с фиксирани стойности на ПЧ и ниво на надпрагов контраст. В рамките на всеки блок отделните стойности на продължителността на фронта на включване следваха равномерно и в случаен ред. Всеки блок се състоеше от 40 проби – 20 от тях със стимули и 20 „празни“. Главните експерименти бяха предшествувани от експерименти за обучение. Бяха събирани по сто стойности на ВР за всяка комбинация от стойности на ПЧ, стойности на надпруговия контраст.

Две лица на възраст 55 (Д.М.) и 26 (Ц.Т.) с нормална или коригирана до нормалната (6/6) зрителна острота, участваха като изследвани лица.

Резултатите от експериментите в които се оценяваше времето за пълна сумация на механизмите отговорни за ВР са представени на **Фиг. 3**. На тази фигура е представена зависимостта на ВР за откриване на стимули-решетки от продължителността на тяхното



Фиг. 3. Зависимост на ВР за откриване на стимули-решетки от продължителността на тяхното представяне. Произведението на контраста и продължителността, т.е. контрастната „енергия“ на стимулите е постоянна величина. Двете колони от панели съответстват на двете изследвани лица участвали в този експеримент, Д.М. и Ц.Т., а отделните панели в тях - на различни ПЧ

представяне. От тази фигура ясно се вижда, че увеличаването на стимулната продължителност (при постоянна контрастна „енергия“) до определени критични стойности не променя ВР, т.е. увеличаването на продължителността на стимула напълно компенсира ефекта от намаляването на неговия контраст. Тези критични продължителности всъщност отразяват времето за пълна сумация на механизмите определящи ВР. По такъв начин става възможно да бъде дефиниран и диапазонът на валидност на закона на Блох по отношение на ВР като максималната продължителност на стимула до която ВР не се променя ако17произведението на продължителността и

контраста на стимулите е постоянно. За продължителности по-големи от тези максимални критични стойности ВР започва да се удължава, тъй като удължаването на продължителността не може да компенсира ефекта от намаляването на контраста. При тези продължителности, подобно на контрастния праг, промените на ВР може да се опишат като функция на произведението на контраста и продължителността повдигната на степен $\frac{1}{2}$, т.е. и при ВР е в сила законът за непълна времева сумация на Pieron.

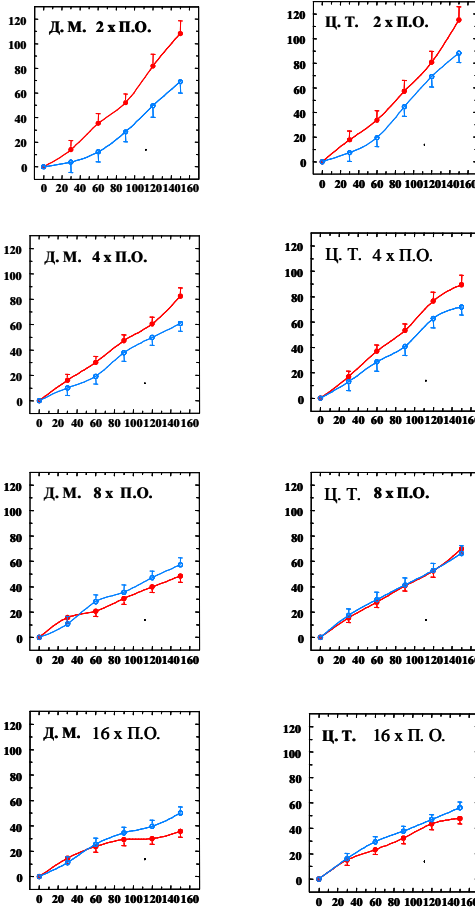
Критичният интервал на пълна времева сумация бе определен като максималната продължителност, до която наклонът на линията на най-малките квадрати прекарана през експерименталните точки е нулев. За тази цел бе проверявано последователно до коя от първите 2, 3 4 и т.н. най-кратки продължителности наклонът на линията на най-малките квадрати, прекарана през експерименталните точки, не се различава статистически от нула. Тези линии на най-малките квадрати са представени на **Фиг.3** с плътни линии, като стойността на абсцисата на десния край на тези линии съответства на времето за пълна сумация.

Вижда се, че при ниски ПЧ (0.87 и 3.47 ц/гр) времето за пълна сумация е 15 мс, като това време е едно и също при различни нива на контрастна „енергия“. При високи ПЧ (10.40 и 13.87 ц/гр) обаче, времето за пълна сумация зависи от нивото на контрастната „енергия“. Това време е 30 мс при по-ниска контрастна „енергия“ (0.15 ÷ 0.45 лог.ед. над прага за откриване) и намалява до 15 мс при по-висока контрастна „енергия“ (0.75 лог.ед. над прага за откриване).

Резултатите от експериментите в които се изследваше ефектът на продължителността на фронта на включване на стимулите върху ВР са представени на **Фиг. 4**. На тази фигура ефектът на продължителността на фронта на включване върху ВР е изразен като разлика между ВР измерено при дадена продължителност на този фронт, $ВР_n$ и $ВР_0$ измерено при рязко включване, $ВР_p$, като е нанесен по ординатата на **Фиг.5.2**. Абсцисата представлява продължителността на този фронт. Двете колони от панели на тази фигура се отнасят за двете изследвани лица участвали в този експеримент, а отделните панели – за различните нива на надпрагов контраст.

От тази фигура добре се вижда, че при по-нисък околопрагов контраст (2 и 4 пъти над прага за откриване) увеличаването на продължителността на фронта на включване на решетките от 0 до 60 мс удължава ВР за високата ПЧ, 13.87 ц/гр в по-малка степен, отколкото за ниската ПЧ, 0.87 ц/гр. При по-големи продължителности на фронта на включване, 60 ÷ 150 мс, ефектът на продължителността на този фронт нараства приблизително еднакво и за ниската, 0.87 ц/гр, и за високата ПЧ, 13.87 ц/гр. Вижда се, също така, че при по-висок надпрагов контраст на стимулите, 8 и 16 пъти над прага за откриване, ефектът на фронта на включване, $ВР_n - ВР_p$, нараства еднакво и за двете ПЧ при всички стойности на продължителността на този фронт.

$VP_d - VP_0$ (мс)



● 0.87 ц/гр
○ 13.87 ц/гр

Продължителност на фронта (мс)

Фиг. 4. Ефект на продължителността на фронта на включване на стимул-решетка (дефиниран като разликата между VP при дадена продължителност на този фронт, VP_n и VP при рязко включване, VP_p) върху VP . Запълнените символи се отнасят за ПЧ 0.87 ц/гр, а незапълнените символи – за ПЧ 13.87 ц/гр. Двете колони от панели на тази фигура се отнасят за двете изследвани лица участвали в този експеримент, Д.М. и Ц.Т., а отделните панели в тях – за различните нива на надпрагов контраст.

Резултатите получени от тези изследвания показват, че времето за пълна сума на механизмите отговорни за VP при нисък надпрагов контраст е около 15 мс за стимули с ниска ПЧ, $0.87 \div 3.47$ ц/гр и около 30 мс – за стимули с висока ПЧ, $10.40 \div 13.87$ ц/гр. При висок контраст обаче, времето за пълна сума за стимули с ниска ПЧ не се променя и е отново около 15 мс, докато за стимули с висока ПЧ се

съкращава и достига това за ниски ПЧ – около 15 мс.

Експериментът, в който бе изследван ефектът на продължителността на фронта на включване на стимул-решетка върху ВР за неговото откриване също дава основания да се предполага, че времето за сумация на механизмите отговорни за ВР при ниски ПЧ е по-късо отколкото това за високи ПЧ, когато надпраговият контраст е нисък, 2 и 4 пъти над прага за откриване. Това следва от по-значимия ефект на продължителността на фронта на включване при ниски ПЧ отколкото при високи ПЧ при нисък надпрагов контраст. Отново както и в директния експеримент за измерване на времето за сумация на механизмите отговорни за ВР са налице основания да се счита че при висок надпрагов контраст времето за сумация при високи ПЧ се съкращава и изравнява с това за ниски ПЧ. Това следва от факта, че при висок надпрагов контраст, 8 и 16 пъти над прага за откриване ефектът на продължителността на фронта на включване върху ВР е един и същ и за ниски, и за високи ПЧ при всички стойности на този фронт.

Съществуват две възможности за обяснение на тези резултати. Едната от тях е да се предположи, че един и същ механизъм е отговорен за ВР както при ниски, така и при високи ПЧ, като в зависимост нивото на контраст този механизъм да се пренастройва, при това в различна степен за различните ПЧ. Другата възможност е тази, която бе описана по-горе (т.4) и е свързана с наличието на два типа механизми, фазични и тонични, с различни пространствено-времени свойства. Както вече бе коментирано, при нисък надпрагов контраст в зависимост от ПЧ отговарят само или фазични (при ниска ПЧ), или тонични (при висока ПЧ) механизми. Поради тази причина времето за сумация на механизмите определящи ВР при нисък контраст е по-дълго за високи ПЧ, отколкото за ниски ПЧ. При висок надпрагов контраст заради припокриването на ПЧ-ните ленти на пропускане на фазичните и тонични механизми и двата типа отговарят в широк диапазон от ПЧ. Така става възможно ВР и към значително високи ПЧ да се определя от фазичните механизми, независимо че техният отговор към тези високи ПЧ е по-слаб, просто защото този отговор е по-бърз от този на тоничните механизми.

6. Пространствено-честотна неопределеност и ВР за откриване на стимули-решетки.

В началото бяха отбелязани данните на Thomas, Fagerholm & Bonnet (1999), изследвали ефекта на ПЧ-ната неопределеност върху ВР за откриване на стимули-решетки. Този подход се базира на предположението, че когато сигналите необходими за изпълнение на определена задача идват по един от няколко алтернативни канала, изпълнението е по-добро, когато наблюдателят знае предварително какъв стимул ще бъде представен и съответно кой канал ще обработва информацията, т.е. в условия на определеност, отколкото когато стимулите и съответния канал са неизвестни, т.е. в условия на неопределеност (Ball & Sekuler, 1980; Davis & Graham, 1981).

Съгласно тези данни (Thomas, Fagerholm & Bonnet, 1999) не е наблюдаван ефект на ПЧ-ната неопределеност върху ВР за откриване на стимули-решетки, т.е. може да се предполага, че един единствен механизъм определя ВР в условията на това изследване. Особеност на това изследване е, че стимулите са били с

ниска и средна ПЧ ($0.72 \div 6.51$ ц/гр), с рязък във времето фронт на включване и изключване и са били представяни на 3° вляво или вдясно от точката на фиксация. Подобен начин на стимулиране би могъл да бъде по-ефективен за единия от двата типа канали, а именно фазичния. Освен това, контрастът на стимулите в тези изследвания е бил фиксиран на пет, относително високи в сравнение с праговете за откриване, нива в диапазона $0.054 \div 0.673$. В подобни условия е възможно е да се очаква, че ефектът на ПЧ-ната неопределеност върху ВР би могъл да бъде твърде незначителен.

В настоящите експерименти бе изучаван ефектът на ПЧ-ната неопределеност върху ВР разширявайки ПЧ-ния диапазон на използваните стимули до по-високи стойности – 13.87 ц/гр. Стимулите бяха представени в центъра на зрителното поле, а в някои случаи тяхното включване и изключване при по-високи ПЧ бе не само рязко във времето, но и плавно, с линейно нарастващ и намаляващ контраст. По този начин, пространствените и времеви свойства на стимулите бяха съгласувани максимално с пространствените и времеви свойства на фазичните и тонични механизми в зрителната система. Използваните стимули с различна ПЧ бяха с контраст еднакво пъти над съответните прагове за откриване в диапазона от 2 пъти праговите стойности до 8 пъти праговите стойности.

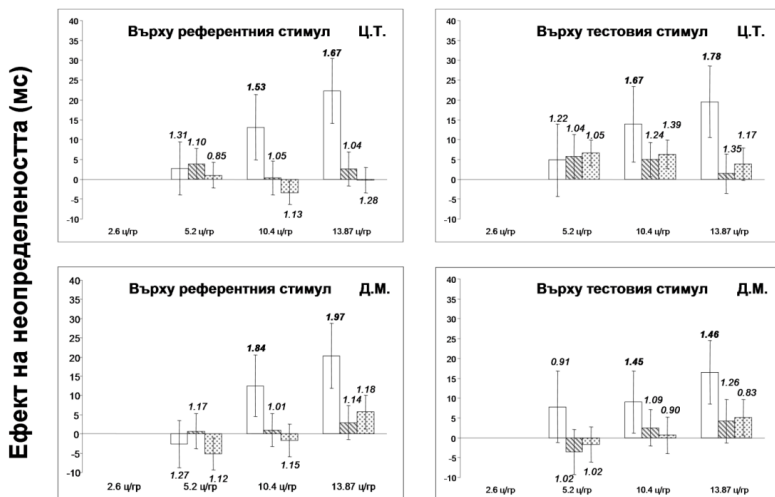
Стимулите в тези експерименти бяха вертикални синусоидални решетки с ПЧ 0.87, 2.60, 5.20, 10.40 и 13.87 ц/гр. Решетките бяха модулирани по контраст с вертикален едномерен Гаусов прозорец с пространствена константа (σ) пропорционална на пространствения период на решетката, в случая 0,67 от този период за всяка конкретна ПЧ (0.67/ПЧ). Гаусовият прозорец бе центриран в точката на фиксация, като решетките бяха в нулева фаза спрямо тази точка. Стимулният контраст бе 2, 4 и 8 пъти над съответните прагове за откриване при всяка ПЧ, измерени в предварителни експерименти с всяко изследвано лице. В повечето експерименти стимулите бяха представени за 340 мс с рязко във времето включване и изключване. При някои експерименти за решетки с ПЧ от 2.60, 5.20, 10.40 и 13.87 ц/гр контрастът на стимулите нарастваше линейно от нула до зададената стойност за 150 мсек, а след това запазваше тази стойност за 190 мсек, като намаляваше отново линейно до нула за 150 мсек. По този начин контрастната "енергия" бе същата както "енергията" на стимулите с рязко включване и изключване.

Стимулите бяха представени в отделни блокове, като във всеки блок надпраговият контраст на стимулите бе фиксиран. Всеки блок се състоеше от 20 стимула и 20 "празни" проби. При някои експерименти (в условията на ПЧ-на определеност), се представяше само една ПЧ. В други експерименти (в условията на ПЧ-на неопределеност), бяха представяни стимули с две различни ПЧ, като те се редуваха равновероятно в случаен ред. Едната от тези ПЧ винаги бе с най-ниската ПЧ, 0.87 ц/гр, наречена "референтна" ПЧ. Другата ПЧ, наречена "тестова" ПЧ, бе една от тези с по-висока ПЧ - 2.60, 5.20, 10.40 или 13.87 ц/гр. В този случай, блокът се състоеше от 10 референтни, 10 тестови стимули и 20 празни проби. Различните блокове (при условия на „определеност“ и „неопределеност“), както и комбинациите от "референтна" и "тестова" ПЧ следваха₂₁ в случаен и балансиран ред. Главните експерименти бяха предшествувани от експерименти за обучение. Бяха събирани

по сто стойности на ВР за всяка комбинация от стойности на ПЧ, контраст, както и в условията на ПЧ-на определеност или неопределеност.

Две лица на възраст 55 (Д.М.) и 26 (Ц.Т.), с нормална или коригирано до нормалната (6/6) зрителна острота, участваха като изследвани лица.

Данните, получени от експериментите за изследване на ВР са представени на **Фиг. 5** и **Фиг. 6**. **Фиг.5** съответства на случая, когато и референтният, и тестовият

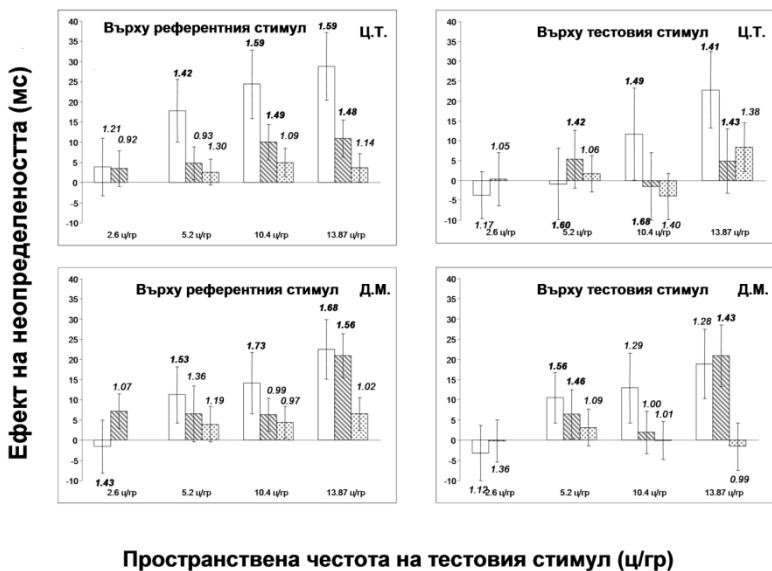


Пространствена честота на тестовия стимул (ц/гр)

стимули са

Фиг.5. Ефект на ПЧ-ната неопределеност върху ВР за откриване на стимули-решетки. Референтният и тестовият стимули са с рязък във времето включване и изключване. представяни с рязък фронт на нарастване (включване) и намаляване (изключване) на контраста. **Фиг. 6.** съответства на случая, когато референтният стимул с ПЧ 0,87 ц/гр е с резки фронтове на включване и изключване, а тестовият стимул с ПЧ 2,60, 5,20, 10,40 или 13,87 ц/гр е с плавни фронтове на включване и изключване. На тези фигури е представен ефектът на ПЧ-ната неопределеност върху ВР като функция на изследваната ПЧ. Ефектът на неопределеността се изчислява като разлика между средната измерена стойност на ВР при условия на ПЧ-на неопределеност за всяка ПЧ и средната стойност на ВР за същата ПЧ измерена в условия на ПЧ-на определеност. Трите различни колони, представени за всяка тествана ПЧ съответстват на трите надпрагови контрастни нива, използвани в това изследване. Вертикалните линии представляват 95%-ните доверителни интервали на средните стойности на ВР. Съотношението на дисперсията (SD^2), измерено в условия на ПЧ-на неопределеност и дисперсията, измерена в условията на ПЧ-на определеност за всеки стимул е

представена като число в близост до съответната колона.



Фиг.6. Ефект на ПЧ-ната неопределеност върху ВР за откриване на стимули-решетки. Референтният и тестовият стимули са с плавно във времето (150 мс) включване и изключване

Може да се види (Фиг. 5), че ПЧ-ната-неопределеност няма статистически значим ефект върху средната стойност на ВР за откриване на стимулите (ефектът на неопределеността не се различава съществено от нула) при по-високо контрастни стимули - 4 и 8 пъти над прага за откриване за всички изследвани ПЧ (шрихованите и пунктираните колонки). При най-ниския стимулен контраст - 2 пъти над прага за откриване обаче, ПЧ-ната неопределеност има ефект като повишава средните стойности на ВР както за референтния, така и за тестовия стимул, в случаите когато ПЧ на последния е била 10.40 и 13.87 ц/гр. Когато тестовите стимули са с плавен фронт на включване и изключване от 150 мс (Фиг. 6) и контрастът е нисък, 2 пъти над прага за откриване (незапълнените колони), в повечето от случаите ефект на неопределеност се наблюдава не само когато ПЧ на тестовите стимули е била 10.40 и 13.40 ц/гр, но също така и по-ниска - 5.20 ц/гр. Важно е да се отбележи, че промените в средната стойност на ВР, причинени от ПЧ-ната неопределеност са придружени и от промени в дисперсията (SD^2) на ВР. Съотношението на SD^2 измерена в условия на ПЧ-на неопределеност и SD^2 измерена в условията на ПЧ-на определеност за всяка изследвана стойност на ПЧ и контраста е представено близо до всяка съответна колона с число, като значимостта на SD^2 промяната се оценява чрез F-

критерий. Установено бе, че съотношението на дисперсиите, измерено при контраст на стимулите 4 и 8 пъти над прага за откриване, не показва статистически значима промяна за всички изследвани ПЧ, т.е. $F < F_{0.05}$ ($F_{0.05} = 1.41$). Обаче, при най-ниския стимулен контраст - 2 пъти над прага за откриване, ПЧ 10.40 и 13.87 ц/гр и при рязко включване и изключване на стимула (фиг. 6.1.), съотношението на дисперсиите е по-високо от $F_{0.05}$ ($F > 1.41$), т.е. промените в дисперсията на ВР причинени от ПЧ-ната неопределеност са статистически значими. Когато фронтовете на включване и изключване на тестовите стимули са плавни, промяната на SD^2 се оказва статистически значима не само за тестови ПЧ от 10.40 и 13.87 ц/гр, но и за по-ниски ПЧ - 5.20 ц/гр, (Фиг. 6). Нещо повече, в този случай статистически значими промени на SD^2 се наблюдават не само при най-ниската стойност на контраста от 2 пъти над прага за откриване, но също така и в някои случаи когато стимулният контраст е 4 пъти над прага за откриване.

Фактът, че ПЧ-ната неопределеност удължава ВР за откриване при нисък надпрагов контраст и не повлиява ВР при по-висок надпрагов контраст, дава основания да се предполага че при нисък контраст ВР се определя от два отделни механизма за ниски и високи ПЧ, докато при висок надпрагов контраст един механизъм определя ВР в целия изследван ПЧ-ен диапазон.

Въпросът тук е как би могло да се обясни преминаването от многоканален към едноканален начин на работа на механизмите, определящи ВР, с увеличаването на контраста. Отново, както и в Глава 4 и Глава 5 може да се предположи, че при нисък контраст един или малка група от канали настроени към съседни ПЧ се активира за всяка конкретна стойност на ПЧ на стимулацията и по този начин ВР трябва да се определя от канала, който първи достигне критично ниво на активност, т.е. от най-чувствителния. По такъв начин, бързите фазични канали, по-чувствителни към ниски ПЧ трябва да определят ВР в тази ПЧ-ен диапазон, докато по-бавните тонични канали, по-чувствителни към по-високи ПЧ би трябвало да определят ВР при по-високи ПЧ. При по-висок контраст на стимулите обаче, поради значителното припокриване на ПЧ-ните характеристики на контрастна чувствителност на фазичните и тонични механизми, те биха могли да отговорят към стимули в широк диапазон от ПЧ. По такъв начин при висок контраст, фазичният механизъм като по-бърз, би могъл да определи ВР както за по-ниски ПЧ, така и за по-високи ПЧ, независимо че отговорът му към по-високите ПЧ е по-слаб от този на тоничния механизъм.

Фактът, че ефект на ПЧ-на неопределеност се наблюдава при тестването само със стимули с по-високи ПЧ - 10.40 и 13.87 ц/гр, когато включването и изключването на стимула е с рязък фронт, както и факта, че този ефект се простира до стимули с по-ниски ПЧ - 5.2 ц/гр, когато включването и изключването става постепенно, изглежда също е доказателство в подкрепа на фазично/тоничната хипотеза относно механизмите, определящи ВР. В този случай, когато включването и изключването на стимулите е рязко във времето, стимулацията е по-ефективна за фазичния механизъм, докато при плавни във времето фронтове на включване и изключване, стимулацията е по-ефективна за тоничния механизъм.

7. Изследване на зависимостта на ВР за откриване на стимули-решетки от техния контраст (функция на Pieron). Описват ли се всички ВР получени при различни стойности на контраста и ПЧ с една „уникална“ функция на Pieron?

Като един от доводите против многоканалната хипотеза за взаимовръзката между ВР и ПЧ бяха приведени данните на Saleh & Bonnet (1998), според които би следвало да се счита, че ПЧ няма самостоятелно влияние върху ВР. Както следва от тези данни, ВР получени при различни стойности на ПЧ и контраста могат да се опишат с една единствена степенна функция, ако в качеството на аргумент на тази функция се вземе произведението на контраста и пространствения период ($P; P = 1/ПЧ$). Според цитираните по-горе автори, увеличаването на площта на стимулите (или ширината на ивиците на решетката) увеличава броя на активираните елементи (броя на фоторецепторите в оригиналното предположение), като по този начин "намалява интервала от време, след началото на стимула, през който най-малко един елемент достига критично ниво на активност". С други думи, процес на вероятностна пространствена сумация между единици отговарящи към светлинни инкременти (както и декременти при стимули-решетки) намалява ВР.

Особеност на цитираните по-горе експерименти е, че стимулите са били с контраст, вариращ в рамките на един и същ и сравнително ограничен интервал от стойности за всички използвани ПЧ. По такъв начин при по-ниски ПЧ е възможно да не са били измервани ВР за контрасти близки до праговите стойности, докато при по-високи ПЧ да липсват измервания при високо надпрагови контрасти, т.е да липсват ВР близки до асимптотичната стойност, $ВР_0$.

Друга особеност на цитираните по-горе експерименти е, че тестовите решетки с различни ПЧ са заемали една и съща част на екрана и по този начин варирането на ПЧ променя само разпределението на контраста върху екрана, без да променя стимулираната площ, като ширината на отделните ивици на стимулите и техният брой са в обратно пропорционално съотношение. Не става ясно дали промяната на броя на периодите на решетката с варирането на ПЧ може да повлияе върху ВР и по такъв начин да се прояви като допълнителен фактор въздействащ върху функциите на Pieron.

Всичко изложено до тук определи и следващата ни цел, а именно - да се измери ВР към включването на стимули-синусоидални решетки с еднакъв брой периоди при различни ПЧ и в широк диапазон на изменение на контраста, еднакво отдалечен от праговете за откриване на стимулите с различна ПЧ.

Стимулите използвани в тези експерименти бяха вертикални синусоидални решетки с ПЧ 0.87, 1.30, 1.73, 2.60, 3.47, 5.20, 6.93, 10.40 и 13.87 ц/гр. Решетките бяха модулирани по контраст с вертикален едномерен Гаусов прозорец с пространствена константа (σ) пропорционална на пространствения период на решетката, в случая 0,67 и 2.70 от този период за всяка конкретна ПЧ ($0.67/ПЧ$ и $2.70/ПЧ$). Гаусовият прозорец бе центриран около фиксационният знак като решетките бяха в нулева фаза спрямо центъра на прозореца. Стимулният контраст бе 2, 4, 8, 16 и 32 пъти над прага за откриване при всяка ПЧ, измерен за стимули с ширина 0,67 пъти периода в предварителни експерименти с всяко изследвано лице. Продължителността на стимула при измерване на прага и ВР беше 340 мс.

Стимулите бяха представени в отделни блокове, като във всеки блок надпраговият контраст на стимулите, тяхната ПЧ и ширината на Гаусовия прозорец заемаха фиксирани стойности. Когато се използваше *Процедура 1* (виж т.3.1.) всеки блок се състоеше от 40 проби – 20 от тях със стимули и 20 “празни“. Когато се използваше *Процедура 2* всеки блок се състоеше от 20 проби, всяка от тях със стимули. Главните експерименти бяха предшествувани от експерименти за обучение. Бяха събирани по сто стойности на ВР за всяка комбинация от стойности на ПЧ и

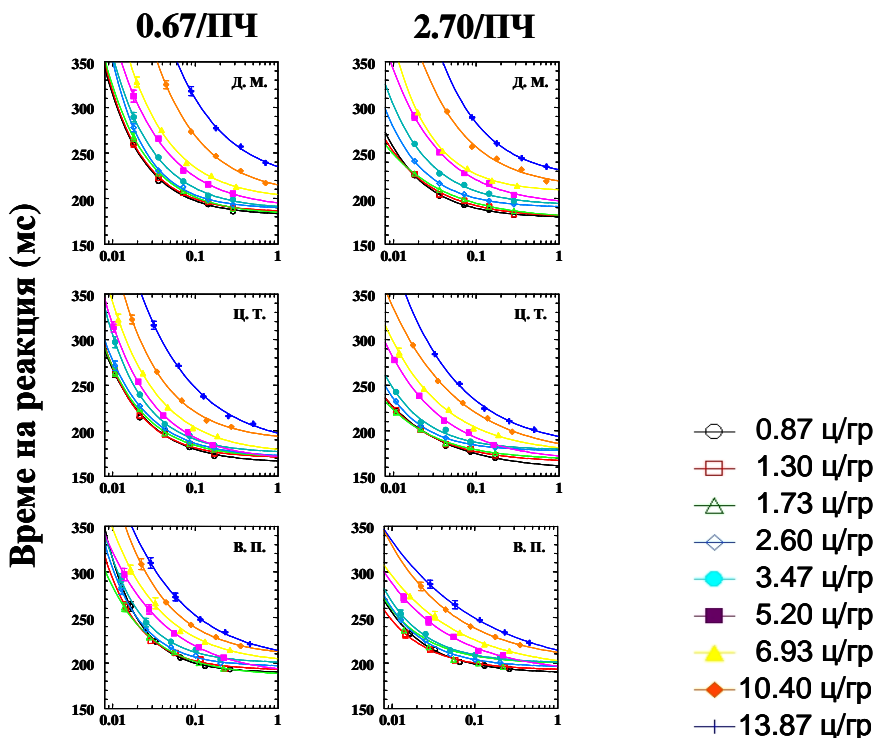
Три лица на възраст 55 (Д.М.), 26 (Ц.Т.) и 23 (В.П.) с нормална или коригирана до нормалната (6/6) зрителна острота, участваха като изследвани лица.

Ретиналният контраст за всяка ПЧ бе изчислен като екранният контраст бе редуциран с коефициент, взет от литературата (Campbell, F. W., Gubish, R. W. 1966) при размер на зеницата 4 мм (средният размер на зеницата на нашите изследвани лица при тази средна яркост на екрана на монитора).

Зависимостите на ВР от контраста на решетките върху екрана на монитора (функциите на Пиерон), получени при различни стойности на ПЧ и пространствена константа на Гаусовата апертура са представени на **Фиг. 7** като лявата колона фигури се отнася за стимули с Гаусова апертура от 0.67/ПЧ, а дясната колона – за стимули с Гаусова апертура от 2.70/ПЧ

Може да се види, че с увеличаване на екранния контраст, ВР се съкращава. Зависимостта на осредненото ВР от екранния контраст измерено за всяка ПЧ и пространствена константа на стимула (σ) може да се опише със степенна функция (функция на Пиерон) от типа:

$$\mathbf{BP} = \beta \times C^{-\alpha} + \mathbf{BP}_0, \quad (7.1.)$$



Екранен контраст

Фиг.7. Зависимост на $ВР$ от екранния контраст на стимули-решетки. Различните символи съответстват на различна ПЧ на стимулите. Лявата колона от фигури се отнася за стимули с пространствена константа на Гаусовия прозорец 0.67 пъти периода на решетките, за всяка ПЧ, дясната колона фигури – за стимули с пространствена константа - . 2.70 пъти периода на решетките, за всяка ПЧ. Различните редове съответстват на данните на трите изследвани лица – Д.М., Ц.Т. и В.П.

където $ВР$ е средната стойност на времето на реакция, C - контрастът на решетките върху екрана на монитора, α – експонента на функцията, $ВР_0$ – асимптотична стойност на $ВР$ което би могло до бъде достигнато при максимален контраст и β – скалова константа, отразяваща диапазона на изменение на $ВР$ между $ВР_0$ и максималното $ВР$ определено при прага за откриване на стимулите.

Вижда се също така, че с увеличаване на ПЧ, съответните функции се изместват към по-високи стойности на $ВР$. Статистическият анализ на съответните апроксимиращи степенни функции за $27^{\text{в}}$ решетки с ширина 0.67 пъти периода (лявата колона) показва, че степенната функция, съответстваща на най-ниската

ПЧ, 0.87 ц/гр, се различава значително ($p < 0.05$) от всички функции съответстващи на ПЧ $\geq 3,47$ ц/гр за изследваното лице Ц.Т., на ПЧ $\geq 2,60$ ц/гр за изследваното лице Д.М. и на ПЧ $\geq 1,73$ гр за изследваното лице В.П. . При по-широки решетки, 2,70 пъти периода на съответната решетка (дясната колона), статистически значима разлика се наблюдава при ПЧ 2.60 ц/гр за всичките три изследвани лица. Увеличаването на ПЧ има различни ефекти върху различните параметри на апроксимиращите функции:

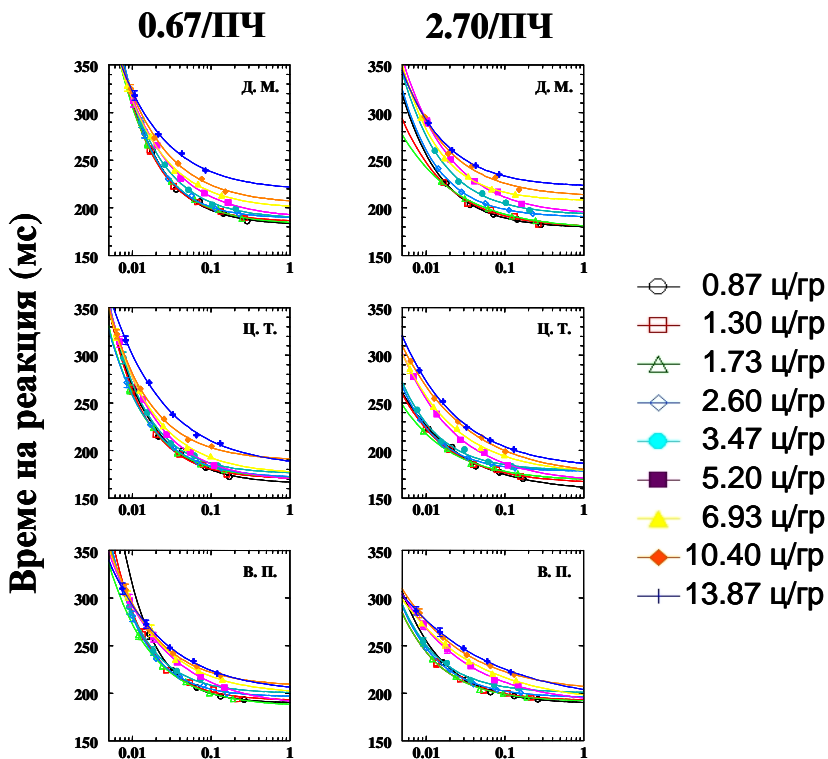
1) Средната стойност на параметъра β нараства с увеличаване на ПЧ, но промените са статистически незначими в повечето от случаите. Това може да се дължи на малкия брой експериментални точки на кривите (пет);

2) Степенният параметър α не зависи от ПЧ или леко намалява за най-високите ПЧ; средните стойности на асимптотичното време за реакция VR_0 нарастват с увеличаване на ПЧ. Статистическата значимост на този ефект, когато се сравняват стойностите на VR_0 , получени при три ниски ПЧ, 0.87, 1.30 и 1.73 с VR_0 получени при висока ПЧ, 10.40 ц/гр за стимули с Гаусов прозорец чиято пространствена константа е 0.67/ПЧ е представена в Таблица 1. Не е направено сравнение със стойностите, съответстващи на ПЧ от 13.87 ц/гр тъй като експерименталната функция, получена при 13.87 ц/гр с изследваното лице Д.М. съдържа само четири точки (2, 4, 8 и 16 пъти над прага на откриване) и определянето на VR_0 не може да бъде достатъчно точно т.е. до по-ниски стойности на контраста.

Увеличаването на пространствената константа от 0,67 до 2,70 пъти периода на решетките не променя значително средните стойности на параметъра α и на асимптотичното време за реакция VR_0 и намалява систематично параметъра β . Въпреки това, промените на β в повечето случаи са в рамките на статистическата грешка, което най-вероятно се дължи на ограничения брой (пет) на стойностите на аргумента.

Както вече беше отбелязано, една от причините за по-дълго ВР при по-висока ПЧ може да бъде по-ниската контрастна чувствителност на зрителната система за тези ПЧ. За да се компенсира влиянието на зрителната оптика върху ВР зависимостите представени на **Фиг. 7** бяха преначертани като зависимости на ВР от ретиналния контраст за всяка ПЧ и пространствена константа на стимулите (**Фиг. 8**).

Използването на ретинален, вместо екранен контраст като независим параметър на функцията на Пиерон измества функциите, съответстващи на по-високи ПЧ вляво. По този начин различните функции, съответстващи на различни ПЧ на **Фиг. 8** лежат по-близко една до друга отколкото функциите представени на **Фиг. 7**, където в качеството на независима променлива е използван екранният контраст. Статистическият анализ на апроксимиращите степенни функции за решетки с ширина 0.67 пъти периода на решетката (лявата колона) показва, че степенната функция, съответстваща на най-ниската ПЧ, 0.87 ц/гр, се различава значително ($p < 0.05$) от всички функции, съответстващи на ПЧ $\geq 6,93$ ц/гр за изследваното лице Ц.Т., на ПЧ $\geq 5,20$ ц/гр за изследваното лице Д.М. и на ПЧ $\geq 1,73$ ц/гр за изследваното лице В.П. При по-широките решетки, 2,70 пъти периода



Ретинален контраст

Фиг. 8. Зависимост на ВР от ретиналния контраст на стимули-решетки. Всички останали детайли са същите както при Фиг. 7.

Таблица 1.

Изсл. л. ПЧ _н /ПЧ _в	Д. М.	Ц. Т.	В. П.
0.87/10.40	0.050	0.070	0.004
1.30/10.40	0.035	0.038	0.063
1.73/10.40	0.016	0.033	0.008

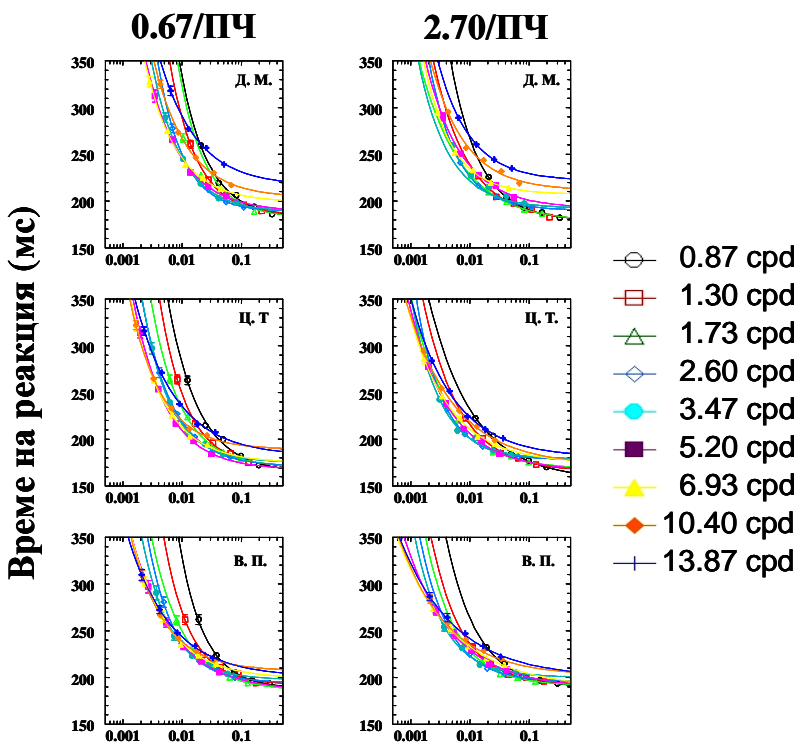
Може да се види, че в седем от случаите статистическата значимост е достатъчно висока ($p \leq 0,05$), както и че в останалите два случая е близко до критичната стойност от 0.05.

(дясната колона), статистически значима разлика се наблюдава при ПЧ $\geq 5,20$ ц/гр за изследваното лице

Ц.Т., при ПЧ $\geq 3,47$ ц/гр за изследваното лице Д.М. и при ПЧ $\geq 1,73$ ц/гр за изследваното лице В.П. Важно е да се отбележи, че замяната на екранния контраст с ретиналния като аргумент на Пиеровата функция не променя стойностите на параметъра α , както и стойностите на асимптотичното $BP - BP_0$, но намалява параметъра β . Този факт може да се предскаже по математически път доколкото ретиналният контраст за всяка отделна ПЧ е произведение на екранния контраст и константа съответстваща на контрастната атенюация на зрителната оптика. Отново, както на **Фиг. 7**, увеличаването на пространствената константа от 0.67 до 2.70 пъти периода на решетките не променя статистически значимо α , както и асимптотичното време за реакция BP_0 и намалява систематично само скаловия параметър β .

Имайки предвид експерименталната находка (Saleh & Bonnet, 1998), че BP получени при различни ПЧ и екранни контрасти, могат да се опишат посредством една единствена степенна функция, ако за аргумент на тази функция се вземе произведението на екранния контраст на решетката и нейния пространствен период, ние също представихме данните по този начин (**Фиг. 9**). Не е трудно да се види, че много от експерименталните точки, отнасящи се за различни стойности на ПЧ и контраста като че ли лежат на една обща степенна функция. Ред стойности на BP обаче, получени при по-ниските ($2 \div 4$ пъти над прага за откриване на решетките) и най-високите (32 пъти над прага) стойности на контраста се намират встрани от подобна “единствена” функция на Pi_{eqn} . Статистическият анализ на съответните криви получени при ширина на решетките 0.67 пъти техния период (лявата колона) показва, че функцията, съответстваща на най-ниската ПЧ, 0.87 ц/гр, се различава значимо ($p < 0.05$) от всички функции, съответстващи на ПЧ $\geq 1,30$ ц/гр за трите изследвани лица Ц.Т., Д.М. и В.П. При по-широки решетки, 2,70 пъти периода (дясната колона), статистически значима разлика се наблюдава при ПЧ $\geq 1,30$ ц/гр за изследваните лица Ц.Т. и В.П. и при ПЧ $\geq 6,93$ ц/гр за изследваното лице Д.М. Отново параметърът α , както и асимптотичното $BP - BP_0$ остават същите като тези на **Фиг. 7** и **Фиг. 8**, докато параметърът β променя стойността си. Този резултат също би могъл да бъде предсказан математически доколкото аргументът на апроксимиращите функции за всяка една ПЧ в този случай е произведение на екранния контраст и константа равна на пространствения период на решетките при тази ПЧ.

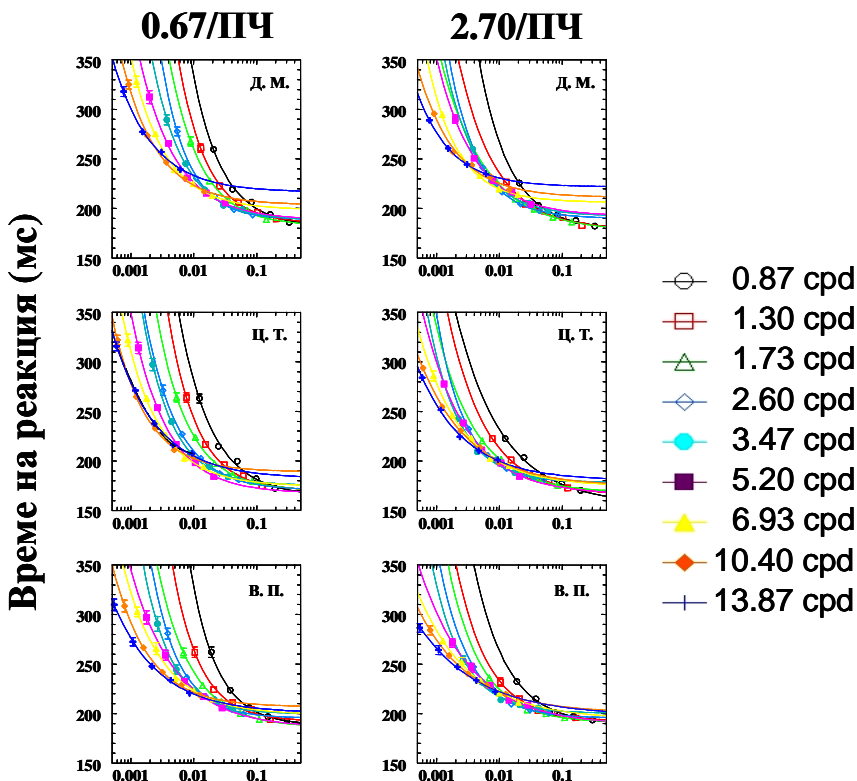
Като бе споменато, според някои автори (Vassilev, Mihaylova & Bonnet, 2002) BP измерени при различни стойности на ПЧ и контраста лежат по-близо до една “единствена” степенна функция ако в качеството на независима променлива се вземе не произведението на пространствения период и екранния контраст на стимулите, а произведението на пространствения период и ретиналния контраст. Ето защо BP,



Екранен контраст x Период

Фиг. 9. Зависимост на ВР от произведението на екранния контраст и пространствения период. Всички останали детайли са същите както при Фиг. 7.

Статистическият анализ на апроксимиращите функции при различни ПЧ показва, че функцията, съответстваща на най-ниската ПЧ, 0.87 ц/гр се различава значимо ($p < 0.05$) от всички функции, съответстващи на ПЧ ≥ 1.30 и за трите изследвани лица Ц.Т., Д.М. и В.П. при двете ширини на стимула (0.65 и 2.70 пъти периода на решетките). Тук е важно да се отбележи, че параметъра α на апроксимиращите степенни функции, както и асимптотичното ВР - $ВР_0$ са същите както и на Фиг. 7, Фиг. 8 и Фиг. 9, като само параметърът β променя своята стойност заради използването на ретиналния контраст вместо екранния. В този случаи стойностите на независимата променлива за всяка ПЧ представляват произведение на контраста и две константи – една свързана с контрастната атенюация предизвикана от зрителната оптика и друга, свързана с пространствения период на стимула.



Ретинален контраст x Период

Фиг. 10. Зависимост на ВР от произведението на ретиналния контраст и пространствения период. Всички останали детайли са същите както при Фиг. 7..

По такъв начин постоянството на два от параметрите на апроксимиращите функции, α и BP_0 при различните използвани аргументи на апроксимиращите функции и промяната само на скаловия параметър β е нещо което следва по математически път.

В настоящото изследване бе измервано ВР за откриване на стимули-решетки с различни ПЧ, контраст и ширина. Особеност на това изследване, отличаваща го от другите подобни такива, е че решетките с различни ПЧ бяха с един и същи надпрагов контраст, вариращ в широк диапазон. Това позволява изучаването на зависимостта на ВР от контраста (функцията на Pigeon) в границите на почти цялата област, в която е налице влияние на контраста върху ВР - от околопрагови стойности до такива, при които ВР е близо до асимптотичната стойност, BP_0 за всяка изследвана ПЧ. Освен това, като се има предвид изследванията на Saleh & Bonnet (1998), както и на Vassilev, Mihaylova & Bonnet (2002) бяха използвани четири различни стимулни интензитетни критерия в качеството на аргументи на апроксимиращите функции

- екранен контраст, ретинален контраст, произведението на екранния контраст и пространствения период на решетката, както и произведението на ретиналния контраст и пространствения период на решетката. Сравняването на функциите на Pieron, получени при различни ПЧ показва, че: 1) Увеличаването на ПЧ удължава ВР, като този ефект е по-значим при ПЧ, по-високи от 3.47 ц/гр; 2) Варирането на ПЧ повлиява по различен начин параметрите на апроксимиращата степенна функция - скаловият параметър β , както и асимптотичното време за реакция $ВР_0$ нарастват с повишаването на ПЧ, докато експонентата α не зависи от ПЧ или намалява слабо за най-високите ПЧ. Използването на различни стимулни интензитетни критерии в качеството на аргументи на функциите на Pieron вместо екранния контраст на стимулите не свежда тези функции, получени при различни ПЧ към една единствена такава функция. Сравняването на тези функции, получени при различни ПЧ показва, че те се различават една от друга (Фиг. 7, Фиг. 8, Фиг. 9 и Фиг. 10), когато се отнасят за достатъчно различни ПЧ. Този резултат не би следвало да се приема като изненадващ, тъй като той може да бъде предсказан математически. Всички използвани по-горе в качеството на аргументи на функциите на Pieron стимулни интензитетни критерии представляват произведение на екранния контраст и различни константи. Умножаването на аргумента на функцията с различни константи измества тази функция по абсцисата (в логаритмичен мащаб), т.е. променя скаловия параметър β , докато другите параметри – степенният показател α , както и асимптотичното ВР, $ВР_0$ остават непроменени. По този начин използването на аргументи на апроксимиращите функции, представляващи произведение на контраста върху екрана и различни константи не може да компенсира промените на другите два функционални параметъра - степенният показател α и асимптотичното ВР, $ВР_0$, наблюдавани при различни ПЧ.

Като възможна причина за несъответствие между данните на цитираните по-горе данни (Saleh & Bonnet, 1998; Vassilev, Mihaylova & Bonnet, 2002), показващи че ВР, получени при различни стойности на контраста и ПЧ конвергират към една-единствена степенна функция (при използването на различни аргументи на тази функция) и нашите резултати биха могли да се посочат няколко причини. Както бе споменато в началото на този раздел стимулите-решетки, използвани от тези автори са били с еднакъв физически контраст, вариращ в диапазона $0.025 \div 0.500$ за ПЧ от 0.5ц/гр до 16 ц/гр. Напълно е възможно в този случай те да са изследвали около праговата част на съответните функции на Pieron при високи ПЧ, докато при ниски ПЧ – части далеч от прага за откриване и по-близо до зоната на насищане. По такъв начин отделните части на съвсем различни, несъвпадащи като цяло функции на Pieron, могат да създадат илюзия за една "единствена" функция. И наистина, повечето отклонения на нашите данни от постулираната от някои автори (Saleh & Bonnet. 1998; Vassilev, Mihaylova & Bonnet. 2002) "единствена" функция на Pieron се наблюдават само при тези "крайни" стойности на контраста, които най-вероятно частично липсват в изследванията на тези автори, а именно ВР измерени при околопрагови стойности на контраста на ниски ПЧ, както и ВР измерени при високо надпрагови контрасти - при високи ПЧ. Тук е необходимо да се отбележи, че в едната от споменатите по-горе работи (Vassilev, Mihaylova & Bonnet, 2002) също се наблюдават някои

отклонения на ВР от т.нар. "единствена" функция на Пиерон при най-високия използван контраст - 0.5, стойност, при която ВР е близо до ВР₀ за ниски и средни ПЧ.

Друга възможна причина за разликата между нашите данни и тези на споменатите автори може да бъде свързана с размера на стимулите-решетки при различни ПЧ. Saleh & Bonnet (1998) , както и Vassilev, Mihaylova & Bonnet (2002) използват решетки заемащи една и съща площ върху екрана за различните ПЧ, т.е. броят периоди съдържащи се в решетката нараства с увеличаването на ПЧ. Това би могло да съкрати ВР за решетки с по-висока ПЧ, съдържащи по-голям брой периоди, в частност при ниски стойности на контраста, и по такъв начин тези ВР да се окажат по-близо до "единствената" апроксимираща степенна функция. И наистина, когато броят на периодите на стимули-решетки с различна ПЧ е фиксиран, като е в настоящото изследване, отклоненията от "единствената" степенна функция са по-големи, когато ПЧ е по-висока ($PЧ > 5.20 \div 6.93$ ц/гр), при нисък контраст ($2 \div 4$ пъти над съответните прагове за откриване), както и за стимули с по-малка пространствена константа ($\sigma = 0,67$ пъти периода).

Абсолютната ъглова ширина на стимулите-решетки или броят на периодите съдържащи се в тях при различни ПЧ са определящи за ВР за откриване и свързано ли е това влияние с контраста на стимулите е въпрос на специално изследване, описано в следващия раздел.

8. Ефект на ширината на стимулите-решетки върху ВР за тяхното откриване. Абсолютната ъглова ширина или броят на периодите в решетката определя ВР?

Като бе споменато в предходния раздел, разликата между нашите данни и тези на Saleh & Bonnet (1998) , както и Vassilev, Mihaylova & Bonnet (2002) може да бъде свързана с размера на стимулите-решетки с различни ПЧ. Добре известно е, че нарастването на броя на периодите на стимули-решетката и над 3 периода все още намалява прага на откриване (Anderson, Evans & Tibos. 1996.; Robson & Graham, 1981). Логично е да се очаква, че подобряването на откриването на стимули-решетка с увеличаване на броя на техните периоди би следвало да съкрати и ВР, особено при пониски стойности на контраста. Ето защо в настоящото изследване бе изучавано влиянието на ширината на стимули-решетки върху ВР за тяхното откриване при различни ПЧ и стойности на контраста.

Стимулите използвани в тези експерименти бяха вертикални синусоидални решетки с ПЧ 0.87, 1.30, 1.73, 2.60, 3.47, 5.20, 6.93, 10.40 и 13.87 ц/гр. Решетките бяха модулирани по контраст с вертикален едномерен Гаусов прозорец с пространствена константа (σ) пропорционална на пространствения период на решетката. За изследваните лица Д.М. и Ц.Т. тези стойности бяха: (I) 0.67 и 2.70 от периода на решетката за ПЧ 1.30, 2.60 и 5.20 ц/гр; (II) 0.67, 1.35 и 2.70 от периода на решетката за ПЧ 0.87 ц/гр; (III) 0.67, 1.35, 2.70 и 5.40 от периода на решетката за ПЧ 1.73 и 6.93 ц/гр и (IV) 0.67, 1.35, 2.70, 5.40 и 10.80 от периода на решетката за ПЧ 3.47 и 13.87 ц/гр. За изследваното лице В.П. бяха използвани само две стойности на пространствена константа на Гаусовия прозорец – 0.67 и 2.70 от периода на решетките за всичките използвани ПЧ. Гаусовият прозорец безцентриран около фиксационният знак като решетките бяха в нулева фаза спрямо центъра на прозореца.

Стимулният контраст бе 2, 4, 8, 16 и 32 пъти над прага за откриване при всяка ПЧ, измерен за стимули с ширина 0,67 пъти периода в предварителни експерименти с всяко изследвано лице. Продължителността на стимула при измерване на прага и ВР беше 340 мс.

Три лица на възраст 55 (Д.М.), 26 (Ц.Т.) и 23 (В.П.) с нормална или коригирана до нормалната (6/6) зрителна острота, участваха като изследвани лица.

Ретиналният контраст за всяка ПЧ бе изчислен по начин описан в предходния раздел (т. 7)

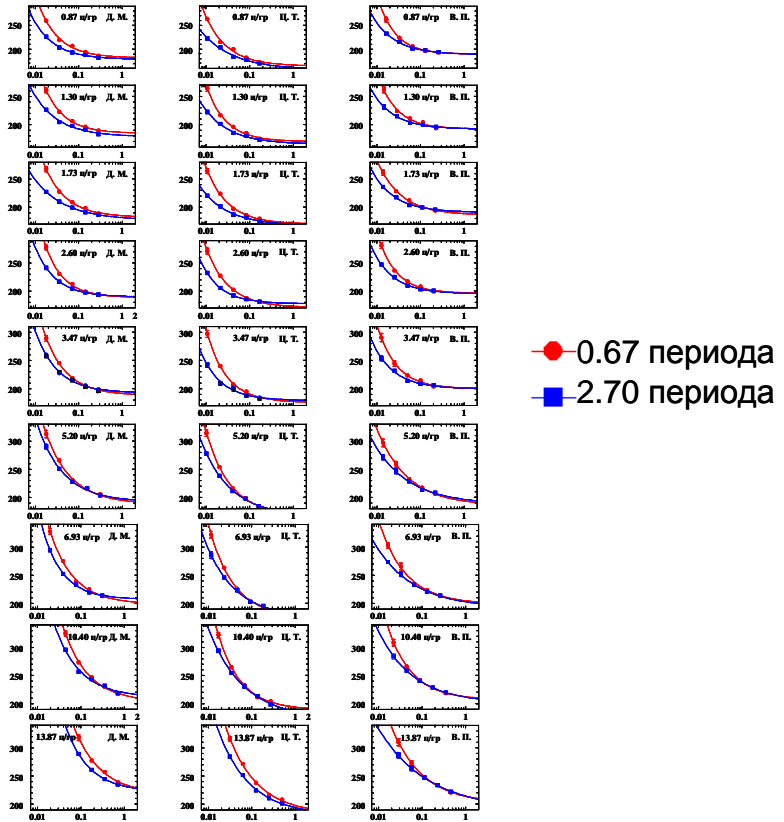
Първоначално резултатите от това изследване бяха представени на **Фиг. 11.** като зависимости на ВР от екранния контраст. Вижда се, че за всяка ПЧ, ВР проучено при нисък контраст, измерено за тесни решетки ($\sigma = 0,67$ пъти периода) е по-дълго от ВР, измерено за широки решетки ($\sigma = 2,70$ пъти периода). При по-високи нива на контраст разликата между ВР, измерени и за двете пространствени константи става по-малка или дори нулева.

Следващата стъпка бе да се определи критичната ширина, т.е. максималната стойност на пространствената константа, до която ВР зависи от ширината на стимулите. За тази цел на зависимостите на ВР от стимулната ширина при различни ПЧ и нива на надпрагов контраст са представени на **Фиг. 12.**

Подобно на **Фиг. 11.** може да се види, че ВР зависи от ширината на решетката, но тази зависимост е предимно в случаите на ниски нива на контраст - 2 и 4 пъти над прага за откриване. Ефектът от ширината върху ВР при по-високи нива на контраст е или по-слаб (при 8 пъти над прага) или дори изчезва (при 16 пъти над прага).

Другата особеност на данните представени на **Фиг. 12.** е фактът, че колкото по-висока е ПЧ на стимула, толкова по-малка е критичната ширина на стимула, изразена в абсолютни единици, до която ВР зависи съществено от ширината. Това дава основания да

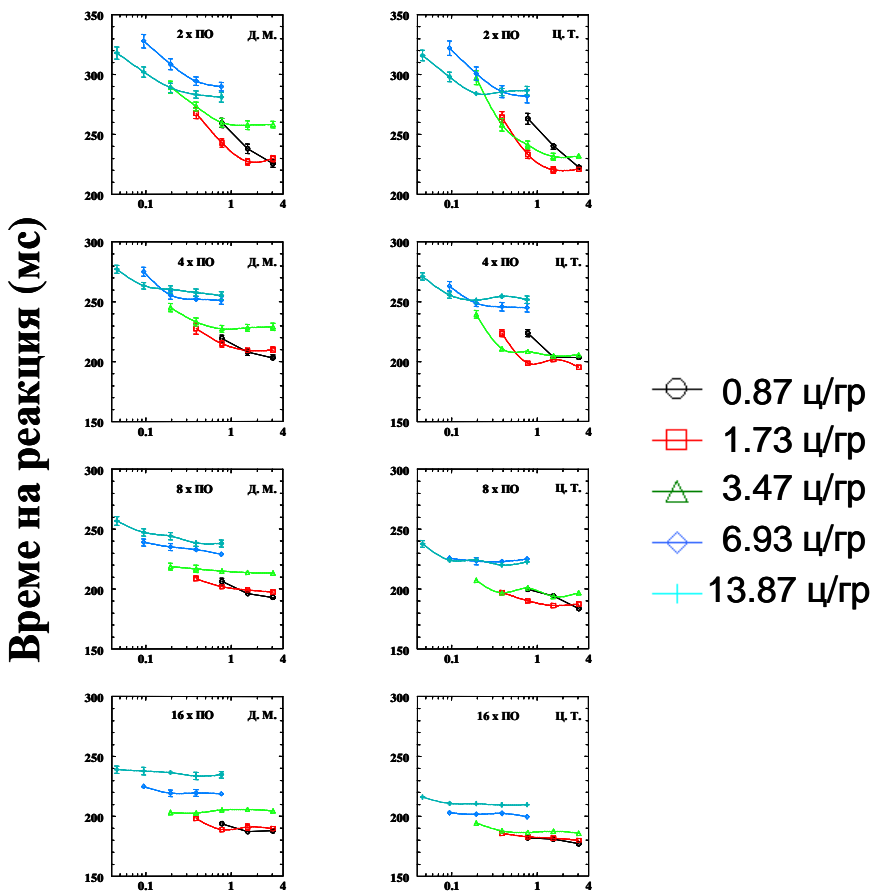
Време на реакция (мс)



Екранен контраст

Фиг. 11. Зависимост на ВР от екранния контраст при две стойности на пространствената константа на стимули решетки. Трите колони съответстват на трите изследвани лица: лявата колона – Д.М. средната колона – Ц.Т. и дясната колона – В.П. Различните графики съответстват на различните ПЧ, отбелязани на всяка графика.

се предполага че не абсолютният размер на решетката, а броят на периодите в нея е определящ за ВР към решетки с различни размери и ПЧ. За да се провери дали това е така, данните от **Фиг. 12.** са представени като зависимости на ВР от броя на периодите на решетката в рамките на стимулната ширина, дефинирана като $2x\sigma$, за всяка ПЧ и контраст – **Фиг. 13.**



Пространствена константа (ъгл. гр)

Фиг. 12. Зависимост на ВР от ширината на стимулите (удвоената пространствена константа, $2 \times \sigma$), изразена в абсолютни единици (ъглови градуси). Различните символи съответстват на различни ПЧ на стимулите. Двете колони съответстват на данните на две изследвани лица. Различните графики във всяка колона съответстват на различни нива на надпъгов контраст.

От **Фиг. 13.** може да се види, че тези зависимости, получени при различни ПЧ са приблизително успоредни една на друга и че критичната ширина на стимула, до която ВР зависи от броя на периодите на решетката е приблизително една и съща за всички изследвани ПЧ - $5 \div 6$ периода, вместиращи се в $2 \times \sigma$. Това позволява да се счита, че броят на периодите на решетката, а не абсолютната широчина на стимула определят ВР за решетки с различна ПЧ. Ако се приеме, че ефектът на ширината на решетката върху ВР се дължи на процесна вероятностна пространствена сумация,

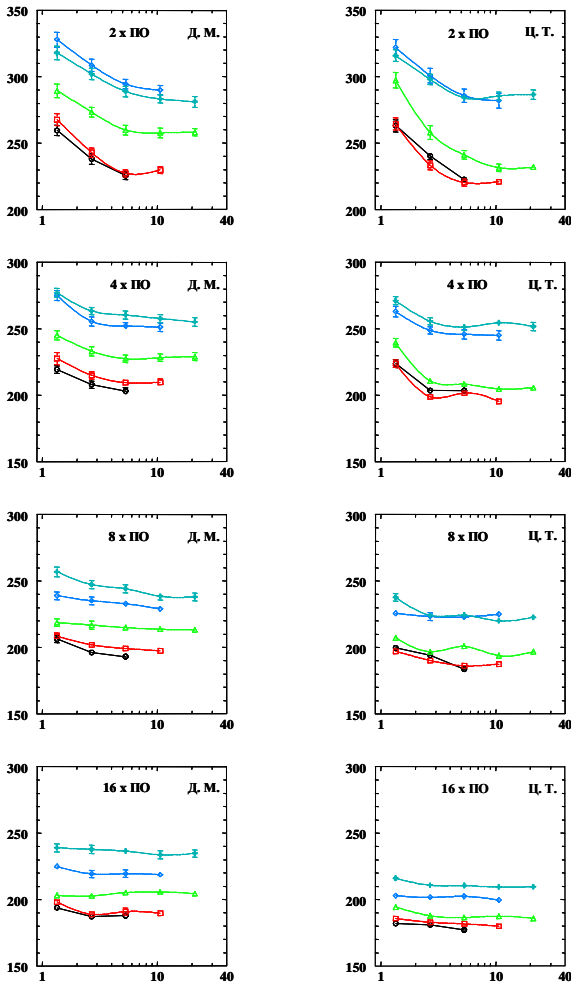
по аналогия с данните получени със стимули-светлинни петна (Bonnet, Gurlekian & Harris, 1992; Saleh & Bonnet, 2000), ПЧ-ната специфичност на критичната ширина на стимули-решетки би могла да се дължи отново на процес на вероятностна пространствена сумация, но между ПЧ-но специфични елементи. Съществува голям брой данни, даващи основания да се счита, че откриването на стимули-решетки от зрителната система се извършва посредством ориентационно- и ПЧ-но-специфични механизми с корова локализация (Blakemore & Campbell, 1969; Campbell & Robson, 1968; Graham & Nachmias, 1971; Graham, 1985; Olzak & Thomas, 1986; Glezer, 1995). Според такъв модел, ВР, получени при дадена ПЧ и всички стойности на ширината и контраста на стимулите биха могли успешно да се опишат с една единствена степенна функция. В този случай обаче, вместо контрастът, С, като аргумент на степенната функция, произведението на контраста, С, и броят на периодите, n, съдържащи се в решетката, повдигнатина степен, d, $d < 1$, би трябвало да изпълнява ролята на независима променлива (аргумент). Степенният показател, d, в този случай отразява степента на вероятностна пространствена сумация между единиците настроени към дадена ПЧ, а останалите параметри са същите както в (1).

$$ВР = \beta \times (C \times n^d)^{-\alpha} + ВР_0, \quad (2)$$

Резултатите от подобна апроксимация са показани на **Фиг. 14.** От фигурата се вижда, че ВР получени за всички стойности на контраста и пространствената константа, за стимули с една и съща ПЧ могат доста точно да се опишат от една единствена степенна функция.

Данните от **Фиг. 14.**, както и съответните им апроксимиращи функции, преставени по отделно за всяка една ПЧ в отделна графика бяха сравнени за всички ПЧ на **Фиг. 15.** Представените на тази фигура данни показват, че степенните функции, съответстващи на различни ПЧ не съвпадат и в двата случая на използван аргумент – когато екранният или ретиналният контраст са компоненти на независимата променлива. Когато екранният контраст е компонент на независимата променлива („екранен относителен интензитет“) статистическият анализ на апроксимиращите степенни функции показва, че степенната функция, съответстваща на най-ниската ПЧ, 0.87 ц/гр, се различава значимо ($p < 0.05$) от всички функции, съответстващи на ПЧ $\geq 2,60$ ц/гр за изследваното лице Ц.Т. и на ПЧ $\geq 1,73$ ц/гр за изследваните лица Д.М. и В.П. Когато ретиналният контраст е компонент на независимата променлива („ретинален относителен интензитет“), апроксимиращата степенна функция съответстваща на най-ниската ПЧ, 0.87 ц/гр се различава значимо от всички функции съответстващи на ПЧ $\geq 1,73$ ц/гр за изследваното лице Ц.Т., на ПЧ $\geq 2,60$ ц/гр за изследваното лице Д.М. и на ПЧ $\geq 1,30$ ц/гр за изследваното лице В.П.

Време на реакция (мс)



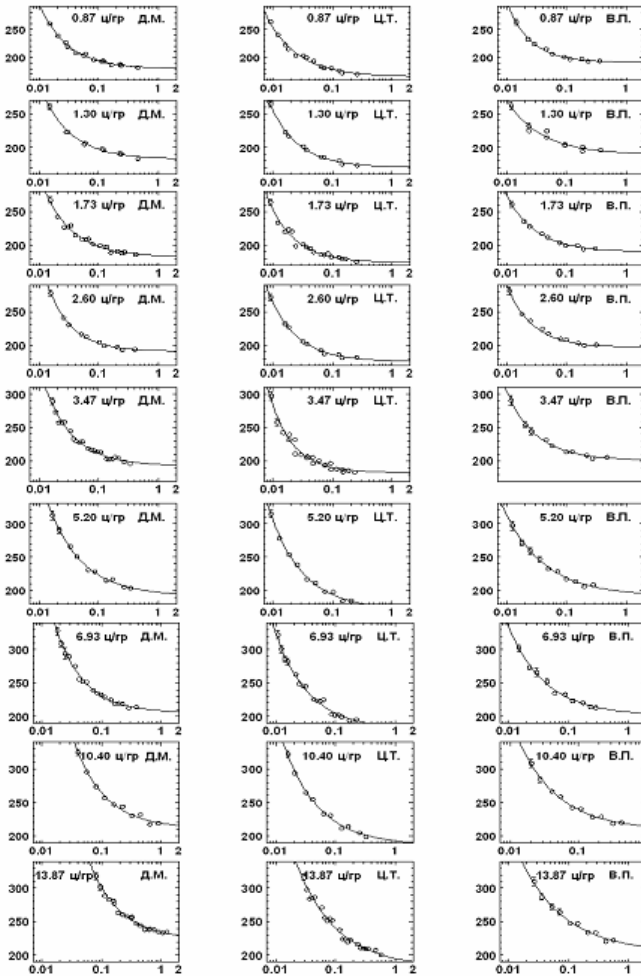
- 0.87 ц/гр
- 1.73 ц/гр
- △ 3.47 ц/гр
- ◇ 6.93 ц/гр
- + 13.87 ц/гр

Брой периоди в 2σ

Фиг. 13. Зависимост на ВР от относителната ширина на стимулите (брой периоди съдържащи се в стимулната ширина, 2 x σ, за съответната ПЧ). Всичко останало е както на Фиг. 12.

В настоящето изследване бе изучаван ефектът на ширината на стимулите-решетки върху ВР за тяхното откриване. Установено бе, че увеличаването на ширината на стимулите скъсява ВР, като този ефект бе наблюдаван при сравнително ниски стойности на контраста (2 – 4 пъти над съответните прагове за откриване). При по-висок контраст

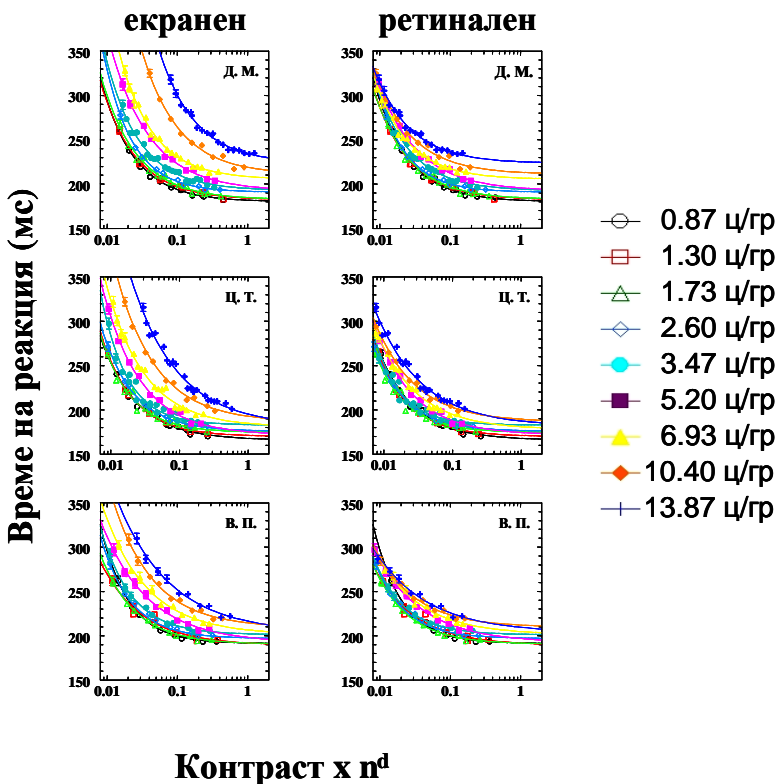
Време на реакция (мс)



Контраст $x n^d$

Фиг.14. Зависимост на ВР измерено при всички изследвани стойности на стимулната ширина за всяка ПЧ от произведението на екранния контраст и относителната ширина на решетките (броя на периодите, n , вместващи се в $2 \times \sigma$), повдигнат на степен d , $d < 1$. Трите колони от графики съответстват на данните на трите изследвани лица. Различните графики съответстват на различни ПЧ, отбелязани върху всяка от тях.

(8– 32 пъти над праговете за откриване) този ефект бе или слаб или въобще не се наблюдаваше. Установено бе, че критичните стойности на стимулната ширина до които ширината повлияваше ВР не бяха еднакви за различните ПЧ, а обратно пропорционални на стимулната ПЧ. В допълнение, както може да се види от данните от други наши изследвания (Totev & Mitov, 2007), тази обратно пропорционална зависимост между



Фиг. 15. Зависимост на ВР получени при всички изследвани ширини на стимулите за всяка ПЧ по отделно от т.нар. „екранен относителен интензитет” (лявата колона) и от „ретиналния относителен интензитет” (дясната колона). Различните редове от графики съответстват на трите изследвани лица.

стимулните размери и ПЧ е в сила не само за ширината, но и дължината на решетките. Нещо повече, установено бе също така, че ефектът на стимулната дължина върху ВР е по-силен и се простира до по-високи стойности отколкото ефектът на стимулната ширина върху ВР. Всички тези данни показват, че пространствено-сумационните свойства на човешкото зрение по отношение на ВР, подобно на пространствено-сумационните свойства по отношение на праговия контраст (Anderson, Evans & Tibos, 1996; Mitov & Totev, 2007), зависят от стимулната ПЧ и те са различни по ориентацията на стимулите-решетки и ортогонално на нея. Този факт прави проблематично разширяването на хипотезата (Saleh & Bonnet, 1998), че процес на пространствена вероятностна сумация между механизми функциониращи на ниско ниво, притежаващи линейна пространствена сумация и отговарящи на светлинни инкременти и декременти биха могли да определят ВР към стимули-решетки. Подобна хипотеза, изглеждаща логична и подкрепена с експериментални доказателства (Bonnet, Gurlekian &⁴¹Harris, 1992) по отношение стимули-

светлинни инкременти и декременти не отчита промените в пространствено-сумационните свойства причинени от варирането на ПЧ и ориентацията на стимули-решетки.

Фактът, че критичната стойност на размера на стимулите-решетки е обратно-пропорционален на ПЧ, т.е. критичният размер обхваща еднакъв брой периоди на съответната ПЧ, заедно с различията в пространствената сумация по дължината и ширината на стимулите-решетки са ясен знак, че механизмите определящи ВР би трябвало да бъдат ориентационно- и ПЧ-но специфични. Налице са множество експериментални доказателства, че контрастният праг за откриване на решетки наистина се определя от ориентационно- и ПЧ-но специфични механизми функциониращи на корово ниво (Blakemore & Campbell, 1969; Campbell & Robson, 1968; Graham & Nachmias, 1971; Graham, 1985; Olzak & Thomas, 1986) и изглежда твърде възможно, че същите механизми определят и ВР, поне при ниски стойности на контраста. Ако това е така, ефектът на размера на стимулите-решетки върху ВР би могъл също да бъде обяснен с процес на вероятностна пространствена сумация, но в този случай сумацията би трябвало да има място между единици откриващи малък или дори единичен брой периоди при различни ПЧ и функциониращи на по-високо (корово) ниво. За решетки с фиксирана дължина, каквито са стимулите в това изследване, това би могло да бъде лесно изразено математически. В този случай, контрастът на решетките, служещ като аргумент в класическата функция на Pigeon, би следвало да бъде заменен с производението на контраста и броя периоди на решетката повдигнати на степен, отразяваща силата на вероятностната пространствена сумация (Формула 2). Така, ВР измерени при всички стойности на контраста и ширина на решетките за всяка отделна ПЧ би трябвало да конвергират към една „единствена” функция на Pigeon. „Единствените” функции на Pigeon, съответстващи на различните ПЧ, се оказаха различни, най-вероятно поради ПЧ-ната специфичност на механизмите определящи ВР към различните ПЧ. И действително, **Фиг. 14** е добра илюстрация за това – ВР измерени при всички стойности на контраста и ширината на стимулите за всяка отделна ПЧ лежат върху или много близко до съответната апроксимираща степенна функция. Сравняването на отделните функции на Pigeon, съответстващи на различни ПЧ, показва че те се различават статистически значимо когато ПЧ-ната разлика между тях е по-съществена и това се отнася както за случая когато екранният контраст е използван като компонент на аргумента на функцията на Pigeon, така и ретиналният контраст (**Фиг. 15**).

Всички тези данни показват, че ролята на ПЧ при определянето на ВР за откриване не би могла да бъде редуцирана до ролята интензитетен фактор („локален интензитет”), представляващ производението на контраста и пространствения период на решетката. ВР могат да се различават съществено (**Фиг. 7, Фиг. 8, Фиг. 9 и Фиг. 10**) в случаите на нисък и висок надпрагов контраст). Фактът че т.нар „единствени” степенни функции, съответстващи на различни ПЧ и изчислени по описания по-горе начин (формула 2) са различни и че могат да опишат ВР измерени при най-различни стойности на контраста и ширината на стимулите е също доказателство, че ПЧ е независим фактор определящ ВР.

Бяха проведени ред изследвания, насочени към търсенето на данни позволяващи да се даде предпочитание на една от двете обсъждани в настоящата дисертация хипотези относно механизмите определящи ВР към решетки с различна ПЧ - едноканалната и многоканалната. На тази основа бяха направени следните заключения:

1. Показано бе, че при нисък надпрагов контраст на стимули-решетки (2 – 4 пъти над прага за откриване), зависимостта на ВР за откриване от ПЧ представлява „S”-образна функция с две “плато” различаващи се помежду си с 50 -60 мсек. Стандартното отклонение на ВР нараства значително в областта на междинните ПЧ, 3 – 7 ц/гр, което съвпада с прехода на ВР от едното към другото „плато” на ВР. При висок контраст на стимулите (8 – 32 пъти над прага за откриване) зависимостта на ВР от ПЧ става монотонна, без каквито и да е „плато” на ВР, като стандартното отклонение не показва екстремални стойности в целия изследван ПЧ-ен диапазон.

2. Показано бе, че при нисък надпрагов контраст времето за пълна сумация на механизмите определящи ВР е около 15 мс за стимули с ниска ПЧ, 0.87 ч 3.47 ц/гр и около 30 мс – за стимули с висока ПЧ, 10.40 ч 13.87 ц/гр. При висок контраст обаче, времето за пълна сумация за стимули с висока ПЧ се съкращава и достига това за ниски ПЧ – около 15 мс, което от своя страна не се влияе от нивото на контраста. Установено бе, че при нисък надпрагов контраст (2 – 4 пъти над прага за откриване) първоначалното (0 ч 60 мс) удължаване на фронта на включване на стимул-решетка удължава ВР за откриване в по-голяма степен при ниска ПЧ, 0.87 ц/гр, отколкото при висока ПЧ, 13.87 ц/гр. При висок надпрагов контраст, 8 ч 16 пъти над прага за откриване, ефектът на продължителността на фронта върху ВР е един и същ и за ниски, и за високи ПЧ при всички изследвани стойности на тази продължителност.

3. Изследван бе ефектът на ПЧ-ната неопределеност върху ВР. Показано бе, че при нисък контраст на стимулите (2 пъти над прага за откриване) ПЧ-ната неопределеност удължава ВР за откриване и увеличава дисперсията на ВР, когато стимулите с по-висока ПЧ заемаха стойности от 10.40 и 13.87 ц/гр. При висок контраст (4 и 8 пъти над прага за откриване), ПЧ-ната неопределеност не променя нито ВР, нито неговата дисперсия. Когато включването и изключването на стимулите с по-висока ПЧ (5.20 ÷ 13.87 ц/гр) става не рязко във времето, а с линейно нарастващ контраст, ефектът на ПЧ-ната неопределеност се наблюдава и когато се използват тестови стимули с по-ниска ПЧ, 5.20 ц/гр. Всички тези данни показват, че при определени условия – нисък надпрагов контраст и достатъчно голяма

разлика по ПЧ, се наблюдава ефект на неопределеността върху ВР.

4. Всички тези резултати се интерпретират като доказателство, че при нисък контраст ВР към стимули-решетки се определя от два типа механизми (фазичен – при ниски ПЧ и тоничен – при високи ПЧ) и от един тип механизми, фазични в границите на широк диапазон от ПЧ, когато контрастът е висок.

5. Изследвана беше зависимостта на ВР за откриване на стимули-решетки с различна ПЧ от техния контраст. Диапазонът на изменение на контраста за различните ПЧ бе $2 \div 32$ пъти над прага за откриване за всяка ПЧ. Броят на периодите съдържащи се в стимулите при различни ПЧ бе един и същ. Показано бе, че при тези условия зависимостите на ВР от контраста (функциите на Pieron) съответстващи на различните ПЧ не могат да се опишат с една единствена степенна функция, ако в качеството на аргумент на тази функция се вземат най-различни „интензитетни“ показатели – екранният или ретиналният контраст и съответно техните произведения с пространствения период на решетките.

6. Изследван бе и ефектът на ширината на стимули-решетки върху ВР. Показано бе, че увеличаването на ширината на стимулите скъсява ВР, като този ефект бе наблюдаван при по-ниски стойности на контраста ($2 - 4$ пъти над съответните прагове за откриване). При по-висок контраст ($8 - 32$ пъти над праговете за откриване) ефектът на ширината на решетките върху ВР постепенно изчезваше. Намерено бе също така, че критичните стойности на стимулната ширина до които тя повлиява ВР не са еднакви за различните ПЧ, а обратно пропорционални на съответната ПЧ. От този факт следва изводът, че не абсолютната ъглова ширина на стимулите, а броят на периодите съдържащи се в тях определя ВР. Това позволява да се счита, че и ВР, подобно на контрастния праг, се определя от опериращите на нивото на зрителната кора ПЧ-но и ориентационно избирателни механизми. Така ВР получени при различни стойности на контраста и стимулната ширина биха могли да бъдат описани с една „единствена“ функция на Pieron , като в качеството на аргумент на тази функция се използва производението на контраста и броя периоди на решетката повдигнати на степен, отразяваща силата на вероятностната пространствена сумация. Това обаче, би следвало да е в сила само за всяка отделна ПЧ, доколкото става дума за вероятностна сумация между механизми притежаващи ПЧ-на избирателност.

10. Приноси

1. Използвайки три различни оригинални подхода (търсене на по-резки промени в зависимостите на средната стойност и средното44 квадратично отклонение на ВР от ПЧ, изследване на

време-сумационните свайства на механизмите определящи ВР и изследване на ефекта на ПЧ-ната неопределеност върху ВР) бе потвърдено, че при нисък контраст ВР към стимули-решетки се определя от два типа механизми, фазичен – при ниски ПЧ и тоничен – при високи ПЧ, и от един тип механизми, фазични в границите на широк диапазон от ПЧ, когато контрастът е висок. В този случай, фазичният механизъм, независимо от по-ниската си чувствителност към стимулите с по-висока ПЧ от тоничния механизъм, би следвало да определя ВР и към стимулите с по-висока ПЧ поради по-голямата си бързина от тоничния механизъм, т.е в сила е принципът „първият е победител”.

2. За пръв път бе показано, че ВР зависи от ширината на стимули-решетки, като тази зависимост е по-изявена при нисък контраст, 2 ч 4 пъти над прага за откриване, докато при висок контраст , 8 ч 32 пъти над прага за откриване, тя на практика изчезва. За първи път бе показано също така, че критичните стойности на стимулната ширина, до които ширината повлиява ВР за различните ПЧ са обратно пропорционални на съответната ПЧ, т.е ВР се определя не от абсолютния ъглов размер на решетките, а от броя съдържащи се в тях периоди.

3. За първи път бе показано, че за всяка отделна ПЧ ВР получени при всички стойности на контраста и ширината на стимулите могат да се опишат с една „единствена“ функция на Ригоне ако в качеството на аргумент се използва произведението на контраста и броя на периодите вместващи се в решетката повдигнати на степен, отразяваща силата на вероятностната пространствена сумация. Това може да се интерпретира като доказателство, че ефектът на ширината на решетката се осъществява като процес на вероятностна пространствена сумация между ПЧ-но и ориентационно специфични механизми, опериращи в зрителната кора, а не като такъв процес между ретинални механизми притежаващи линейна пространствена сумация.

11. Публикувани статии по темата:

1. Mitov, D. & Totev, T. (2005). How many pathways determine the speed of grating detection? *Vision Research* 45 (7), 821-825.
2. Митов, Д. Л., & Тотев Ц. Т., (2003). Времева суммация и время реакции для обнаружения решеток. *Российский физиологический журнал имени И. М. Сеченова, РАН*, 89 (10), 1240-1249.
- 2a .Mitov, D. L. & Totev, Ts. T. (2005). Temporal summation and reaction times for detecting gratings. *Neuroscience and Behavioral Physiology, Vol. 35, No. 4*, 417-422.
3. Mitov, D., & Totev, T. T. (2010). Spatial frequency uncertainty and reaction time to stimuli gratings. *Comptes Rendus De L'Academie Bulgare Des Sciences*, 63(12), 1757-1764.

12. Цитирания.

How many pathways determine the speed of grating detection?, Mitov, D., Totev, T., 2005, *Vision Research* 45 (7) , pp. 821-825

1. Medina, J. M., & Díaz, J. A. (2012). 1/f noise in human color vision: The role of S-cone signals. *Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision*, 29(2), A82-A95.
2. Sierra-Vázquez, V., Serrano-Pedraza, I., & Luna, D. (2006). The effect of spatial-frequency filtering on the visual processing of global structure. *Perception*, 35(12), 1583-1609.
3. Pérez-Bellido, A., Soto-Faraco, S., López-Moliner, J. (2013). Sound-driven enhancement of vision: Disentangling detection-level from decision-level contributions, *Jurnal of Neurophysiology*, 109 (4) pp.1065-1077.

Totev Ts. T. and Mitov D. L., (2000). Temporal integration and reaction time to grating-onset detection. *Perception* v. 29, p. 61, Supplement, 23-rd European Conference on Visual Perception Groniingen, 27-31 August 2000

1.Vassilev, A., Mihaylova, M., & Bonnet, C. 2002. On the delay in processing high spatial frequency visual information: reaction time and VEP latency study of the effect of local intensity of stimulation. *Vision Research*, 42, 851–864.

13. Доклады пред научни мероприятия в чужбина или пред научни мероприятия у нас

Митов Д. Л., & Тотев Ц. Т., (2003) Один или много каналов определяет время реакции при обнаружении решеток? “Информация и Зрение“ Международная конференция посвященная 80-летию со дня рождения проф. В. Д. Глезера, Санкт-Петербург, Россия, 22-24 апреля 2003г.

Mitov, D., & Totev, Ts. T. (2007). How many channels determine reaction time to grating onset? Balkan Regional Scientific Workshop on Visual Perception, 28-29 May 2007, Sofia, Bulgaria

Totev Ts. T. and Mitov D. L., (2000). Temporal integration and reaction time to grating-onset detection. Perception v. 29, p. 61, Supplement, 23-rd European Conference on Visual Perception Groniingen, 27-31 August 2000

Mitov D. L. and Totev Ts. T., (2000). Does spatial-frequency or contrast uncertainty influence reaction time? Perception v. 29, p. 116, Supplement, 23-rd European Conference on Visual Perception Groniingen, 27-31 August 2000