



КОНТРАСТНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ЗРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ЧЕЛОВЕКА

МУРАВЬЕВА С.В., Институт физиологии им. И. П. Павлова РАН, Санкт-Петербург

ПРОНИН С.В., Институт физиологии им. И. П. Павлова РАН, Санкт-Петербург

ШЕЛЕПИН Ю.Е., Институт физиологии им. И. П. Павлова РАН, Санкт-Петербург

Авторами рассмотрена история исследований контрастной чувствительности зрительной системы человека – важнейшего раздела психофизики. Особое внимание уделено основному ограничивающему контрастную чувствительность фактору – внутреннему шуму зрительной системы. В исследовании показано значение измерений контрастной чувствительности для понимания процессов восприятия, их роль в открытии психофизических законов, а также практическое значение для развития телевизионной техники и медицины. В статье представлен краткий обзор исследований основных факторов, лимитирующих контрастную чувствительность человека, – внешней помехи и внутреннего шума.

Ключевые слова: контрастная чувствительность, пороговый контраст, фотометрия, помеха, внутренний шум, психофизический закон.

В истории развития экспериментальной психологии исследования контрастной чувствительности человека занимают особое место. Благодаря им был открыт ряд психофизических законов. Они оказались связующим звеном между экспериментальной психологией и физиологией, клинической практикой, техникой средств записи, обработки и воспроизведения видеoinформации, а также многими современными методами компьютерной обработки изображений. На русском языке представлено большое количество обзоров, написанных в разные годы и отражающих различные аспекты данной тематики (Бондарко и др., 1999; Волков и др., 1987; Кравков, 1950; Лазарев и др., 1978; Леонов, 1977; Островская, 1969; Травникова, 1985; Шелепин и др., 1985, 1992). Тем не менее, учитывая исключительно важную роль, которую исследования контрастной чувствительности играют в столь далеких друг от друга областях знаний, большой интерес представляет ретроспективный взгляд на их более чем двухтысячелетнюю историю.

Первые теоретические представления о порогах восприятия, согласно истории, принадлежат еще Пифагору. И в практических целях контрастную чувствительность также измеряли уже с древнейших времен. Так, например, в македонской армии отбирали наблюдателей по числу звезд (от 4 до 7), которые они могли видеть в звездном скоплении Плеяды. В римской армии для отбора лучших наблюдателей использовали две близкие друг к другу звезды в созвездии Большой Медведицы – Мицар и Алькор. Выбор звезд был сделан верно: бледный Алькор, расположенный на расстоянии 12 угл. мин от яркого Мицара, можно разглядеть, только обладая хорошей контрастной чувствительностью при максимальной остроте зрения. Гиппарх (ок. 190 – после 126 до н.э.) в период с 161 – 126 годы до н. э. разделил по яркости все звезды, видимые глазом, на шесть классов. Самые яркие он назвал звездами первой величины, а едва различимые невооруженным глазом – звездами шестой величины. Система «звездных величин», по сути, описывала особенность нашего зрения: если сила источника света изменяется в геометрической прогрессии, то наше ощущение от него – в арифметической.



В новое время исследования контрастного порога были начаты французским гидрографом Пьером Бугером (Bouguer, 1760). Бугер первым вывел формулу порогового контраста:

$$K = \Delta L / L,$$

где L – яркость источника, K – пороговый контраст.

В своих экспериментах он использовал простейшее оборудование – две свечи, расположенные на разном расстоянии от экрана (белой стены). Между первой свечой и экраном была расположена ширма, образующая на экране тень. Тень подсвечивалась второй свечой. Изменяя расстояния между экраном и свечами, П. Бугер менял яркость фона и контраст тени. Он обнаружил, что тень различима, если отношение разности яркостей тени и фона к яркости фона не превышает $1/64$, причем от абсолютного значения яркости эта величина не зависит. Таким образом, Бугер смог установить дифференциальный порог восприятия яркости (2%). Это была прекрасная методика для получения первых результатов о так называемом «слабо различимом пороге», который позже был назван «пороговым контрастом». Психологи и физиологи XVIII века не обратили должного внимания на работу Бугера, но она сразу получила признание у оптиков, которые считают его основоположником фотометрии. Особенность подхода Бугера состояла в том, что он исследовал как оптические свойства источников, т. е. физику формирования воспринимаемого изображения (именно поэтому его считают основателем современной фотометрии), так и общие законы восприятия этих изображений (Бугер, 1950). Поэтому было бы справедливо считать, что именно этой работой Бугера было положено начало психофизики в новое время. Книга Бугера была издана в 1950 году на русском языке в Издательстве Академии наук в серии «Классики наук» по инициативе академика С. И. Вавилова.

Дальнейшие исследования в этой области были связаны с именами немецких ученых Эрнста Вебера (Weber, 1834) и Густава Фехнера (Fechner, 1860). Вебер, как когда-то и Пифагор, работал с различными сенсорными раздражителями. В частности, он обнаружил, что два отрезка выглядят неодинаковыми по длине, если разность их длин превышает 1% от их абсолютных величин. Аналогичная закономерность оказалась справедливой и для тактильных ощущений. Так был открыт психофизический закон, названный позже законом Вебера: минимально различимое изменение интенсивности стимуляции (ΔI) составляет постоянную долю (K) ее исходной интенсивности (I):

$$K = \Delta I / I.$$

Позднее эти исследования были продолжены Густавом Фехнером. Он заметил, что малоконтрастные детали облаков остаются хорошо различимыми, если рассматривать их через затемненное стекло; следовательно, восприятие небольших перепадов яркости не зависит от их абсолютной величины. Повторив затем эксперимент П. Бугера с двумя свечами, он установил, что для различения яркости двух источников света необходимо, чтобы их яркость отличалась более, чем на $1/100$, независимо от абсолютного значения яркостей, тем самым подтвердив закон Вебера.

В 1860 году Фехнер дополнил отношение Вебера, добавив величину (L_n):

$$K = \Delta L / (L + L_n),$$

где L_n – «видимый свет сетчатки», по терминологии Фехнера, – для здоровых наблюдателей небольшая по численному значению величина.

Когда интенсивность стимула (L) достаточно велика (членом (L_n) можно пренебречь), тогда выражение будет соответствовать исходной формуле Вебера. Константа (L_n) не только обеспечивает более точное соответствие экспериментальным данным, но имеет



вполне реальное физическое и физиологическое объяснение. Г. Фехнер и Г. Гельмгольц называли его «видимым светом сетчатки». В современной терминологии эта величина отражает значение «внутреннего шума» в сенсорном канале, который имеет различные источники: тепловой шум, самопроизвольный распад зрительного пигмента в рецепторах, спонтанную активность сенсорных нейронов различных уровней. Этот «шум» можно видеть в полной темноте в виде вспыхивающих точек разной яркости – фосфенов, поэтому его и называли «внутренним светом сетчатки».

Г. Фехнер также предложил использовать дифференциальные пороги (понятие о которых впервые ввел П. Бугер) для построения шкалы «интенсивности ощущений». Несколько ранее понятие порога ощущений, как границы между сферой сознательного и бессознательного, было предложено Дж. Гербартом (Herbart, 1824; цит. по: Бардин, 1976); Фехнер сформулировал «основной психофизический закон» (Fechner, 1860), согласно которому интенсивность ощущения пропорциональна логарифму интенсивности стимула:

$$\psi = a \log (L / L_0),$$

где ψ – интенсивность ощущения, a – константа, L – интенсивность стимула, L_0 – его абсолютный порог.

Предложенные П. Бугером приемы измерения контрастной чувствительности, основанные на варьировании расстояний между свечами и экраном, были хотя и просты, но недостаточно удобны для работы. Поэтому начались поиски технологически более удобных приемов исследования. Французский физик Антуан Массон для исследования порогового контраста использовал быстро вращающийся диск из белой бумаги с короткими черными секторами (Masson, 1845). Когда диск вращался достаточно быстро (около 50 оборотов в сек), черный и белый секторы сливались в однородный серый фон. Изменяя соотношение между площадями черного и белого секторов, можно было плавно менять яркость диска: от почти белого до почти черного. Чтобы создать различные перепады яркости, Массон использовал диски с несколькими секторами различных радиусов. Минимально различимое значение перепада Массон называл «пороговым контрастом». Он предложил также использовать измерение контрастной чувствительности с помощью дисков в клинической практике. Видимо, попытки клинического применения этого метода были осуществлены, так как Дондерс, Снеллен и Ландольт обсуждали клиническое значение применения диска Массона для измерения контрастного порога (Donders, 1864; Snellen, Landolt, 1874). Они считали, что исследование контрастного порога может быть полезным дополнением к оценке остроты зрения с помощью буквенных таблиц.

В те же годы исследование контрастной чувствительности в клинике были проведены Беррумом. Он предложил использовать буквенные таблицы Снеллена, в которых буквы были напечатаны с постепенно увеличивающейся интенсивностью – от серых до черных (Vjergum, 1884). Таблицы Беррума были рекомендованы в пятом издании справочника болезней глаз Генри Сванци (Swanzy, 1895). Берри адаптировал таблицы Беррума для изучения зрительных дефектов при ретробульбарном неврите (Berry, 1880).

Интерес к измерению контрастного порога в клинике особенно усилился после публикации результатов исследований Георга Юнга. Юнг представил изобретенный им новый метод измерения контрастного порога (Young, 1918a, b). В своих экспериментах он использовал альбом, на страницах которого на серых листах были расположены квадраты с чернильными пятнами в центре. Пятна были сделаны разбавленными чернилами и имели



различную интенсивность. Контраст пятна, который испытуемый уже не мог различить, записывался как пороговый для данного человека. Пороговый тест Юнга оказался первым подобным тестом, удобным для использования в клинической практике.

В 1924 году Джонас Фриденвуд разработал методику исследования контрастной чувствительности для измерения степени астигматизма с помощью «астигматических» таблиц (Fridenwald, 1924). Таблицы состояли из узких черных линий с белыми краями, расположенных на сером фоне и имевших различную ориентацию. Фриденвуд придавал особое значение контрасту между элементами таблицы, которые мог видеть пациент с неоткорректированным астигматизмом. Пациент видел линии определенной ориентации в фокусе и ортогонально расположенные линии вне фокуса. Линии в фокусе выделялись из фона, а линии вне фокуса сливались с ним. Ошибки в определении пациентом ориентации решетки свидетельствовали об осевом астигматизме и о его степени. В этом аспекте исследования астигматизма были аналогичны исследованиям контрастной чувствительности у здоровых испытуемых при установленной ориентации.

Исследования пороговой контрастной чувствительности на здоровых наблюдателях проводились также Коннером и Ганунгом (Conner and Ganoung, 1935), Зидентопфом (см.: Кравков, 1950) и Г. Блекуэллом (Blackwell, 1946).

Известно, что пороги контрастной чувствительности зависят от длительности предъявления стимула и размеров площади стимуляции. Критические для порогов значения размеров площади стимуляции связаны с дискретной структурой сетчатки – размерами рецептивных полей ганглиозных клеток сетчатки и зрительной коры. В 1875 году Рикко была продемонстрирована зависимость пороговой интенсивности стимулов от площади этих стимулов:

$$L_{\text{порог}} S = \text{const.}$$

Эта закономерность, получившая название закона полной пространственной суммы, показывает: чем больше площадь светового стимула, тем меньше интенсивность сигнала, необходимая для возникновения порогового ощущения.

Важнейший шаг в понимании как особенностей порогового восприятия, так и принципов работы зрительной системы в целом был сделан Эрнстом Махом. Обычно его имя связывают с описанием и объяснением иллюзии, возникающей у границы двух площадок с различной яркостью. Психофизический эффект, известный сейчас как полосы Маха, проявляется в кажущемся повышении яркости светлого поля у границы с темным полем и, наоборот, в кажущемся снижении яркости темного поля у границы со светлым полем, что приводит к кажущемуся усилению контраста на границе полей разной яркости (Mach, 1866). Однако особое значение в развитии психофизики сыграло предложенное им объяснение данной иллюзии: Мах представил пространственно-частотную трактовку данного явления, предположив, что эффект связан с работой фильтров высоких пространственных частот. Можно утверждать, что именно Мах предложил принципиально новый, пространственно-частотный подход к исследованию зрения и нейрофизиологическое объяснение этого субъективного эффекта (намного опередив свое время), предположив, что этот эффект в сетчатке и в мозге вызывает состояние возбуждения и торможения в функциональных элементах зрительной системы, состоящих из возбуждательной и тормозной зон, которые теперь называются рецептивными полями. В середине XX века Раштон на основании нейрофизиологических данных показал, как простая нейронная сеть из трех нейронов может обеспечить выполнение закона Бугера-Вебера (Rushton, 1972).



Дальнейшее развитие пространственно-частотного подхода во многом зависело от технологических проблем, связанных с необходимостью формирования изображений с заданной пространственной частотой. Для демонстрации явлений смешения синусоидальных полос Э. Мах, как и А. Массон, применил движущиеся стимулы и за счет инерции зрения попытался синтезировать стимулы с заданными гармоническими составляющими. Однако эта методика оказалась недостаточно удобной. Другим возможным решением, доступным в XIX веке, могло быть использование интерференционных полос, но и этот способ оказался слишком сложным для практического применения.

В 1891 году Альберт Майкельсон для расчета объективного контраста периодических сигналов предложил формулу, впоследствии названную его именем:

$$M = (L_{\max} - L_{\min}) / (L_{\max} + L_{\min}),$$

где L – яркость стимулов, M – глубина модуляции.

А. Майкельсон использовал эту формулу для расчета глубины модуляции яркости в интерференционной картине с синусоидальным яркостным профилем. Как известно, частота, амплитуда (контраст) и фаза полностью описывают синусоиду. Спектральный подход справедлив и для описания двухмерных сигналов (в этом случае нужна еще и информация об ориентации). Поэтому произвольное изображение с помощью преобразования Фурье может быть разложено на спектр синусоидальных составляющих. Линейные системы, к которым с некоторыми оговорками можно отнести и оптические системы, не изменяют синусоидальный профиль каждой из спектральных составляющих, меняя только их контраст и фазу, причем величина этих изменений зависит только от частоты и ориентации данной синусоиды. Функция, описывающая зависимость изменения контраста и фазы синусоидальных составляющих от их пространственной частоты и ориентации, называется оптической передаточной функцией системы. Каждая оптическая система имеет свою передаточную функцию; зная ее, можно рассчитать результат преобразования этой системой любого исходного изображения. Для измерения передаточной функции можно подавать на вход оптической системы синусоидальные сигналы, т. е. изображения синусоидальных решеток различной частоты и ориентации, но одинакового контраста и фазы, и измерять их контраст и фазу на формируемом системой изображении. На практике фазовую составляющую обычно игнорируют, измеряя только передачу контраста и получая так называемую частотно-контрастную характеристику системы. Первоначально передаточные функции использовались в основном в электронике, но начиная с 50-х годов прошлого века этот подход стал применяться и в оптике, в особенности в разработке опто-электронных систем. Успех этого подхода в электронике и оптике стимулировал попытки использования его и для зрительной системы, разумеется, с учетом того, что протекающие в ней процессы существенно нелинейны.

Первоначально использование пространственно-частотного подхода к исследованиям зрения сдерживалось сложностью синтеза тестовых полутоновых изображений заданной пространственной частоты и контраста. Это положение изменилось с появлением электронно-лучевой трубки и наступлением эпохи телевидения (Зворыкин, 1933). Появилась возможность синтеза изображений с заданной пространственной частотой и возможность стимуляции с помощью синусоидальных решеток различной пространственной частоты на экране электронно-лучевой трубки (Schade, 1956; Шаде, 1959). О. Шаде были измерены передаточные функции как оптических и телевизионных систем, так и зрительной системы наблюдателя. В это же время Н. Н. Красильниковым было измерено



влияние шумов электронно-лучевой трубки и зрительной системы наблюдателя на пороги обнаружения (Красильников, 1958).

В 1962 году Фергюс Кемпбелл начал свои исследования контрастной чувствительности, получившие широкую известность. Стимулами в его экспериментах служили синусоидальные решетки с различными контрастом и пространственной частотой, предъявляемые на экране электронно-лучевой трубки (Campbell, Green, 1965a, 1968, 1974; Campbell, Gubisch, 1966). Пороговые контрасты измерялись методом варьирования глубины модуляции (контраста) решетки от единицы до значения, при котором она становилась полностью невидимой для наблюдателя. В результате Кемпбелл и Робсон получили частотно-контрастную характеристику, которая имела максимум в области средних пространственных частот (рис. 1).

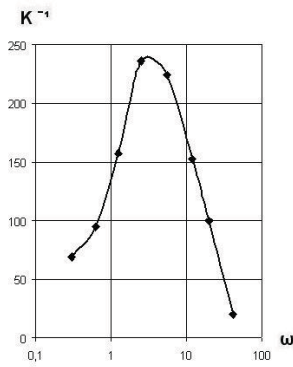


Рис. 1

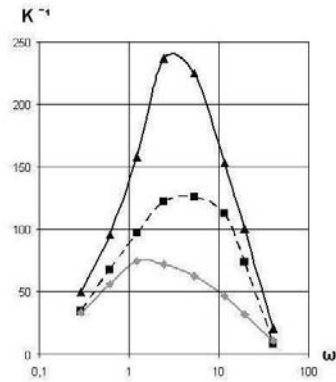


Рис. 2а

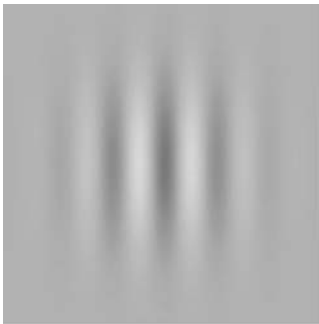


Рис. 2б

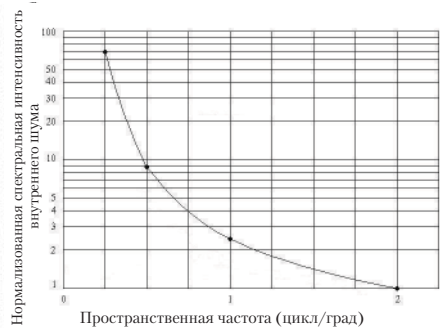
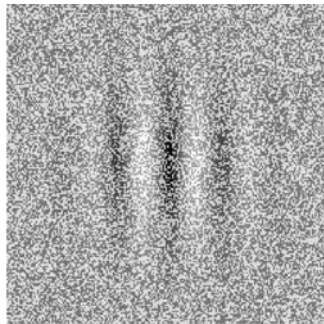


Рис. 3

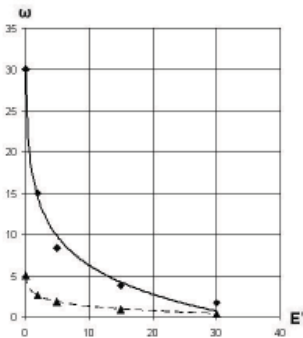


Рис. 4а

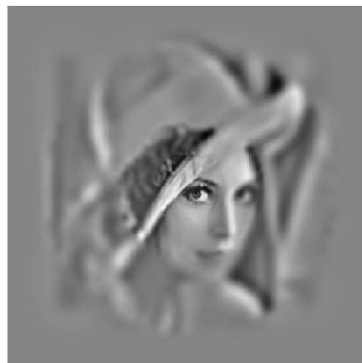


Рис. 4б



На высоких и низких пространственных частотах контрастная чувствительность падала (Campbell, 1968). Чувствительность в области высоких пространственных частот была ограничена оптикой глаза человека (Campbell, Green, 1965a; Campbell, Gubisch, 1966), в области низких – функциональными особенностями передачи сигнала в ретино-геникуло-стриарном пути (Campbell et al., 1968, 1969a, 1969b). Кемпбеллом и Робсоном было высказано также предположение о наличии большого числа параллельных каналов в зрительной системе (Campbell and Robson, 1968). Ими было проведено измерение порогов контрастной чувствительности для решеток с синусоидальным и прямоугольным профилями освещенности и было показано, что чувствительность к прямоугольным решеткам превышает чувствительность к синусоидальным: это превышение было во столько раз больше, во сколько раз амплитуда первой гармоники в спектре прямоугольной решетки выше контраста самой прямоугольной решетки, что подтвердило способность зрительной системы реагировать на отдельные компоненты спектра изображения. Тем самым через 100 лет догадка Маха о применимости Фурье-анализа к исследованию зрительной системы получила экспериментальное обоснование.

В дальнейшем существование пространственно-частотных каналов в зрительной системе было подтверждено исследованиями адаптации к решеткам с заданной пространственной частотой и ориентацией (Blakemore, Campbell, 1969a, 1969b). Так, при рассмотрении в течение продолжительного времени решетки определенной пространственной частоты с высоким контрастом чувствительность зрительной системы к этой пространственной частоте снижается. При этом затрагивается не только частота, вызывающая адаптацию, но и соседние пространственные частоты. Ширина полосы частот, в пределах которой происходит адаптация, составляет 1,5 октавы, что и является, согласно модели Кемпбелла и Робсона, шириной пространственно-частотного канала. Максимальное снижение контрастной чувствительности наблюдается в центре этого диапазона частот.

Синусоидальные решетки с изменяющимся контрастом, предложенные Ф. Кемпбеллом, вскоре стали широко использовать в клинических исследованиях (Волков и др., 1983a, 1983b; Шелепин и др., 1981, 1985; Коскин, Шелепин 2000; Arden, 1983; Bodis-Wollner, 1972; Ginsburg, 1984; Regan et al., 1977; Storch and Bodis-Wollner, 1990). Для дальнейшей оптимизации измерений были предложены разнообразные буквенные таблицы и атласы определения контрастной чувствительности как в высокочастотном (Regan and Neima, 1983; Шелепин и др., 1986; Коскин и др., 2005), так и в низкочастотном диапазоне (Pelli et al., 1988; Шелепин и др., 1986).

В ходе дальнейших исследований было установлено, что для области высоких пространственных частот характерна не только низкая контрастная чувствительность, но и малое число одновременно различимых градаций яркости. Это явление наблюдалось, например, при одновременном предъявлении в центральном участке поля зрения, в пределах фовеолы (около 20 угл. мин), нескольких небольших дисков различной яркости. Оказывается, в этих условиях число различимых градаций яркости составляет всего 2–4 уровня, а для более точного описания полутонов тестовые изображения должны превосходить размеры фовеолы. На пределе разрешения контрастная чувствительность крайне низка, так как каждый элемент фовеолы может воспроизводить лишь три уровня сигнала: черное и белое относительно серого фона, а также сам фон (как отсутствие сигнала). Было показано, что малое число градаций яркости позволяет увеличить информационную пропускную способность фовеолы за счет повышения ее разрешающей способности (Shelepin, Pronin, 2006).



В норме контрастная чувствительность зависит от многих факторов. К ним относятся: рефракция, дифракция и аберрации глаза, яркость, ориентация и размер тестовых стимулов, а также положение стимулов в поле зрения, а их эксцентриситет – от точки фиксации взора. На рис. 4а показано смещение чувствительности в область низких пространственных частот с эксцентриситетом для верхней граничной частоты и для оптимальной частоты. На рис. 4б – изображение лица, смоделированное с помощью цифровой обработки при условии точки фиксации взора на одном глазу.

Помимо пространственно-частотного подхода, в 50-е годы возник еще один плодотворный подход к исследованию контрастной чувствительности, связанный с теорией обнаружения сигналов на фоне шумов. В основе данного подхода лежит теория статистических решений (Котельников, 1933), получившая после пионерских работ В. Таннера, Д. Светса и Н. Н. Красильникова (Swets, 1964; Красильников, 1958) широкое распространение в исследованиях зрительной системы (Красильников, 1986; Леонов, 1977) Малоконтрастный объект, который необходимо обнаружить, можно трактовать как сигнал; способность зрительной системы к обнаружению подобных слабых сигналов лимитируется шумами, состоящими из двух компонентов: внутреннего шума, возникающего в результате флуктуационных процессов в нейронных сетях, и внешнего шума, обусловленного квантовой природой света (так называемый фотонный шум, оказывающий существенное влияние лишь при низких уровнях освещенности).

То, что именно шумы являются фактором, определяющим величину порогового контраста, было убедительно показано в экспериментах Кемпбелла и Грина с монокулярной и бинокулярной контрастной чувствительностью (Campbell, Green, 1965b): бинокулярная контрастная чувствительность для всех пространственных частот от минимума до предельно высокой, но еще видимой пространственной частоты отличается от монокулярной в 1,4 раза (в $\sqrt{2}$ раз), что полностью соответствует теоретически предсказанной величине.

Позже в рамках данного подхода была разработана модель, позволяющая аналитически описать пространственно-частотную контрастную чувствительность человека (Красильников, 1958, 1961; Красильников, Шелепин, 1996а, 1996б; Barten, 1999). Было показано, что при наблюдении стимулов в пороговых условиях имеет место согласованная пространственная фильтрация, в результате чего происходит извлечение сигнала из шума (Красильников, Шелепин, 1996а, 1996б, 1997; Shelepin et al., 1996b, 2000; Shelepin, Krasilnikov, 1996c; Krasilnikov et al., 2000), а также продемонстрирована связь между особенностями внутренних шумов и характерной формой кривой пороговой контрастной чувствительности, со спадом на высоких и низких частотах. Снижение контрастной чувствительности в области низких пространственных частот обусловлено не только торможением в периферической части рецептивных полей, но и особенностями спектра внутреннего шума, который возрастает в области низких частот (Shelepin et al., 1992; Красильников, Шелепин, 1996а, 1996б, 1997) (рис. 3). В области высоких частот существенный вклад начинает вносить шум дискретизации. Это возрастание внутреннего шума на обоих краях частотного диапазона объясняет высокую чувствительность наблюдателей в области средних пространственных частот.

Подход, основанный на учете влияния на контрастную чувствительность внутреннего шума, оказался плодотворным и при исследованиях различных форм патологии зрения. Известно, что при предъявлении тестовых решеток на фоне помехи с разной дисперсией у здоровых наблюдателей происходит снижение контрастной чувствительности (Трифонов



и др. 1990) (рис. 2а, 2б). Снижение контрастной чувствительности при патологии, в частности, у пациентов с ранней стадией рассеянного склероза, обусловлено возрастанием внутреннего шума (Muravyova et al., 2001, 2006; Муравьева и др., 2004, 2008). Эта аналогия подтверждает справедливость расчета внутреннего шума как эквивалентного (добавлению внешней помехи разного значения). Уровень внутреннего шума у пациентов отражает их состояние (Muravyova et al., 2001, 2006; Муравьева и др., 2004).

Развитие телевизионной, дисплейной техники также невозможно без измерений контрастной чувствительности. Измерение контраста давно уже входит в испытательные телевизионные таблицы и представлено в соответствующих учебниках по телевизионной технике (Рыфтин, 1967). Измерение частотно-контрастных характеристик позволяет оценивать четкость воспроизведения изображений (Полосин, Со, 2008). Знание о полосе воспринимаемых пространственных частот позволяет сжать полосу передаваемых частот в телевизионном сигнале. (Цуккерман, Шостацкий, 1978). Сжатие информации при сохранении или передаче изображений с учетом локального частотно-контрастного описания наглядно демонстрирует пример повседневного использования популярного формата JPEG. Оценка характеристик утомления оператора при работе с видеотерминалами также невозможна без учета частотно-контрастных характеристик (Бойко и др., 1989; Павлов и др., 1989). Так, например, было показано, что полосовая адаптация зрительной системы к пространственной частоте строк и к временной частоте мельканий экрана приводит к утомлению оператора. Было продемонстрировано выраженное отрицательное влияние биений между частотой мелькания экрана и частотой мелькания люминисцентных ламп общего освещения помещений. Поэтому массовое введение этих (энергосберегающих) источников света в помещениях с дисплейной техникой приводит к чрезмерным нагрузкам и неизбежным потерям в главном – в состоянии человека.

Итак, за свою более чем двухтысячелетнюю историю исследования контрастной чувствительности проделали большой путь – от открытия первых эмпирических законов до построения математических моделей, описывающих с единой точки зрения широкий круг явлений. Результатом этого развития являются современные методы и средства, позволяющие проводить исследования контрастной чувствительности в области экспериментальной и инженерной психологии, в повседневной клинической практике, для исследования механизмов восприятия натуральных сцен, для решения инженерных задач в области телевизионной техники, техники цифровой обработки изображений. Появилась возможность измерять не только пороги контрастной чувствительности, но и определять факторы, их ограничивающие: уровень и статистические характеристики внутреннего шума зрительной системы человека.

Литература

- Бардин К. В. Проблема порогов чувствительности и психофизические методы. М.: Наука. 1976.
- Бойко Э. В., Волков В. В., Колесникова Л. Н., Шелепин Ю. Е., Исследование механизмов нарушения зрительного восприятия при работе человека с видеотерминалами // Сенсорные системы. 1989. Т. 3. № 3. С. 307–313.
- Бугер П. Оптический трактат о градации света / Перев. Н. А. Толстого и П. П. Феофилова. М.-Л.: Изд-во АН СССР. 1950.
- Бондарко В.М., Данилова М.В., Красильников Н.Н., Леушина Л.И., Невская А.А., Шелепин Ю.Е. Пространственное зрение. СПб.: Наука. 1999.



- Волков В. В., Колесникова Л. Н., Шелепин Ю. Е. Методы клинической визоконтрастометрии // Вестн. офтальмол. 1983а. № 3. С. 59–61.
- Волков В. В., Колесникова Л. Н., Левкович Ю. И., Мяло Н. М., Шелепин Ю. Е. Методы визоконтрастометрии // Физиология человека. 1983б. Т. 9. № 6. С. 1030–1035.
- Волков В. В., Шелепин Ю. Е., Колесникова Л. И. Атлас и пособие по визоконтрастометрии. Л.; ЦВМУ. 1987.
- Волков В. В., Луизов А. В., Овчинников Б. В., Травникова Н. П. Эргономика зрительной деятельности человека. Л.: Машиностроение. 1989.
- Глезер В. Д., Цуккерман И. И. Информация и зрение. М.-Л.: Изд-во АН СССР. 1961.
- Зворыкин В. К. Телевидение при помощи катодных трубок. М.: Энергоиздат. 1933.
- Коскин С. А., Бойко Э. В., Соболев А. Ф., Шелепин Ю. Е. Механизмы распознавания контурных «исчезающих» оптотипов // Российский физиологический журнал им. И. М. Сеченова. 2005. Т. 91. № 10. С. 1080–1090.
- Коскин С. А., Шелепин Ю. Е. Визоконтрастометрия // Современная офтальмология /Под ред. В. Ф.Даниличева. СПб.: Изд-во «Питер». 2000. Гл. 5. С. 195–209.
- Котельников В. А. О пропускной способности эфира и проволоки в электросвязи // Материалы к I Всесоюзному съезду по вопросам технической реконструкции дела связи и развития слаботочной промышленности. М.: Всесоюзный энергетический комитет. 1933.
- Кравков С. В. Глаз и его работа. М.-Л.: Изд-во АН СССР. 1950.
- Красильников Н. Н. Влияние шумов на контрастную чувствительность и разрешающую способность приемной телевизионной трубки // Техника телевидения. 1958. Т. 25. С. 26–43.
- Красильников Н. Н. Помехоустойчивость телевизионных устройств. М.: Госэнергоиздат. 1961.
- Красильников Н. Н. О вероятности правильного опознавания изображений, переданных малокадровыми телевизионными системами, в присутствии шума // Радиотехника. 1970. Т. 25. № 6. С. 10–15.
- Красильников Н. Н. Теория передачи и восприятия изображений. М.: Радио и связь. 1986.
- Красильников Н. Н., Шелепин Ю. Е. Частотно-контрастная характеристика зрительной системы при наличии помех // Физиология человека. 1996а. Т. 22. № 4. С. 33–38.
- Красильников Н. Н., Шелепин Ю. Е. Маскировка как результат согласованной фильтрации в зрительной системе человека // Физиология человека. 1996б. Т. 22. № 5. С. 99–103.
- Красильников Н. Н., Шелепин Ю. Е. Функциональная модель зрения // Оптический журнал. 1997. Т. 64. № 2. С. 72–82.
- Красильников Н. Н., Красильникова О. И., Шелепин Ю. Е. Модель формирования частотно-контрастной характеристики зрительной системы в зависимости от освещенности сетчатки // Сенсорные системы. 1997. Т. 11. № 3. С. 333–339.
- Красильников Н. Н., Шелепин Ю. Е., Красильникова О. И. Фильтрация в зрительной системе человека в условиях порогового наблюдения // Оптический журнал. 1999а. Т. 66. № 1. С. 5–14.
- Красильников Н. Н., Шелепин Ю. Е., Красильникова О. И. Применение принципов оптимального наблюдателя при моделировании зрительной системы человека // Оптический журнал. 1999б. Т. 66. № 9. С. 17–24.
- Кремешный А. И., Корочкин А. А., Бердочник А. Д. Теоретические основы расчетов на освещение наземных (морских) объектов // Сборник научных трудов ХУВС. Харьков: 2009. Вып. 1 (19). С. 137–140.
- Лазарев А. Н., Николаев А. Г., Хрунов Е. В. Оптические исследования в космосе. Л.: Гидрометеоздат. 1978.
- Леонов Ю. П. Теория статистических решений и психофизика. М.: Наука. 1977.
- Макашова Н. В., Ерохина Е. В. Частотно-контрастная характеристика глаза и критическая частота слияния мельканий (КЧСМ) у больных ретробульбарным невритом // Межобластная конф.



офтальмологов. Псков: 1981. Т. 2. С. 233–234.

Митов Д. Л., Василев А. Г. Объединение пространственных фильтров при извлечении контуров изображений // *Оптический журнал*. 1999. Т. 66. № 9. С. 73–80.

Муравьева С. В., Шелепин Ю. Е., Дешкович А. А. Зрительные вызванные потенциалы человека на шахматный паттерн разного контраста в условиях помехи при рассеянном склерозе // *Российский физиол. журн. им. И. М. Сеченова*. 2004. Т. 90. № 4. С. 463–473.

Муравьева С. В., Дешкович А. А., Шелепин Ю. Е. Магно- и парвосистемы человека и избирательные нарушения их работы // *Российский физиол. журн. им. И. М. Сеченова*. 2008. Т. 94. № 6. С. 637–649.

Нестеров В. К., Тиболов А. С., Шелепин Ю. Е. Сравнение характеристик поля зрительных рецепторов и матриц фотоэлектрических приемников при предельно низких освещенностях // *Оптический журнал*. 2009. Т. 76. № 7. С. 61–69.

Островская М. А. Частотно-контрастная характеристика глаза // *Оптико-механическая промышленность*. 1969. № 2. С. 51–54.

Павлов Н. Н., Данилова М. В., Шелепин Ю. Е. Оптимизация системы человек – дисплей // *Техника кино и телевидения*. 1989. № 11. С. 8–14.

Полосин Л. Л., Со И. А. О требованиях к четкости воспроизведения изображений // *Телерадиовещание*. 2008. № 1. С. 35–39.

Рыфтин А. Я. Телевизионная система. М.: Советское радио. 1967.

Травникова Н. П. Эффективность визуального поиска. 1985. М.: Машиностроение.

Трифонов М. И., Шаревич В. Г., Шелепин Ю. Е. Исследование частотно-контрастной характеристики зрительной системы в условиях помех // *Физиология человека*. 1990. Т. 16. № 2. С. 41–45.

Цуккерман И. И. О согласовании пространственно-частотных фильтров зрительного анализатора со статистикой изображений // *Биофизика*. 1978. Т. XXIII. Вып. 6. С. 1108–1109.

Цуккерман И. И., Шостацкий Н. Н. Анизотропия пространственно-частотной характеристики зрения // *Физиология человека*. 1978. Т. 4. № 1. С. 17–20.

Шаде О. Г. Новая система определения и измерения четкости изображения. Оценка качества оптического изображения // *Сто лет национального бюро стандартов США*. 1959. С. 243–274.

Шелепин Ю. Е., Колесникова Л. Н., Мяло Н. М. Контрастная чувствительность нормальной и патологически измененной зрительной системы человека // *Межобластная конф. офтальмологов*. Псков: 1981. Т. 2. С. 146–147.

Шелепин Ю. Е., Колесникова Л. И., Левкович Л. Н. Визоконтрастометрия. Л.: Наука. 1985.

Шелепин Ю. Е., Макулов В. Б., Паук В. Н. Новые опто типы для офтальмоэргономики // *Матер. симпоз. «Офтальмоэргономика операторской деятельности»*. Л.: ВМА. 1986.

Шелепин Ю. Е., Павлов Н. Н., Макулов В. Б., Паук В. Н., Волков В. В., Сомов Е. Е. Центр компьютерной видеометрии. Принцип организации, результаты работы, перспективы развития // *2-ое совещание «Медицинские аспекты физиологии сенсорных систем»*. М.: Институт химической физики АН СССР. 1987.

Шелепин Ю. Е., Макулов В. Б., Красильников Н. Н., Чихман В. Н., Пронин С. В., Даниличев В. Ф., Коскин С. А. Иконика и методы оценки функциональных возможностей зрительной системы // *Сенсорные системы*. 1998. № 3. С. 319–328.

Шелепин Ю. Е., Глезер В. Д., Бондарко В. М., Павловская М. Б. Пространственное зрение. Руководство по физиологии / Под ред. А. Л. Бызова. М.: Наука. 1992. Гл. 10. Зрение. С. 528–585.

Шелепин Ю. Е. Пространственно-частотные характеристики и острота зрения человека // *Биофизика сенсорных систем: Учебное пособие* / Под ред. В. О. Самойлова. СПб.: ИнформМед. 2007. С. 60–101.

Arden G. B. Recent development in clinical contrast sensitivity testing // *Advances in diagnostic visual optics*. Berlin: Springer Verlag. 1983.

Barlow H. B. Retinal Noise and Absolute Threshold // *JOSA*. 1956. V. 46. № 8. P. 634–639.

Barlow H. B. Temporal and Spatial Summation in Human Vision at Different Background Intensities //



J. Physiol. 1958. V. 141. P. 337–350.

Barten Peter G. J. Contrast Sensitivity of the human eye and its effects on image quality // The International Society for Optical Engineering, Bellingham. Washington: SPIE Optical Engineering Press. 1999. P. 47–50.

Berry G. A. On central amblyopia // Ophthalmic Hospital Reports. 1880. V. 10. P. 44–55.

Bjerrum J. Untersuchungen über den Lichsinn und den Raumsinn bei verschiedenen Augenkrankheiten. Albrecht von Graefe's Archiv für Ophthalmologie. 1884 (See Ophthalmic Review (1886) 5: 170–172 for a précis in English.).

Blackwell H. R. Contrast thresholds of the human Eye // JOSA. 1946. V. 36. № 11. P. 624–643.

Blakemore C., Campbell F. W. Adaptation to spatial stimuli // J. Physiol. 1969a. 200. P. 11–13.

Blakemore C., Campbell F. W. On the existence of neuron's in the human visual system selectively sensitive to the orientation and size of retinal images // J. Physiol. 1969b. 203. P. 237–260.

Bodis-Wollner I. Visual acuity and contrast sensitivity in patients with cortical lesions // Science. 1972. V. 178. P. 769–771.

Bouguer P. Traité d'Optique sur la gradation de la lumière. Paris: M l'Abbé de la Caille. 1760.

Campbell F. W. The Human Eye as an Optical Filter // Proc. of IEEE. 1968. V. 56. №6. P. 1009–1014.

Campbell F. W. The Transmission of Spatial Information through the Visual System // Neuroscience. 1974. P. 95–103.

Campbell F. W., Cleland B. G., Cooper G. F., Enroth-Cugell Christina. The angular selectivity of visual cortical cells to moving gratings // J. Physiol. 1968. 198(1). P. 237–250.

Campbell F. W., Cooper G. F., Enroth-Cugell Chr. The spatial selectivity of the visual cells of the cat // J. Physiol. 1969a. 203(1). P. 223–235.

Campbell F. W., Cooper G. F., Robson J. G. The spectral selectivity of visual cells of the cat and squirrel monkey // J. Physiol. 1969b; V. 204(1). P. 120–121.

Campbell F. W., Green D. G. Optical and retinal factors affecting visual resolution // J. Physiol. 1965a. V. 181. P. 576–593.

Campbell F. W., Green D. G. Monocular versus Binocular Visual Acuity // Nature. V. 208. 1965b. P. 191–192.

Campbell F. W., Gubisch R. W. Optical quality of the human eye // J. Physiol. 1966. V. 186. P. 558–578.

Campbell F. W. and Robson J. G. Application of Fourier analysis to the visibility of gratings // J. Physiol. 1968. V. 197. P. 551–566.

Conner J. P. and Ganoung R. E. An experimental determination of the visual thresholds at low values of illumination // JOSA. 1935. V. 25. № 9. P. 287–294.

Donders F. C. On the anomalies of accommodation and refraction of the eye. New Sydenham Society. London: 1864.

Fechner G. Elemente der Psychophysik. Leipzig: 1860.

Fridenwald J. S. A new astigmatic chart // J. Ophthalm. 1924. V. 7. P. 8–15.

Ginsburg A. P. A new contrast sensitivity vision tests chart // American J. of Optometry and Physiological Optics. 1984. V. 61. P. 403–407.

Herbart J. Psychologie als Wissenschaft, neu gegründet auf Erfahrung. Metaphysik and Mathematik. Königsberg: 1824.

Kotel'nikov V. A. English edition: Kotel'nikov V.A. 1933. The Theory of Optimum Noise Immunity. McGraw-Hill Book Co. 1959.

Krasilnikov N. N., Krasilnikova O. I., Shelepin Y. E. Perception of achromatic, monochromatic, pure chromatic and chromatic noisy images by real human-observer under threshold conditions // SPIE. 2000. V. 3981. P. 113–121.

Mach E. Über den physiologischen Effect räumlich verheitler Lichtreize // II Sitzungsberichte der



- Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften. 1866. V. 52. P. 303–322.
- Masson A. Études de photometrie électrique // Annales de Chemie et de Physique. 1845. V. 14. P. 129–195.
- Muravyova S. V., Krasilnikov N. N., Shelepin Y. E., Deshkovich A. A. Does internal noise increased in the visual system of the patients with multiple sclerosis? // Perception. 2001. V. 30. Suppl. P. 113.
- Muravyova S. V., Deshkovich A. A., Fokin V. A., Shelepin Y. E. The properties of internal noise in the visual system of patients with multiple sclerosis // Perception. 2006. V. 30. Suppl. P. 130.
- Nesterov V. K., Tibilov A. S., Shelepin Yu. E. How the field characteristics of photoreceptors compare with those of photoelectric-detector arrays under ultra low illuminance // J. of Optical Technol. 2009. V. 76. № 7. P. 423–429.
- Olzak L. A., Wickens D., Thomas J. P. Why we can't see the forest for the trees: Serial processing of disparate spatial-frequency bands // Perception. 1993. V. 22. Suppl. P. 5.
- Pelli D. G., Robson J. G., Wilkins A. J. The design of a new letter chart for measuring contrast sensitivity // Clinical Vision Sciences. 1988. V. 2. P. 187–199.
- Regan D., Silver R., Murray T. J. Visual acuity and contrast sensitivity in multiple sclerosis – hidden visual loss // Brain. 1977. V. 100. P. 563–579.
- Regan D. and Neima D. Low-contrast letter charts as a test of visual function // Ophthalmol. 1983. V. 90. P. 1192–1200.
- Rushton W. H. Light and dark adaptation // Invest. Ophthalmol. 1972. V. 11. № 6. P. 503–517.
- Schade O. H. Optical and photo-electric analog of the eye // J. of the Opt. Society of America. 1956. V. 46. № 9. P. 721–739.
- Shelepin Y. E., Danilichev V. F., Aleksandrov A. S., Kolesnikova L. N. Damage of the extra striate cortex depresses contrast sensitivity for low spatial frequencies // Perception. 1992. V. 21. Suppl. P. 36.
- Shelepin Y. E., Gilmartin B., Makulov V. B. Astigmatic chart of the contrast sensitivity // Perception. 1996a. V. 25. Suppl. P. 109.
- Shelepin Yu. E., Danilichev V. F., Makulov V. B., Koskin S. A., Krasilnikov N. N. Concussion of the brain and spatial-frequency contrast sensitivity // Perception. 1996b. V. 25. Suppl. P. 80.
- Shelepin Yu. E., Krasilnikov N. N. Contrast sensitivity of the visual system in the presence of external noise // Perception. 1996c. V. 25. Suppl. P. 110.
- Shelepin Y. E., Krasilnikov N. N., Krasilnikova O. I., Chihman V. N. What Visual Perception Model is Optimal in Terms of Signal-to-Noise Ratio? // SPIE. 2000. V. 3981. P. 161–169.
- Shelepin Y. E., Pronin S. V. The foveola pixel discrimination and information capacity // Perception. 2006. V. 35. Suppl. P. 52.
- Snellen H., Landolt E. Ophthalmometrie. Funktionsprüfungen des Auges // Handbuch der gesamten Augenheilkunde. 1874. V. 3. P. 1–248.
- Storch R. L., Bodis-Wollner I. Overview of contrast sensitivity and neuro-ophthalmic disease // Glare and Contrast Sensitivity for Clinicians. Heidelberg: Springer-Verlag. 1990.
- Swanzy H. R. A handbook of the diseases of the eye and their treatment. London: Lewis. 1895.
- Swets J. A., Tanner W. P., Birdsall T. G. Decision. Processes in Perception // Psychol. Review. 1961. Vol. 68. № 5. P. 197–209.
- Swets J. A. Signal detection and recognition by human observers. N. Y.: John Wiley & Sons Inc. 1964.
- Young G. Suggested clinical tests of the threshold of light and color. Transactions of the Ophthalmological Society of the United Kingdom. 38. 1918a. P. 279–281.
- Young G. Threshold tests // British J. of Ophthalm. 1918b. V. 2. P. 384–392; 430–433.
- Weber E. H. De pulsu, resorptione, auditu et tactu: Annotationes anatomical et physiological. Leipzig: 1834.



CONTRAST SENSITIVITY OF THE HUMAN VISUAL SYSTEM

MURAVEVA S.V., I.P. Pavlov Institute of Physiology, RAS, St. Petersburg

PRONIN S.V., I.P. Pavlov Institute of Physiology, RAS, St. Petersburg

SHELEPIN YU.E., I.P. Pavlov Institute of Physiology, RAS, St. Petersburg

This study outlines the history of human contrast sensitivity studies that are paramount in psychophysics. It shows the significance of contrast sensitivity measurements for interpretation of perception processes, their role in the discovery of psychophysics laws, and also significance for evolution of television technology and medicine. It gives a short review of research in basic fundamental factors limiting humans contrast sensitivity, such as external interference and internal noise.

Keywords: contrast sensitivity, thresholds contrast, photometry, additive noise, internal noise, psychophysical law

Transliteration of the Russian references

Bardin K. V. Problema porogov chuvstvitel'nosti i psihofizicheskie metody. M.: Nauka, 1976.

Bojko Je. V., Volkov V. V., Kolesnikova L. N., Shelepin Ju. E. Issledovanie mehanizmov narusheniya zritel'nogo vospriyatija pri rabote cheloveka s videoterminalami // Sensornye sistemy. 1989. T. 3. № 3. S. 307–313.

Buger P. Opticheskiy traktat o gradacii sveta / Perev. N. A. Tolstogo i P. P. Feofilova. M.-L.: Izd-vo AN SSSR. 1950.

Bondarko V.M., Danilova M.V., Krasil'nikov N.N., Leushina L.I., Nevskaja A.A., Shelepin Ju.E. Prostranstvennoe zrenie. SPb.: Nauka. 1999.

Volkov V. V., Kolesnikova L. N., Shelepin Ju. E. Metody klinicheskoj vizokontrastometrii // Vestn. oftal'mol.. 1983 a. № 3. S. 59–61.

Volkov V. V., Kolesnikova L. N., Levkovich Ju. I., Mjalo N. M., Shelepin Ju. E. Metody vizokontrastometrii // Fiziologija cheloveka. 1983 b. T. 9. № 6. S. 1030–1035.

Volkov V. V., Shelepin Ju. E., Kolesnikova L. I. Atlas i posobie po vizokontrastometrii. L.; CVMU. 1987.

Volkov V. V., Luizov A. V., Ovchinnikov B. V., Travnikova N. P. Jergonomika zritel'noj dejatel'nosti cheloveka. L.: Mashinostroenie. 1989.

Glezer V. D., Cukkerman I. I. Informacija i zrenie. M.-L.: Izd-vo AN SSSR. 1961.

Zvorykin V. K. Televidenie pri pomovi katodnyh trubok. M.: Jenergoizdat. 1933.

Koskin S. A., Bojko Je. V., Sobolev A. F., Shelepin Ju. E. Mehanizmy raspoznavaniya konturnyh «ischezajuwih» optotipov // Rossijskiy fiziologicheskiy zhurnal im. I. M. Sechenova. 2005. T. 91. № 10. S. 1080–1090.

Koskin S. A., Shelepin Ju. E. Vizokontrastometrija // Sovremennaja oftal'mologija / Pod red. V. F. Danilicheva. SPb.: Izd-vo «Piter». 2000. Gl. 5. S. 195–209.

Kotel'nikov V. A. O propusknoj sposobnosti jefira i provoloki v jelektrosvjazi // Materialy k I Vsesojuznomu s'ezdu po voprosam tehnichekoj rekonstrukcii dela svjazi i razvitija slabotočnoj promyshlennosti. M.: Vsesojuznyj jenergeticheskiy komitet. 1933.

Kravkov S. V. Glaz i ego rabota. M.-L.; Izd-vo AN SSSR. 1950.

Krasil'nikov N. N. Vlijanie shumov na kontrastnuju chuvstvitel'nost' i razreshajuwuju sposobnost' priemnoj televizionnoj trubki // Tehnika televidenija. 1958. T. 25. S. 26–43.

Krasil'nikov N. N. Pomehoustoichivost' televizionnyh ustrojstv. M.: Gosjenergoizdat. 1961.

Krasil'nikov N. N. O verojatnosti pravil'nogo opoznavaniya izobrazhenij, peredannyh malokadrovymi televizionnymi sistemami, v prisutstvii shuma // Radiotekhnika. 1970. T. 25. № 6. S. 10–15.



- Krasil'nikov N. N.* Teorija peredachi i vosprijatija izobrazhenij. M.: Radio i svjaz'. 1986.
- Krasil'nikov N. N., Shelepin Ju. E.* Chastotno-kontrastnaja karakteristika zritel'noj sistemy pri nalichii pomeh // Fiziologija cheloveka. 1996a. T. 22. № 4. S. 33–38.
- Krasil'nikov N. N., Shelepin Ju. E.* Maskirovka kak rezul'tat soglasovannoj fil'tracii v zritel'noj sisteme cheloveka // Fiziologija cheloveka. 1996b. T. 22. № 5. S. 99–103.
- Krasil'nikov N. N., Shelepin Ju. E.* Funkcional'naja model' zrenija // Opticheskij zhurnal. 1997. T. 64. № 2. S. 72–82.
- Krasil'nikov N. N., Krasil'nikova O. I., Shelepin Ju. E.* Model' formirovanija chastotno-kontrastnoj karakteristiki zritel'noj sistemy v zavisimosti ot osvevennosti setchatki // Sensornye sistemy. 1997. T. 11. № 3. S. 333–339.
- Krasil'nikov N. N., Shelepin Ju. E., Krasil'nikova O. I.* Fil'tracija v zritel'noj sisteme cheloveka v uslovijah porogovogo nabljudenija // Opticheskij zhurnal. 1999a. T. 66. № 1. S. 5–14.
- Krasil'nikov N. N., Shelepin Ju. E., Krasil'nikova O. I.* Primenenie principov optimal'nogo nabljudatelja pri modelirovanii zritel'noj sistemy cheloveka // Opticheskij zhurnal. 1999b. T. 66. № 9. S. 17–24.
- Kremeshnyj A. I., Korochkin A. A., Berdochnik A. D.* Teoreticheskie osnovy raschetov na osvevlenie nazemnyh (morskih) ob'ektov // Sbornik nauchnyh trudov. HUVS. Har'kov: 2009. Vyp. 1 (19). S. 137–140.
- Lazarev A. N., Nikolaev A. G., Hrunov E V.* Opticheskie issledovanija v kosmose. L.: Gidrometeoizdat. 1978.
- Leonov Ju. P.* Teorija statisticheskikh reshenij i psihofizika. M.: Nauka. 1977.
- Makashova N. V., Erohina E. V.* Chastotno-kontrastnaja karakteristika glaza i kriticheskaja chastota slijanija mel'kanij (KChSM) u bol'nyh retrobul'barnym nevrinom // Mezhoblastnaja konf. oftal'mologov. Pskov: 1981. T. 2. S. 233–234.
- Mitov D. L., Vasilev A. G.* Ob'edinenie prostranstvennyh fil'trov pri izvlechenii konturov izobrazhenij // Opticheskij zhurnal. 1999. T. 66. № 9. S. 73–80.
- Murav'eva S. V., Shelepin Ju. E., Deshkovich A. A.* Zritel'nye vyzvannye potencijaly cheloveka na shahmatnyj pattern raznogo kontrasta v uslovijah pomehi pri rassejannom skleroze // Rossijskij fiziol. zhurn. im. I. M. Sechenova. 2004. T. 90. № 4. S. 463–473.
- Murav'eva S. V., Deshkovich A. A., Shelepin Ju. E.* Magno- i parvosistemy cheloveka i izbiratel'nye narushenija ih raboty // Rossijskij fiziol. zhurn. im. I. M. Sechenova. 2008. T. 94. № 6. S. 637–649.
- Nesterov V. K., Tibilov A. S., Shelepin Ju. E.* Sravnenie karakteristik polja zritel'nyh receptorov i matric fotoelektricheskikh priemnikov pri predel'no nizkih osvevennostjakh // Opticheskij zhurnal. 2009. T. 76. № 7. S. 61–69.
- Ostrovskaja M. A.* Chastotno-kontrastnaja karakteristika glaza // Optiko-mehanicheskaja promyshlennost'. 1969. № 2. S. 51–54.
- Pavlov N. N., Danilova M. V., Shelepin Ju. E.* Optimizacija sistemy chelovek – displej // Tehnika kino i televidenija. 1989. № 11. S. 8–14.
- Polosin L. L., So I. A.* O trebovanijah k chetkosti vosproizvedenija izobrazhenij // Teleradiovewanie. 2008. № 1. S. 35–39.
- Ryftin A. Ja.* Televizionnaja sistema. M.: Sovetskoe radio. 1967.
- Travnikova N. P.* Jeffektivnost' vizual'nogo poiska. M.: Mashinostroenie. 1985.
- Trifonov M. I., Sharevich V. G., Shelepin Ju. E.* Issledovanie chastotno-kontrastnoj karakteristiki zritel'noj sistemy v uslovijah pomeh // Fiziologija cheloveka. 1990. T. 16. № 2. S. 41–45.
- Cukkerman I. I.* O soglasovanii prostranstvenno-chastotnyh fil'trov zritel'nogo analizatora so statistikoj izobrazhenij // Biofizika. 1978. T. XXIII. Vyp. 6. S. 1108–1109.
- Cukkerman I. I., Shostackij N. N.* Anizotropija prostranstvenno-chastotnoj karakteristiki zrenija // Fiziologija cheloveka. 1978. T. 4. № 1. S. 17–20.
- Shade O. G.* Novaja sistema opredelenija i izmerenija chetkosti izobrazhenija. Ocenka kachestva opticheskogo izobrazhenija // Sto let nacional'nogo bjuro standartov SShA. 1959. S. 243–274.
- Shelepin Ju. E., Kolesnikova L. N., Mjalo N. M.* Kontrastnaja chuvstvitel'nost' normal'noj i patologiches-



ki izmenennoj zritel'noj sistemy cheloveka // Mezhoblastnaja konf. oftal'mologov. Pskov: 1981. T. 2. S. 146–147.

Shelepin Ju. E., Kolesnikova L. I., Levkovich L. N. Vizokontrastometrija. L.: Nauka. 1985.

Shelepin Ju. E., Makulov V. B., Pauk V. N. Novye optotipy dlja oftal'mojergonomiki // Mater. simpoz. «Oftal'mojergonomika operatorskoj dejatel'nosti». L.: VMA . 1986.

Shelepin Ju. E., Pavlov N. N., Makulov V. B., Pauk V. N., Volkov V. V., Somov E. E. Centr komp'juternoj vid-eometrii. Princip organizacii, rezul'taty raboty, perspektivy razvitija // 2-oe soveshanie «Medicinskie aspekty fiziologii sensornyh sistem», M.: Institut himicheskoj fiziki AN SSSR. 1987.

Shelepin Ju. E., Makulov V. B., Krasil'nikov N. N., Chihman V. N., Pronin S. V., Danilichev V. F., Koskin S. A. Ikonika i metody ocenki funkcional'nyh vozmozhnostej zritel'noj sistemy // Sensornye sistemy. 1998. № 3. S. 319–328.

Shelepin Ju. E., Glezer V. D., Bondarko V. M., Pavlovskaja M. B. Prostranstvennoe zrenie. Rukovodstvo po fiziologii / Pod red. A.L. Byzova, M.: Nauka. 1992. Gl. 10. Zrenie. S. 528–585.

Shelepin Ju. E. Prostranstvenno-chastotnye harakteristiki i ostrota zrenija cheloveka // Biofizika sensornyh sistem: Uchebnoe posobie / Pod red. V. O. Samojlova. SPb.: InformMed. 2007. S.60–101.