

МИНИСТЕРСТВО ЗДРАВООХРАНЕНИЯ УКРАИНЫ
Харьковский национальный медицинский университет

ФИЗИОЛОГИЯ И ПАТОЛОГИЯ ЦВЕТООЩУЩЕНИЯ

***Методические указания
для слушателей курсов
последипломного образования
и врачей-интернов***

Утверждено
ученым советом ХНМУ.
Протокол № 4 от 21.04.2015.

**Харьков
ХНМУ
2015**

Физиология и патология цветоощущения : метод. указ. для слушателей курсов последипломного образования и врачей-интернов / сост. П. А. Бездетко, Н. В. Панченко, С. Ф. Зубарев, О. А. Тарануха. – Харьков : ХНМУ, 2015. – 24 с.

Составители П. А. Бездетко
 Н. В. Панченко
 С. Ф. Зубарев
 О. А. Тарануха

Чтобы видеть, нужен свет. Орган зрения человека способен воспринимать свет различной длины волны и яркости; форму и величину предметов; ориентироваться в пространстве; оценивать расстояние между предметами, их объемность. Светочувствительность проявляется уже у бактерий и простейших, достигая совершенства в зрении человека. Первичная зрительная информация происходит в сетчатке глаза – это внутренняя оболочка глаза, выстилающая изнутри глазное дно (*рис. 1*).

Эмбриологически сетчатка является частью коры головного мозга, вынесенной на периферию. Оптический отдел сетчатки представляет собой высокодифференцированную прозрачную нервную ткань с фоторецепторами – высокодифференцированными клетками, состоящими из наружного и внутреннего сегментов и содержащими зрительный пигмент. Квант света, попадая на фоторецепторы, вызывает цепь фотохимических, фотофизических процессов, которые приводят к возникновению и передаче зрительного сигнала следующему

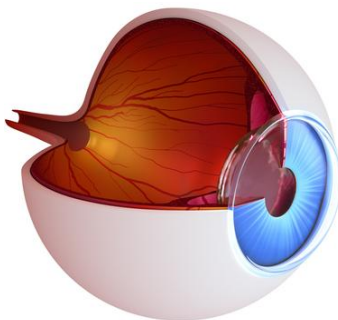


Рис. 1. Сетчатка изнутри выстилает дно глазного яблока

нейрону сетчатки – биполярным, а затем и ганглиозным клеткам. Далее раздражение идет в основной подкорковый центр зрительного анализатора в головном мозге – наружное коленчатое тело, где оканчивается большая часть аксонов ганглиозных клеток сетчатки, т. е. зрительных волокон, идущих в составе зрительного тракта. От наружного коленчатого тела основные пути через зрительную радиацию идут в зрительную кору, структура нейронов которой сложна и многообразна и включает дорсальное и вентральное ядра, претектальную зону, верхнее двухолмие, дополнительные зрительные ядра в покрывке среднего мозга.

Фоторецепторы сетчатки воспринимают световые лучи (фотоны) с длиной волны от 400 до 700 нм: фиолетовый и синий – короткая область спектра (около 400–500 нм), зеленый и желтый – средняя область спектра (около 500–600 нм), красный – область длинных волн спектра (около 600–700 нм) [8, 16, 17].

Почти на всем протяжении, кроме центральной области – макулы (желтого пятна), оптическая часть сетчатки состоит из 10 слоев: 1 – пигментный эпителий; 2 – слой наружных сегментов фоторецепторов; 3 – наружная пограничная мембрана; 4 – наружный ядерный слой, содержащий внутренние сегменты и ядра фоторецепторных клеток; 5 – наружный плексиформный слой с синаптическими контактами между фоторецепторами, биполярными и горизонтальными клетками; 6 – внутренний ядерный слой, содержащий ядра биполярных, амакриновых и горизонтальных

клеток; 7 – внутренний плексиформный слой со множеством разнообразных контактов между биполярными, амакриновыми и ганглиозными клетками; 8 – слой ганглиозных клеток; 9 – слой нервных волокон, образованный аксонами ганглиозных клеток, формирующих зрительный нерв; 10 – внутренняя пограничная мембрана.

Для нормальной функции фоторецепторов сетчатки важнейшее значение имеет пигментный эпителий, анатомически и функционально тесно связанный с наружными сегментами палочек и колбочек.

По мере приближения к желтому пятну строение сетчатки существенно меняется: сначала исчезает слой нервных волокон, затем – ганглиозных клеток, далее – внутренний плексиформный слой, слой внутренних ядер и наружный плексиформный (рис. 2).

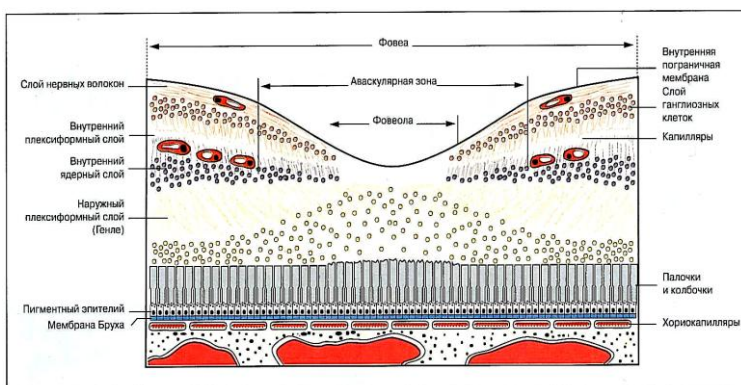


Рис. 2. Схематический вид центрального отдела сетчатки в разрезе

Нейронная связь в сетчатке образована 3 видами нервных элементов: фоторецепторы, биполярные клетки, ганглиозные клетки, т. е. в сетчатке импульс проходит по цепочке из названных 3 основных видов нервных клеток. Функциональное взаимодействие между ними осуществляется через горизонтальные и амакриновые клетки сетчатки.

Как видно, фоторецепторы сетчатки представлены колбочками (около 7 млн) и палочками (около 130 млн). Первые группируются в центральном отделе сетчатой оболочки (макуле), вторые в центре отсутствуют, а их максимальная плотность отмечается в 18–20° от него. Далее к периферии сетчатки количество палочек постепенно уменьшается.

Параметры фоторецепторов

Палочки: длина – 0,06 мм, диаметр – 2 мкм. Наружные членики содержат пигмент родопсин, поглощающий часть спектра электромагнитного светового излучения в диапазоне, по данным разных авторов, синих или зеленых лучей (максимум 505 или соответственно 510 нм).

Колбочки: длина – 0,035 мм, диаметр – 6 мкм. По данным исследователей (1959 г.), в трех различных типах колбочек («красных», «зеленых» и «синих») содержится зрительный пигмент с различными показателями поглощения света. У «красных» R(L)-колбочек (эритролейб) он максимально адсорбирует спектральные лучи с длиной волны ≈ 567 нм, у «зеленых» G(M)-колбочек (хлоролейб) – 558 нм, у «синих» B(S)-колбочек (цианолейб) – 448 нм (максимальная чувствительность при 440 нм, 10% колбочек). Т. Tomita (1965) подтвердил полученные данные – для каждого вида колбочек максимальные изменения электропотенциала наблюдались при определенной цветовой стимуляции: красным (611 нм), зеленым (529 нм) и синим (462 нм) светом.

Окончательное определение цвета производится «центром цвета» в коре головного мозга.

Как сказано выше, электрические сигналы, возникающие при поглощении фотонов фоторецепторами, передаются на биполярные, а затем ганглиозные клетки сетчатки. Горизонтальные и амакриновые клетки сетчатой оболочки осуществляют обработку этих сигналов. Например, если колбочка стимулируется сильно, она посылает подавляющие сигналы через горизонтальные клетки на соседние колбочки, подавляя таким образом «шумы» и увеличивая резкость изображения. Биполярные клетки посылают аналогичные сигналы через амакриновые клетки. Аксоны ганглиозных клеток образуют зрительный нерв, несущий информацию к головному мозгу. В мозге «центр цвета» собирает информацию из различных цветковых каналов и определяет, какой именно цвет виден.

Центр цвета синтезирует информацию, которую он получает из двух «промежуточных» центров: R-G (красный-зеленый) и B-Y (синий-желтый). Информация, поступающая в центр R-G, зависит от относительной силы стимуляции колбочек R и G. Например, когда свет с длиной волны 540 нм падает на сетчатку, он будет стимулировать и R-, и G-колбочки. Однако, поскольку колбочки G стимулируются гораздо сильнее, чем колбочки R, то сообщение, достигающее центра света, является преимущественно зеленым. При попадании на сетчатку света с длиной волны 590 нм колбочки R будут стимулироваться сильнее, чем колбочки G, и человек увидит желтый. Когда на сетчатку падает свет с длиной волны 630 нм, колбочки G не стимулируются, и человек видит красный. Колбочки B посылают информацию в центр B-Y. «Информация Y» не исходит из колбочек Y, потому что таких колбочек не существует. Информация от колбочек R и G дает эффект желтого цвета в центре B-Y.

Существует понятие латерального подавления. Как было сказано выше, когда стимулируются колбочки одного типа (например, R), они могут посылать ингибирующие сигналы на прилежащие колбочки того же типа (например, на другие колбочки R) через горизонтальные и амакриновые

клетки. Поэтому, когда фиолетовый круг окружен красным фоном, колбочки R в фиолетовой области подавляются, делая изображение фиолетового (комбинация красного и синего) объекта более синим, чем он есть на самом деле. Если фиолетовый окружен синим, то первый кажется краснее.

Палочки и колбочки обладают различной световой чувствительностью. Первые функционируют при яркости окружающей среды до $0,01 \text{ кд} \times \text{м}^{-2}$ (обеспечивают ночное, скотопическое зрение и не способны различать цвета), вторые – свыше $10 \text{ кд} \times \text{м}^{-2}$ (дневное, фотопическое зрение). Когда яркость колеблется в пределах от $0,01$ до $10 \text{ кд} \times \text{м}^{-2}$, на определенном уровне функционируют все фоторецепторы (сумеречное, мезопическое зрение).

Благодаря наличию в сетчатке двух видов фоторецепторов человек обладает «палочко-колбочковым зрением», позволяющим видеть в различных условиях освещения.

Таким образом, палочки и колбочки по структуре, содержанию зрительных пигментов, локализации и физиологическому значению отличаются друг от друга. Палочки выполняют функцию периферического зрения. Центральное колбочковое зрение обеспечивает высокую остроту зрения, цветовосприятие, позволяет различать форму, мелкие детали и пространственное расположение предметов, находящихся в центральной части поля зрения.

Богатство цветов сводится к 7 цветам спектра, на которые разлагается, как показал еще Ньютон, солнечный свет, пропущенный через призму. Лучи более 800 нм являются инфракрасными и не входят в состав видимого человеком спектра. Лучи менее 380 нм являются ультрафиолетовыми и не вызывают у человека оптического эффекта. Все цвета разделяются на ахроматические (белые, черные и всевозможные серые) и хроматические (все цвета спектра, кроме белого, черного и серого). Человеческий глаз может различать до 300 оттенков ахроматического цвета и десятки тысяч хроматических цветов в различных сочетаниях. Если на орган зрения человека падают одновременно раздражители всех длин волн, в нем возникает ощущение белого цвета. Если же в пучке света преобладает группа раздражителей определенной длины волны, то возникает ощущение хроматического цвета, соответствующего доминирующей длине волны. Хроматические цвета отличаются друг от друга по трем основным признакам: цветовому тону, яркости (светлоте) и насыщенности. Цветовой тон – качество цвета, которое мы обозначаем словами красный, желтый, зеленый и т. д., характеризуется он длиной волны. Ахроматические цвета не имеют цветового тона. Яркость или светлота цвета – это близость его к белому цвету. Чем ближе цвет к белому, тем он светлее. Насыщенность – это густота тона, процентное соотношение основного тона и примесей к нему. Чем больше в цвете основного тона, тем он насыщенней.

Цветовые ощущения вызываются не только монохроматическим лучом с определенной длиной волны, но и совокупностью лучей с различной длиной волн, подчиненной законам оптического смешения цветов. Каждому основному цвету соответствует дополнительный, от смешения с которым получается белый цвет. Пары дополнительных цветов находятся в диаметрально противоположных точках спектра: красный и зеленый, оранжевый и голубой, синий и желтый. Смешение цветов в спектре, расположенных близко друг от друга, дает ощущение нового хроматического цвета. Например, от смешения красного с желтым получается оранжевый, синего с зеленым – голубой. Все разнообразие ощущения цветов может быть получено путем смешения только трех основных – красного, зеленого и синего, согласно трехкомпонентной теории цветоощущения, которую предложили в 1757 г. М. В. Ломоносов и в 1807 г. английский ученый Томас Юнг. Именно они первыми высказали предположение, что в сетчатке имеются тройкового рода элементы, каждый из которых специфичен только для одного цвета и не воспринимает другого. Как видим, теория цветового зрения Ломоносова–Юнга–Гельмгольца получила экспериментальное подтверждение наличия трех видов колбочек, каждый из которых имеет пигмент, чувствительный к определенному цвету (красному, зеленому, синему). Зрительный пигмент палочек (родопсин) и пигменты колбочек (эритролейб, хлоролейб, цианолейб) чувствительны к различным длинам волн, что и составляет основу световой, цветовой, а также контрастной чувствительности.

Однако в жизни оказывается, что потеря одного цвета связана с изменением всего цветного мирозерцания. Если нет ощущения красного цвета, то и зеленый, и фиолетовый становятся несколько измененными. Через 50 лет Гельмголец, выступивший со своей теорией трехкомпонентности, указал, что каждый из элементов, будучи специфичным для одного основного цвета, раздражается и другими цветами, но в меньшей степени. Зоны охвата цветовой чувствительности различных типов колбочек достаточно широки и значительно перекрываются между собой, особенно для зелено- и красноощущающих колбочек (см. вышеизложенное). Например, красный цвет раздражает сильнее всего красные элементы, но в небольшой степени зеленые и фиолетовые. Зеленые лучи сильно зеленые, слабо красные и фиолетовые. Фиолетовый цвет действует очень сильно на элементы фиолетовые, слабее на зеленые и красные. Если все три рода элементов раздражены в строго определенных отношениях, то получается ощущение белого цвета, а отсутствие возбуждения – ощущение черного цвета. Возбуждение только двух или всех трех элементов двумя или тремя раздражителями в различных степенях и соотношениях ведет к ощущению всей гаммы имеющихся в природе цветов. Люди с одинаковым развитием всех трех элементов имеют, согласно этой теории, нормальное

цветоощущение и называются нормальными трихроматами. Если элементы не одинаково развиты, то наблюдается нарушение восприятия цветов.

На восприятие цвета оказывает влияние одновременный и последовательный контрасты. При одновременном контрасте изменение в цветоразличении возникает в связи с одновременным действием, помимо основного, и других раздражителей, при последовательном – в связи с предшествующим раздражением глаза другим цветом.

В отличие от цветового, существует и световой контраст (контраст по яркости). В процессе наблюдения цвета возникает цветовое утомление и явление адаптации, которое относится к процессам приспособительного характера. При длительном наблюдении цвета отмечается также временное повышение порогов цветоразличения, которое объяснялось ранее утомлением сетчатки. Подобное временное снижение цветоразличения («цветовая астенопия» по Энгелькину или «цветовая адиспаропия» по Рабкину) Энгелькинг трактовал как скрытую патологию цветового зрения. При дальнейшем изучении этот феномен был отнесен к категории физиологических. Цветовая адиспаропия характеризует степень устойчивости хроматического зрения и является индикатором корковой динамики, то есть цветовую астенопию у отдельных людей следует рассматривать как явление физиологическое, свидетельствующее о недостаточной устойчивости хроматического зрения. На характер цветового зрения оказывают влияние слуховые, обонятельные, вкусовые и многие другие раздражители. Под влиянием этих непрямых раздражителей цветовое восприятие может в одних случаях угнетаться, в других усиливаться.

Официальное академическое описание ограниченного цветовосприятия как дефекта зрения появилось на удивление поздно, хотя Ломоносов высказал мысль о наличии в глазу цветочувствительных аппаратов (колбочек сетчатки) трех видов еще в 1756 г. Но лишь в 1798 г. Джон Дальтон (John Dalton) выступил с докладом о частичной цветовой слепоте. Так возник термин «дальтонизм», который связан с именем английского ученого Джона Дальтона, описавшего один из видов цветовой слепоты на основании собственных ощущений и истории своей семьи. Джон Дальтон, как и два его брата, не различал красный цвет, но не знал об этом вплоть до 26 лет. После публикации книги Дальтона слово «дальтонизм» на протяжении долгого времени применялось к любым нарушениям цветового зрения.

Согласно трехкомпонентной теории нормальное цветовое восприятие называется трихромазией. 92% населения, имеющие нормальное цветовое зрение, называются трихроматами. Они имеют все три различных варианта колбочек («красные», «зеленые» и «синие»), нормальную концентрацию пигмента в колбочках (эритролейба у «красных» R-колбочек, хлоролейба у «зеленых» G-колбочек, цианолейба у «синих» В-колбочек) и нормальные электрические свойства сетчатки.

Расстройство цветового зрения бывает врожденным и приобретенным, полным или неполным (частичным). При полной цветовой слепоте все цвета представляются одинаковыми (серыми) и отличаются только яркостью.

Поскольку врожденные нарушения цветового зрения наследуются как признак, сцепленный с X-хромосомой, то они гораздо чаще встречаются у мужчин (8%), чем у женщин (0,5%).

Классификация нарушений цветового зрения (по Нагелю с поправкой Рабкина)

Нормальная трихромазия (восприятие 3 цветов при наличии 3 типов нормально функционирующих колбочек).

Аномальная трихромазия (восприятие 3 цветов в аномальной пропорции).

Протаномалия – патологическое восприятие красного цвета:

- незначительное снижение цветовосприятия;
- существенное снижение цветовосприятия;
- снижение цветовосприятия на грани его утраты.

Дейтераномалия – аномальное восприятие зеленого цвета:

- незначительное снижение цветовосприятия;
- существенное снижение цветовосприятия;
- снижение цветовосприятия на грани утраты.

Тританомалия – аномальное восприятие синего цвета.

Дихромазия (восприятие 2 цветов из-за отсутствия какого-либо типа колбочек):

- протанопия (отсутствие восприятия красного цвета);
- дейтеранопия (отсутствие восприятия зеленого цвета);
- тританопия (отсутствие восприятия синего цвета).

Монохромазия (восприятие только одного цвета из-за дефекта или отсутствия 2 типов колбочек).

Ахромазия (черно-белое восприятие из-за грубой патологии колбочкового аппарата):

- монохроматизм голубых колбочек;
- палочковый монохроматизм (наследование по аутосомно-рецессивному типу).

Как видно, расстройства цветоощущения могут проявляться либо аномальным восприятием цветов (ослаблением цветовой чувствительности к одному из цветов), которое называется цветоаномалией, или аномальной трихромазией, либо полным выпадением одного из трех компонентов – дихромазией. В редких случаях наблюдается только черно-белое восприятие – монохромазия.

Среди врожденных расстройств цветовосприятия наиболее часто встречается аномальная трихромазия. На ее долю приходится до 70% всей

патологии цветовосприятия. При аномальной трихромазии два из трех пигментов колбочек нормальны, однако третий функционирует недостаточно эффективно.

Каждый из трех цветорецепторов в зависимости от порядка их расположения в спектре принято обозначать порядковыми греческими цифрами: красный – первый (протос), зеленый – второй (дейтерос) и синий – третий (tritос). Таким образом, аномальное восприятие (ослабление восприятия) красного цвета называется протаномалией, зеленого – дейтераномалией, синего – тританомалией, а людей с таким расстройством соответственно протаномалами, дейтераномалами и тританомалами.

По степени выраженности цветоаномалии различают аномалии типов А, В, С. К цветоаномалиям А относятся более далекие от нормы формы, к С – более тяготеющие к норме. Промежуточное положение занимают цветоаномалии типа В.

В основном встречаются врожденные нарушения на красный и зеленый цвета. Врожденная слепота на сине-фиолетовый цвет практически не наблюдается.

Дихромазия наблюдается также в трех формах: протанопии, дейтеранопии, тританопии. Лиц с данной патологией называют протанопами, дейтеранопами и тританопами. Именно протанопией страдал знаменитый физик Дальтон.

У дихроматов колбочки сами по себе нормальны, однако одна из трех содержит «неправильный» пигмент. Например, при дейтеранопии колбочки G нормальны во всем, кроме того, что содержат эритролейб (красный пигмент) вместо хлоролейба (зеленого пигмента). При протанопии колбочки R нормальны, за исключением того, что содержат хлоролейб (зеленый пигмент) вместо эритролейба (красного пигмента). Тританопия – это дефект колбочек В.

Приведенные выше врожденные расстройства цветовосприятия всегда двусторонние, не сопровождаются нарушением других зрительных функций и обнаруживаются только при специальном исследовании. Частота протаномалии у мужчин составляет примерно 0,9%, протанопии – 1,1%, дейтераномалии – 3–4% и дейтеранопии – 1,5%. Тританомалия и ританопия встречаются крайне редко. У женщин дейтераномалия встречается с частотой 0,3%, а протаномалии – 0,5%.

Крайне редко встречается ахромазия – полная цветовая слепота. Менее 0,01% всех людей страдают полной цветовой слепотой. Никакие цветовые тона в этих случаях не различаются, все воспринимается в сером цвете (видны градации серого), как на черно-белой фотографии. При этом наблюдаются также другие изменения в состоянии глаз: светобоязнь, центральная скотома, низкая острота зрения. У таких монохроматов обычно отмечается нарушение световой адаптации при фотопическом уровне

освещения. Глаза монохроматов легко ослепляются, поэтому они плохо различают форму при дневном свете, что вызывает фотофобию. Они носят темные солнцезащитные очки даже при нормальном дневном освещении. В сетчатке монохроматов при гистологическом исследовании обычно не находят никаких аномалий. Считается, что в их колбочках вместо зрительных пигментов (эритролейба, хлоролейба, цианолейба) содержится родопсин.

Полная цветовая слепота большей частью проявляется как семейное расстройство с рецессивным типом наследования.

Исследование цветового зрения применимо в клинической оценке при наследственных врожденных дистрофиях сетчатки, когда нарушение восприятия цветов может проявляться раньше, чем снижение зрения или дефекты поля зрения.

В случае наследственных макулярных дегенераций, затрагивающих, например, центральную часть сетчатки (колбочки), часто первоначально наблюдается только нарушение восприятия красного (болезнь Штаргардта). Для синдрома врожденной дисфункции колбочек могут быть характерными протанопия, дейтеранопия, тританопия, ахроматопсия. При пигментном ретините (изначально страдают палочки) отмечается тританопия (слепота на синий цвет) и генерализованное снижение цветоощущения – «анархическое». Врожденная атрофия зрительного нерва вызывает первоначально нарушение восприятия синего.

Приобретенные изменения цветоощущения могут быть обусловлены офтальмологической (заболевания хориоидеи, сетчатки, зрительного нерва) и общесоматической патологией (заболевания центральной нервной системы, вегетативной нервной системы и др.). Кроме того, на появление нарушения цветоощущения могут влиять возрастные изменения (помутнение хрусталика, т. е. катаракта), а также прием некоторых медикаментов.

В этих случаях нарушения цветоощущения бывают в одном или обоих глазах, выражаются в нарушении восприятия всех трех цветов (в отличие от врожденных, для которых характерно, в основном, нарушение восприятия красного и зеленого цвета). Обычно при поражении зрительного нерва пациент делает те же ошибки, что и лица с протаномалией и дейтераномалией; при заболеваниях сетчатки – те же, что и лица с тританомалией (правило Кельнера, 1912 г.). При повреждении сетчатки наблюдается нарушение восприятия синего (сине-желтого). Синие колбочки похожи во многих свойствах на палочки, поэтому при развитии дистрофических процессов, которые затрагивают сначала палочки, синие колбочки повреждаются первыми среди колбочек. Функция механизмов дополнительных цветов существенно связана с ганглионарными клетками зрительного нерва. Последний содержит преимущественно волокна из области колбочек, где доминируют рецепторы к красному и зеленому.

При патологии зрительного нерва нарушается восприятие красно-зеленого; цвета теряют насыщенность или кажутся бледными.

Приобретенные изменения цветоощущения обычно сопровождаются расстройствами других зрительных функций и в отличие от врожденных расстройств могут претерпевать изменения в процессе заболевания и его лечения. С улучшением состояния зрительного аппарата цветоощущение может восстановиться.

К приобретенным расстройствам цветоощущения относится и видение предметов, окрашенных в какой-либо один цвет. В зависимости от тона окраски различают эритропсию (красный), ксантопсию (желтый), хлоропсию (зеленый) и цианопсию (синий). Эритропсия и цианопсия наблюдаются нередко после экстракции катаракты, а ксантопсия и хлоропсия – при отравлениях и интоксикациях.

Оценка цветового восприятия человека имеет важную диагностическую ценность как при определении профессиональной пригодности для работы человека в отраслях, требующих нормального цветовосприятия, так и при возможно раннем диагностировании начинающегося патологического процесса в зрительном анализаторе, когда нарушение восприятия цветов может проявляться раньше, чем других функций.

Имеется более десятка способов и тестов для диагностики врожденных и приобретенных нарушений цветового зрения человека. Определение цветового зрения включает: исследование порогов цветовой чувствительности, выявление цветовых расстройств и дифференцирование их по формам и степеням.

Для оценки функции и дефектов цветового зрения человека используют три типа методов: спектральные, электрофизиологические, метод пигментных таблиц. Выделяют количественные и качественные тесты для исследования; количественные тесты чувствительны и специфичны.

Псевдоизохроматические таблицы. Исследовать нарушения цветоощущения можно с помощью многоцветных тестов, пигментных таблиц, созданных по принципу полихроматичности. К ним относятся, например, полихроматические таблицы Штиллинга, Ишихара, Шаафа, Флетчера-Гамблина, Рабкина и др. Таблицы построены по сходному принципу: каждая включает фигуры, цифры или буквы, составленные из элементов (кружков) одного тона, но разной яркости и насыщенности, располагающихся на фоне из сходного сочетания кругов другого цвета. Фигуры, составленные из кружковой мозаики одного тона, но разной яркости, различимы трихроматами, но неразличимы протанопами или дейтеранопами.

В Украине офтальмологи считают наиболее общепринятым метод, предложенный Е. Б. Рабкиным, основанный на использовании основных свойств цвета:

- цветового тона, который является основным признаком цвета и зависит от длины световой волны;

- насыщенности, определяемой долей основного тона среди примесей другого цвета;
- яркости, или светлоты, которая проявляется степенью близости к белому цвету (степень разведения белым цветом).

Диагностические таблицы построены по принципу уравнивания кружочков разного цвета по яркости и насыщенности. С их помощью обозначены геометрические фигуры и цифры ("ловушки"), которые видят и читают цветоаномалы. В то же время они не замечают цифру или фигуру, выведенную кружочками одного цвета. Следовательно, это и есть тот цвет, который не воспринимает обследуемый.

Полихроматические таблицы чувствительны и специфичны, используются для выявления врожденных дефектов цветового зрения и дифференцировки их от нормальной трихромазии. Таблицы позволяют отличить дихроматов от аномальных трихроматов. Кроме того, с их помощью можно уточнить форму установленного нарушения цветового зрения (протанопия, дейтеранопия, протаномалия, дейтераномалия), степень его выраженности (А, В, С) и выявить приобретенные нарушения восприятия желтого и синего цветов (тританопические дефекты).

При выявлении нарушений цветоощущения составляют карточку обследуемого, образец которой имеется в приложениях к таблицам Рабкина. Нормальный трихромат прочитает все 25 таблиц, аномальный трихромат типа С – более 12, дихромат – 7–9 таблиц.

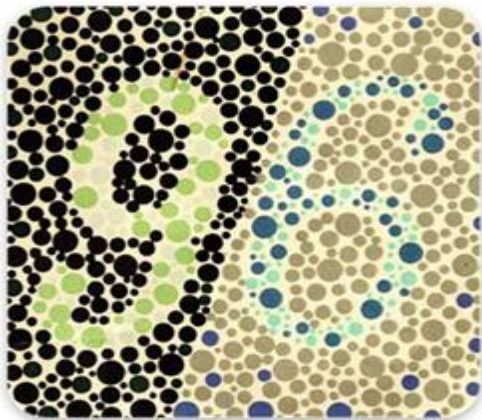
Аномальные трихроматы хуже различают некоторые цвета, чем трихроматы с нормальным зрением, и в тестах на сопоставление цветов они используют красный и зеленый цвет в других пропорциях.

Дихроматы описывают все цвета с помощью лишь двух чистых цветов. Как у протанопов, так и у дейтеранопов нарушена работа красно-зеленого канала. Протанопы путают красный цвет с черным, темно-серым, коричневым и в некоторых случаях, подобно дейтеранопам, с зеленым. Определенная часть спектра кажется им ахроматической. Для протанопы эта область между 480 и 495 нм, для дейтеранопы – между 495 и 500 нм. Редко встречающиеся тританопы путают желтый цвет и синий. Сине-фиолетовый конец спектра кажется им ахроматическим – как переход от серого к черному. Область спектра между 565 и 575 нм тританопы также воспринимают как ахроматический.

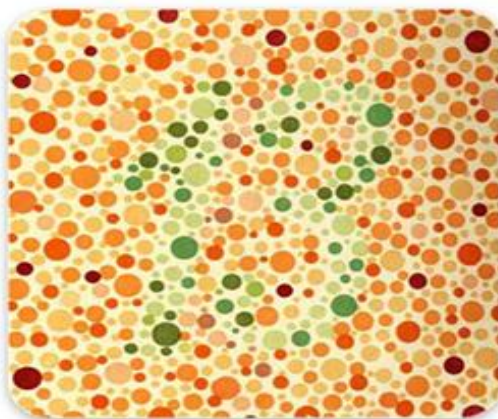
Таблицы Рабкина III, IV, XI, XIII, XVI, XVII–XXII, XXVII неправильно или совсем не различают дихроматы. Форма аномальной трихромазии, протаномалия и дейтераномалия дифференцируются по таблицам VII, IX, XI–XVIII, XXI. Например, в таблице IX дейтераномалы различают цифру 9 (состоит из оттенков зеленого), протаномалы – цифру 6 или 8, в таблице XII дейтераномалы в отличие от протаномалов различают цифру 12 (состоит из оттенков красного цвета разной яркости). Случаи, когда

совокупность ответов исследуемого не соответствует приведенной в руководстве схеме и количество правильно прочитанных таблиц больше, чем предусмотрено для протанопов и дейтеранопов, могут быть отнесены к аномальной трихромазии.

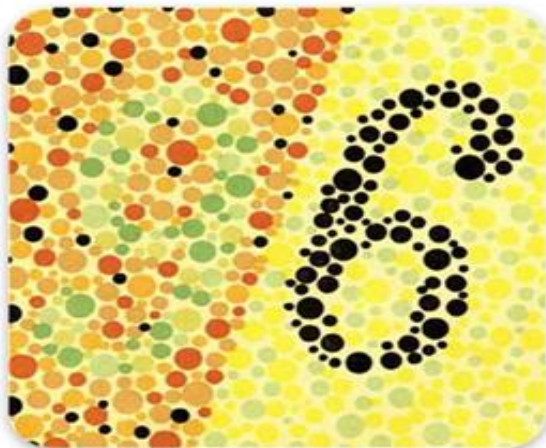
Примеры ответов на предъявляемые тесты



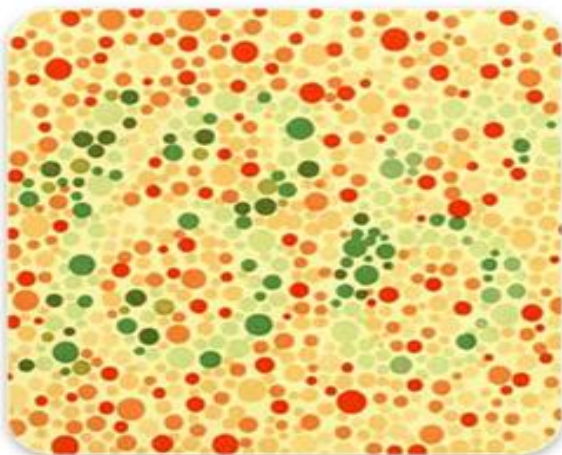
Тест 1. Все нормальные трихроматы, аномальные трихроматы и дихроматы различают в таблице одинаково правильно цифры 9 и 6 (96).



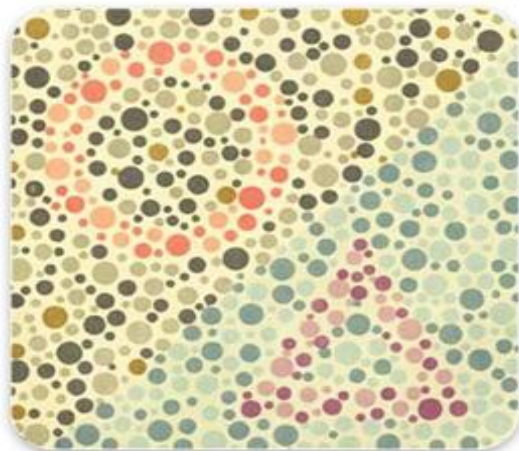
Тест 2. Нормальные трихроматы различают в таблице цифры 1 и 3 (13). Протанопы и дейтеранопы читают эту цифру как 6.



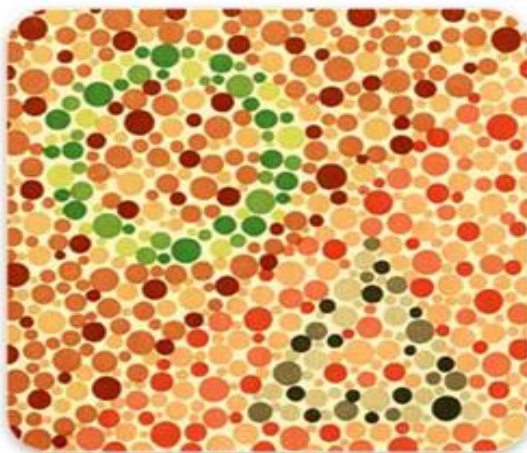
Тест 3. Нормальные трихроматы и протанопы различают в таблице две цифры – 9 и 6. Дейтеранопы различают только цифру 6.



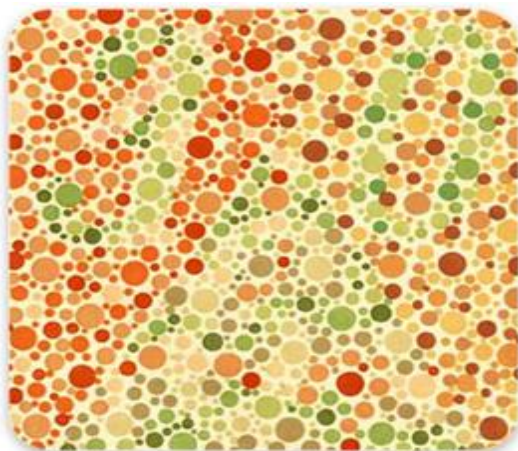
Тест 4. Нормальные трихроматы различают в таблице цифры 1, 3 и 6 (136). Протанопы и дейтеранопы читают вместо них две цифры 66, 68 или 69.



Тест 5. Нормальные трихроматы различают в таблице круг и треугольник. Протанопы различают в таблице треугольник, а дейтеранопы – круг или круг и треугольник.



Тест 6. Нормальные трихроматы читают в таблице круг и треугольник. Протанопы различают только круг, а дейтеранопы – треугольник.



Тест 7. Нормальные трихроматы различают в верхней части таблицы цифры 3 и 0 (30), а в нижней – ничего не различают. Протанопы читают в верхней части таблицы цифры 1 и 0 (10), а в нижней – скрытую цифру 6. Дейтеранопы различают в верхней части таблицы цифру 1, а в нижней – скрытую цифру 6.

В дальнейшем при продолжении исследования возможно определение степени выраженности аномальной трихромазии. Хотя точно дифференцировать формы и степень нарушения цветоощущения с помощью пигментных таблиц затруднительно. В данном случае более вероятно и надежно разделение людей с нарушением цветового зрения (по таблицам Рабкина) на «цветосильных» и «цветослабых».

Оценка результатов теста по таблицам Ишихара.

Псевдоизохроматические таблицы Ишихара ранее в основном использовались для скрининга врожденных дефектов восприятия красного и зеленого цветов. В настоящее время чаще применяются для диагностики нарушения цветового зрения при повреждении зрительного нерва. 13 правильных ответов свидетельствуют о нормальном цветовом зрении; 9 – о нарушенном цветовом зрении; при чтении только 12-й таблицы диагностируется полное отсутствие цветового зрения; неправильное чтение первых 7 таблиц (кроме 12-й) и неспособность читать остальные указывают на наличие дефицита в восприятии красно-зеленой части спектра; если пациент читает цифру «26» как «6» и «42» как «2», то говорят о протан-дефекте; при чтении «26» как «2» и «42» как «4» – о дейтан-дефекте.

Для более точного определения цветового зрения применяются спектральные приборы, из которых классическим является аномалоскоп Нагеля.

Аномалоскопы – приборы, действие которых основано на принципе достижения субъективно воспринимаемого равенства цветов путем дозированного составления цветовых смесей. В этих условиях пациент наблюдает излучение в виде световых потоков, а предметом измерения служат их физические характеристики при достижении визуального равенства. При этом заранее рассчитывают, какие цвета будут неразличимы для человека с тем или иным сочетанием типов колбочек. Определенное сочетание оттенка и яркости стимула при составлении равенства позволяет выявить тот или иной вариант нарушения цветоощущения. Пара сравниваемых цветов различается по уровню возбуждения одного из типов колбочек, например красного. При их отсутствии пациент (протаноп) не способен видеть подобные различия. Область колбочек, чувствительных к зеленому, лежит вне цветового треугольника, поскольку данный тип на всем протяжении спектра "перекрывается" либо длинноволновыми, либо коротковолновыми (синими) колбочками. По способности уравнивания полуполя монохроматического желтого цвета с полуполем, составленным из смеси чисто красного и зеленого в разных пропорциях, судят о наличии или отсутствии нормальной трихромазии. Последней свойственны строго определенные пропорции смесей (уравнение Релея).

Аномалоскоп предназначен для выявления аномальной трихромазии, исследования врожденных нарушений восприятия красно-зеленых цветов. Прибор позволяет диагностировать крайние степени дихромазии (протанопию и дейтеранопию), когда обследуемый приравняет к желтому чисто красный или чисто зеленый цвета, меняя лишь яркость желтого полуполя, а также умеренные нарушения, заключающиеся в необычно широкой зоне, в пределах которой смешения красного с зеленым дают желтый цвет (протаномалия и дейтераномалия). Также возможно измерение в условных единицах порогов цветоразличения как в норме, так и при патологии, когда пороги цветоразличения измеряются отдельно вдоль каждой из осей. Из зарубежных образцов наиболее совершенным считается аномалоскоп Гейдельберга фирмы «Oculus».

Панельные тесты ранжировки цветов. Наибольшее распространение в диагностике приобретенных нарушений цветового зрения получили 15-, 85- и 100-оттеночные тесты Фарнsworthа по стандартному «атласу цветов» Мюнселла. 100-оттеночные тесты, основанные на различении цветовых оттенков при последовательном их насыщении, состоят из 15 или 100 (84) цветных фишек (дисков) с поверхностью, на которой последовательно увеличивается уровень оттенка или длина волны цвета. Различие в оттенках между близко стоящими друг к другу смежными цветами составляет 1–4 нм. Пациент за 2 мин должен расставить фишки в порядке усиления оттенка и увеличения длины волны от розового через оранжевый к желтому, от желтого к зелено-голубому, от зелено-голубого к сине-

пурпурному, от синего через красно-пурпурный к розовому. При этом формируется замкнутый цветовой круг. В последние годы тест был значительно упрощен Дж. Д. Моллоном. В предложенном им наборе имеются красные, зеленые и синие фишки, различающиеся не только по цвету, но и по его насыщенности. Перемешанные в беспорядке фишки обследуемый должен разобрать по цветам и ранжировать по насыщенности. В качестве эталона ему предлагают установленный в требуемом порядке набор из серых фишек.

Панельные тесты ранжировки цветов точны и очень чувствительны.

100-оттеночный тест Фарнsworthа-Манселла получил наибольшее распространение в диагностике как для врожденных, так и приобретенных нарушений цветового зрения – для выявления начальных изменений, в том числе при патологии сетчатки и зрительного нерва. Тестирование занимает много времени, метод трудоемкий для врача и утомительный для пациента. Панель Д-15 пятнадцатиттеночного теста Фарнsworthа в уменьшенном варианте с менее насыщенными цветами применяется при профессиональном отборе.

15-панельный тест Фарнsworthа (качественный) состоит из 15 цветных паттернов, располагающихся в определенной последовательности. Он менее чувствительный по сравнению со 100-оттеночным, но более быстрый и удобный для скрининговых исследований. В 15-оттеночном тесте Фарнsworthа позиции перепутанных местами фишек быстро становятся заметными, так как соединяющие их прямые линии не очерчивают, а пересекают тестовый круг. При обработке результатов каждая фишка характеризуется суммой разностей ее номера с номерами двух соседних. Если последовательность установлена правильно, сумма разностей номеров составляет 2 (нулевая отметка). При ошибочной установке сумма всегда будет превышать 2; чем выше искомый показатель, тем тяжелее дефект цветоразличения в направлении соответствующих изохром (в зависимости от этого определяется тип нарушения). Суммарная разница с учетом всех меридианов свидетельствует о степени нарушения цветоразличения. Например, при выраженном дефекте восприятия синего цвета на схеме отчетливо видна полярность нарушений в двух диаметрально противоположных направлениях от центра.

Цветовая палитра поверхности фишек (паттернов) более насыщена, чем в 100-оттеночном тесте. Ошибки можно быстро наносить на простую круговую диаграмму, позволяющую выявлять характер нарушения цветового зрения. Данный метод широко используют в практике.

Прочие версии теста с менее насыщенными цветами используют для выявления труднораспознаваемых нарушений цветового зрения. Возможно различие врожденных и приобретенных дефектов: при первых происходит точный выбор протан- или дейтан-цветовых паттернов, при

последних расстановка нерегулярна либо ошибочна. При тритан-дефекте ошибки выявляют сразу.

Альтернативные методы исследования цветоощущения

Пороговые таблицы Юстовой и соавторов. В целях диагностики расстройств цветоощущения в клинической практике также используют пороговые таблицы, разработанные Е. Н. Юстовой и соавт. для определения порогов цветоразличения (цветосилы) зрительного анализатора. С помощью этих таблиц определяют способность уловить минимальные различия в тонах двух цветов, занимающих более или менее близкие позиции в цветовом треугольнике.

В их основу был положен тот же пороговый принцип оценки цвето-слабости и дихромазии, что и в аномалоскопе Раутиана. Разница заключается лишь в том, что пороговые различия между сравниваемыми цветами в аномалоскопе улавливаются плавно, а в таблицах – дискретно. Физиологическая система цветовых координат («красный–зеленый–синий») – основа методики априорного подбора цветов, не различаемых дихроматами. В набор включено 12 таблиц: по 4 для исследования функции красного и зеленого типов колбочек, 3 – для синего и 1 – контрольная для исключения симуляции. Таким образом, предусмотрена трехступенчатая оценка цветослабости каждого типа колбочек, а для красного и зеленого – тест на цветослепоту.

Хроматическая периметрия используется нейроофтальмологами для выявления нарушений цветового зрения в ранней диагностике заболеваний зрительного нерва и центральных зрительных путей. При патологическом процессе первые изменения наблюдают при использовании красных или зеленых объектов. Демонстрация синих стимулов на желтом фоне при проведении статической хроматической периметрии используется в ранней диагностике глаукоматозной оптической нейропатии (периметр Хамфри и др.).

Электроретинография (ЭРГ) отражает функциональное состояние палочковой системы на всех ее уровнях: от фоторецепторов до ганглиозных клеток. Методика основана на принципе выделения преобладающей функции красных, зеленых либо синих палочек, ЭРГ разделяют на общую (хроматическую) и локальную (макулярную). Паттерн-ЭРГ на красно-зеленый реверсивный шахматный паттерн характеризует функцию макулярной области и ганглиозных клеток.

Дополнительные сведения

Для оценки приобретенных нарушений цветового зрения в ранней диагностике заболеваний сетчатки и зрительного нерва используют топографическое картирование цветоощущения (цветовая статическая кампиметрия), основанное на методе многомерного шкалирования и оценке субъективных различий по времени сенсомоторной реакции при сравнении

уравненных по яркости цветов стимула и фона. При этом время сенсомоторной реакции обратно пропорционально степени субъективного цветового различения. Исследование функции контрастирования и цветоощущения в каждой исследуемой точке центрального поля зрения осуществляется при использовании ахроматических и цветных стимулов разного цвета, насыщенности и яркости, которые могут быть уравнены по яркости с фоном, а также светлее и темнее его (ахромахического или оппонентного к цвету стимула). Метод цветовой статической кампиметрии позволяет исследовать функциональное состояние on-off-каналов колбочковой системы сетчатки, топографию контрастной и цветовой чувствительности зрительной системы. В зависимости от задач исследования и сохранности зрительных функций используются разные схемы исследования цветоощущения, включающие использование различных по длине волны, насыщенности и яркости стимулов, предъявляемых на ахроматическом или оппонентном фоне.

Чувствительным, надежным и достоверным методом исследования и оценки цветового контрастного восприятия является применение компьютеризированных систем.

Факторы, влияющие на результат

На скорость выполнения теста и его результаты могут влиять состояние пациента, его внимание, тренированность, степень утомления, уровень грамотности, интеллекта, освещенность панельных тестов, таблиц и помещения, в котором проводится исследование, возраст больного, наличие помутнения оптических сред глаза, полиграфическое качество пигментных полихроматических таблиц. Так, например, при компьютерной диагностике цветоощущения необходимо учитывать цветопередачу дисплея монитора компьютера, излучающего ультрафиолетовый и синий свет, который усиливается при использовании освещения помещения люминесцентными лампами.

Создание новых медицинских технологий, оптической и компьютерной техники определяет прогресс офтальмологии.

Литература

1. Вит В. В. Строение зрительной системы человека / В. В. Вит. – Одесса, 2003. – 664 с.
2. Физиологические основы цветового зрения и его нарушения / В. В. Волков, А. М. Шамшинова, Ю. З. Розенблюм, А. А. Яковлев // Сб. науч. трудов МНИИ ГБ им. Гельмгольца «Клиническая физиология зрения». – М., 1993. – С. 224–260.
3. Григорьева Л. П. Электрофизиологические исследования цветового зрения человека / Л. П. Григорьева, А. Е. Фурсова // Сенсорные системы. Зрение. – Л. : Наука, 1982. – С. 156–169.
4. Диагностические возможности метода мультифокальной КЧСМ / М. В. Зуева, И. В. Цапенко, К. В. Голубцов и др. // Клиническая физиология зрения. Науч.-мед. фирма МБН. Сб. работ. – М., 2002. – С. 268–273.
5. Заболевания глазного дна / Джек Дж. Кански, А. Станислав Милевски, Бертил Э. Дамато, Воган Тэрнер ; пер. с англ. ; под общ. ред. чл.-кор. РАМН проф. С. Э. Аветисова. – М. : МЕДпресс-информ, 2008. – 424 с.
6. Зак П. П. Теоретические основы спектральной коррекции зрения. Клиническая физиология зрения / П. П. Зак. – М. : Изд. МБН, 2002. – 664 с.
7. Компьютерный метод исследования нарушений цветоощущения / А. М. Шамшинова, А. С. Петров, А. П. Дворянчикова и др. // Вестн. офтальмол. – 2000. – Т. 116, № 5. – С. 49–51.
8. Контрастная чувствительность в диагностике заболеваний зрительного анализатора : метод. пособие для врачей МЗ РФ / А. М. Шамшинова, В. М. Шапиро, А. Е. Белозеров и др. – М., 1996. – 18 с.
9. Критическая частота слияния мельканий в заболеваниях сетчатки и зрительного нерва у детей : пособие для врачей / Е. В. Рогатина, А. А. Яковлев и др. / МНИИ ГБ им. Гельмгольца. – М., 2001. – 20 с.
10. Морозов В. И. Заболевания зрительного пути. Клиника. Диагностика. Лечение / В. И. Морозов, А. А. Яковлев. – М. : Из-во "БИНОМ", 2010. – 680 с.
11. Новый метод оценки светорассеяния / А. М. Шамшинова, А. Е. Белозеров, Э. Н. Эскина // Тез. 8-th International Congress of the European Medical Laser Association и 1-го Российского конгресса медицинской лазерной ассоциации, 23–26 мая 2001 года. – М., 2001. – С. 26.
12. Хаппе Вильгельм. Офтальмология / Вильгельм Хаппе ; пер. с нем. ; под общ. ред. канд. мед. наук А. Н. Амирова. – 2-е изд. – М. : МЕДпресс-информ, 2005. – 352 с.
13. Офтальмология в вопросах и ответах : учеб. пособие / под ред. Х. П. Тахчиди. – М. : ГЭОТАР-Медиа, 2009. – 336 с.
14. Пат. на изобретение RU № 2192158 C2. Способ диагностики приобретенных нарушений цветоощущения / А. М. Шамшинова,

А. С. Петров, Э. Н. Эскина и др. – № 2000126135/14; заявл. 18.10.2000; опубл. 10.11.2002.

15. Рабкин Е. Б. Полихроматические таблицы для исследования цветоощущения / Е. Б. Рабкин. – 10-е изд., перераб. – Минск : Ю.М. Сапожков, 1998 – 144 с.

16. Вэндэр Джеймс Ф. Секреты офтальмологии / Джеймс Ф. Вэндэр, Дженис А. Голт. ; пер. с англ. ; под общ. ред. Ю. С. Астахова – М. : МЕДпресс-информ, 2005. – 464 с.

17. Цветовая кампиметрия в диагностике заболеваний сетчатки и зрительного нерва / А. М. Шамшинова, Л. И. Нестерюк, С. Н. Енриховский и др. // Вестн. офтальмол. – 1995. – Т. 111, № 2. – С. 24–28.

18. Шамшинова А. М. Функциональные методы исследования в офтальмологии / А. М. Шамшинова, В. В. Волков. – М. : Медицина, 1999. – 416 с.

19. Пороговые таблицы для исследования цветового зрения : метод. руководство / Е. Н. Юстова и др. – М. : Изд. "Вида", 1993. – С. 11–26.

20. Alder's Physiology of the Eye – Clinical Applications / ed. P. Kaufman, A. Alm. Mosby. – 10th ed. – 2002. – 321 с.

21. Distribution and morphology of human cone photoreceptors stained with anti-blue opsin / C. B. Curcio, K. B. Allen, K. R. Sloan et al. // J. Comp. Neurol. – Vol. 132, № 4. – P. 610–624.

22. Dacey D. M. Primate retina: cell types, circuits and color opponency / D. M. Dacey // Prog. Retin. Eye Res. – 1999. – Vol. 18, № 6. – P. 737–763.

23. Gerritsen F. Theory and Practice of Color / F. Gerritsen. – New York : Van Nostrand, 1974. – P. 79–88.

24. Gouras P. Precortical physiology of color vision and Visual Dysfunction / P. Gouras // Macmillian Press Ltd. – 1991. – Vol. 6. – P. 163–178.

25. Linksz A. Reflections, old and new concerning acquired defects of color vision / A. Linksz // Surv. Ophthalmol. – 1973. – Vol. 17. – P. 223–229.

26. Electrophysiologic Testing in Disorders of Retina, Optic Nerve, and Visual Pathway / G. A. Fishman, D. G. Birch, G. E. Holder, M. G. Brigell. – 2nd ed. – Ophthalmology Monograph 2. – San Francisco : American Academy of Ophthalmology, 2001. – P. 322–330.

27. Flicker fusion frequency in ophthalmic express-diagnosis / K. V. Golubtsov, O. Y. Orlov // Twentieth European Conference on Visual Perception, Helsinki. – Espoo, Finland, 1997. – P. 59.

28. Michaelides M. The cone dysfunction syndromes / M. Michaelides, D. M. Hunt, A. T. Moore // Br. J. Ophthalmol. – 2004. – Vol. 88. – P. 291–297.

29. Wald G. Blue – blindness in the normal eye / G. Wald // J. Opt. Soc. Am. – 1967. – Vol. 287. – P. 1289–1292.

Учебное издание

ФИЗИОЛОГИЯ И ПАТОЛОГИЯ ЦВЕТООЩУЩЕНИЯ

***Методические указания
для слушателей курсов
последипломного образования
и врачей-интернов***

Составители Бездетко Павел Андреевич
 Панченко Николай Владимирович
 Зубарев Станислав Федорович
 Тарануха Ольга Алексеевна

Ответственный за выпуск П. А. Бездетко



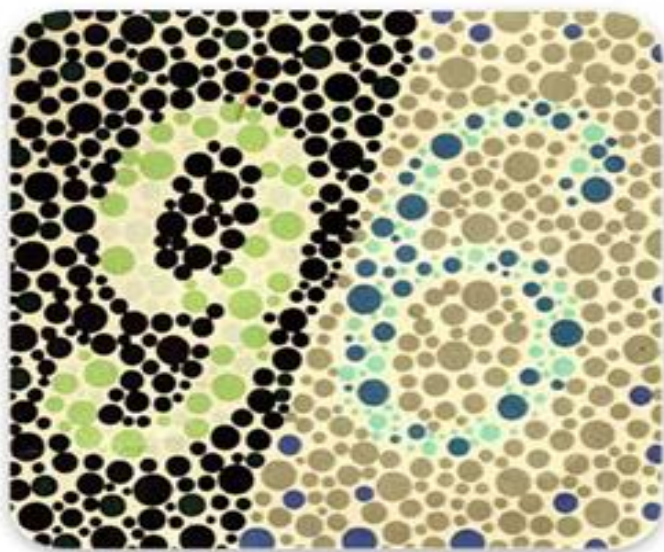
Редактор М. В. Тарасенко
Корректор Е. В. Рубцова
Компьютерная верстка Е. Ю. Лавриненко

План 2015, поз. 101.
Формат А5. Ризография. Усл. печ. л. 1,5. Зак. № 15-3308.

**Редакционно-издательский отдел
ХНМУ, пр. Ленина, 4, г. Харьков, 61022
izdatknmu@mail.ru, izdat@knmu.kharkov.ua**

Свидетельство о внесении субъекта издательского дела в Государственный реестр издателей, изготовителей и распространителей издательской продукции серии ДК № 3242 от 18.07.2008 г.

ФИЗИОЛОГИЯ И ПАТОЛОГИЯ ЦВЕТООЩУЩЕНИЯ



*Методические указания
для слушателей курсов
последипломного образования
и врачей-интернов*

