

## ВИЗУАЛЬНАЯ КОЛОРИМЕТРИЯ МЕТОДОМ ЗАМЕЩЕНИЯ

### (Новая система колориметра для исследования цветового зрения человека)

М. М. БОНГАРД, М. С. СМИРНОВ

*Институт биологической физики АН СССР, Москва*

1. Колориметрическое исследование цветового зрения позволяет изучить некоторые свойства первичных фоторецепторов, так сказать, «в чистом виде», не смешивая их со свойствами остальных отделов зрительного анализатора. Такая возможность открывается благодаря тому, что колориметрия является «нулевым методом». При установке двух полей на полную неразличимость состояние центров оказывает незначительное влияние на ход опыта, так как оно почти одинаково воздействует на оба поля.

При обычном методе колориметрии, когда сравниваются между собой два пространственно разделенных поля, для обеспечения одинаковых состояний разных частей сетчатки и соответствующих отделов центров приходится применять специальные меры предосторожности. Очевидно, например, что нельзя вести опыт, если разные половины сетчатки адаптированы к излучениям разного цвета. Поэтому приходится специально оговаривать условия, в которых можно проводить колориметрические опыты («колориметрические условия опыта») [1].

Необходимые требования выполняются, если любые физически тождественные излучения являются в условиях опыта визуально неразличимыми. Это условие непрерывно нарушается самим процессом опыта. Ведь наблюдатель почти все время (за исключением моментов полного совпадения по цвету половинок поля) смотрит на поля разного цвета.

Для восстановления «колориметрических условий» опыт приходится часто прерывать и адаптировать глаз к одинаковому цвету для всего поля зрения.

Однако существует такой способ ведения опыта, при котором «колориметрические условия» выполняются автоматически. Это — колориметрия с полями, разделенными не в пространстве, а во времени. При таком способе одно и то же место сетчатки попеременно освещается сравниваемыми излучениями. Если при обычной колориметрии излучения считаются равными по цвету, когда исчезает граница между полями, то при предлагаемом способе излучения считаются равными по цвету, если в моменты смены одного излучения другим наблюдатель не видит никаких изменений поля. Совершенно очевидно, что, если какое-либо излучение заменяется на физически тождественное ему (т. е. колориметрическое поле просто не изменяется), то глаз наблюдателя при любом состоянии адаптации ничего не заметит. Значит, действительно, при колориметрии методом замещения одного поля другим «колориметрические условия опыта» выполняются без всяких дополнительных предосторожностей. Это исключает одну из причин возможных при обычной колориметрии погрешностей.

Вторым обстоятельством, обратившим наше внимание на колориметрию методом замещения, было явление, отмеченное нами в опытах на лягушках и затем проверенное на человеке: контрастная чувствительность глаза к изменениям цвета оказалась наибольшей при адаптации

именно к измеряемому излучению<sup>1</sup>. Напротив, видимое различие двух пространственно разделенных полей уменьшается при адаптации к этим полям (это явление хорошо известно всем колориметристам). Таким образом, если при обычной колориметрии сам процесс измерения понижает контрастную чувствительность глаза, то при «колориметрии замещением»

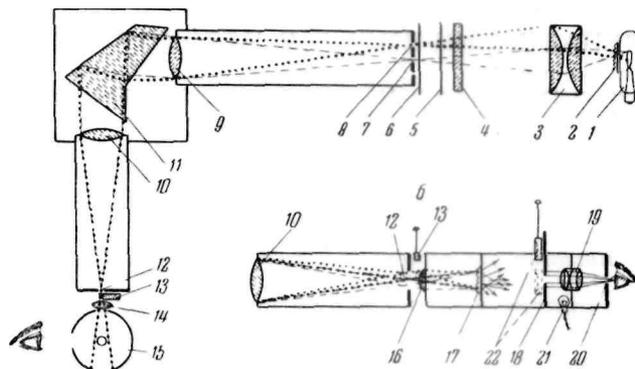


Рис. 1. Общая схема колориметра с выходной частью для получения больших равномерных полей.

*а* — план.

1 — кинопроекционная лампа 30 в, 400 вт.; 2 — матовое стекло; 3 — конденсор; 4 — фильтр, поглощающий инфракрасные лучи (теплопоглотитель); 5 — подвижный поляризатор; 6 — рамка с неподвижными поляризаторами; 7 — щель, пропускающая измеряемый цвет; 8 — одна из основных щелей; 9 — входной объектив; 10 — выходной объектив; 11 — призма; 12 — выходная щель; 13 — спускающаяся призма для измерения длины волны; 14 — линза; 15 — рассеивающий шар

*б* — вид сбоку.

16 — линза; 17 — матовое стекло; 18 — диафрагма; 19 — объектив; 20 — выходная диафрагма; 21 — лампочка для освещения диафрагмы; 22 — фотоэлемент

в процессе опыта контрастная чувствительность повышается. Поэтому есть основания предполагать, что наиболее точные результаты удастся получить с помощью метода замещения.

Наконец, третьим преимуществом метода замещения является возможность исследовать цветовое зрение периферии сетчатки.

При сравнении соседних полей в обычном колориметре для четкого видения линии раздела необходимо фиксировать взглядом именно эту линию. При колориметрировании методом замещения фиксироваться может любая точка, отстоящая от экспериментального поля на любое расстояние.

Все это побудило нас сконструировать и изготовить для изучения цветового зрения человека колориметр с полями, разделенными не в пространстве, а во времени («колориметр замещения»).

Мы, разумеется, не собираемся отвергать обычную колориметрическую методику. Работа по методу замещения имеет своей целью опробовать этот несколько новый принцип колориметрирования с тем, чтобы иметь возможность использовать его положительные стороны для расширения наших знаний о цветовом зрении человека.

2. Принципиальная оптическая схема прибора приведена на рис. 1. Конденсор 3 создает изображение нитей лампы 1 на системе входных щелей 7 и 8. Матовое стекло 2 делает освещенность входных щелей равномерной. Благодаря подвижному поляризатору 5 на входные щели падает поляризованный свет. Входные щели в свою очередь прикрыты полярироидными пленками, ориентированными в двух взаимно перпендикулярных

<sup>1</sup> Нам кажется, что этот факт хорошо согласуется с результатами, полученными Раутианом и Соловьевой [2] при исследовании влияния окружения на остроту цветоразличения.

направлениях (рис. 2). При повороте поляроида 5 (рис. 1) на  $90^\circ$  свет перестает проходить через одну группу входных щелей и начинает проходить через вторую группу (покрытую поляроидами, расположенными перпендикулярно к поляроидам первой группы). Спектральный состав света, выходящего через щель 12, зависит от положения «открытых» в данный момент входных щелей.

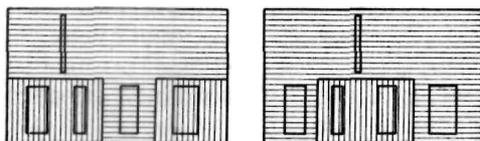


Рис. 2. Примеры расположения поляроидов на входных щелях

Например, при перемещении щели И (рис. 3,а) вправо длина волны света, выходящего из прибора, уменьшается. При увеличении ширины щели увеличивается ширина спектра выходящего излучения. Таким образом, сменяя пластину с прорезанными в ней основными щелями (рис. 3,а), можно в широких пределах выбирать основные цвета для каждого опыта, в соответствии с поставленной задачей<sup>2</sup>. Изменение длины волны измеряемого света достигается с помощью перемещения щели И в горизонтальном направлении. Ширина щели И регулируется винтом 3. Количество света, проходящего через основные щели, регулируется заслонками 4 (рис. 3,а). Заслонки 4 поднимаются и опускаются при вращении винтов 5, соединенных гибкими передачами с

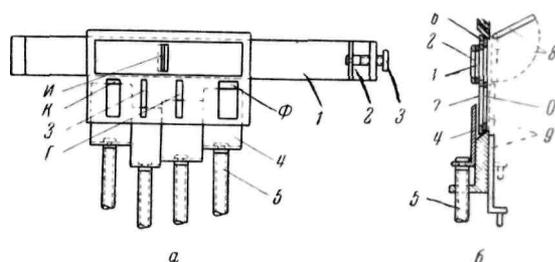


Рис. 3. Система входных щелей колориметра, а — вид со стороны конденсора, б — вид сбоку:

И — щель, пропускающая измеряемый свет; К, З, Г, Ф — щели, пропускающие красное, зеленое, голубое и фиолетовое основные излучения; О — основная щель (на профиле); 1, 2 — пластины с прорезями, образующими щель И; 3 — винт, перемещающий пластину 1 относительно 2 и меняющий ширину щели И; 4 — заслонка, плавно меняющая высоту основной щели; 5 — винт, поднимающий и опускающий заслонку 4; 6 — рамка, на которой наклеены неподвижные поляроиды; 7 — поляроидная пленка; 8 — заслонка, закрывающая щель И во время измерения света; 9 — заслонка, закрывающая основную щель во время измерения света

ручками, находящимися под рукой наблюдателя. Свет, выходящий из щели 12 (рис. 1,а), попадает на линзу 14, которая создает на задней стенке шара 15 изображение объектива 10. Призма 13 служит только для измерения длины волны света, проходящего через щель И. Во время работы наблюдателя она поднимается и находится вне светового пучка. Шар 15 имеет три отверстия, центры которых расположены на взаимно перпендикулярных радиусах. Через одно из них в шар попадает свет. Через

другое — рассеянный в шаре свет попадает в глаз наблюдателя, через третье — на фотоэлемент с известной кривой спектральной чувствительности.

Применение рассеивающего шара 15 позволяет получать в высшей степени однородное видимое поле даже при больших угловых размерах его. Однако яркость поля достигает всего лишь нескольких апостильбов. В некоторых опытах желательнее иметь более яркие поля. С этой целью прибор снабжен вторым вариантом выходной части, что дает возможность работать с яркими полями малого углового размера (рис. 1,б). Линза 16 создает изображение объектива 10 на матовом стекле 17. Объектив 19 проектирует изображение матового стекла 17 на зрачок глаза наблюдателя. Диафрагма 18 ограничивает колориметрическое поле. Заменой диафрагмы 18 достигается изменение углового диаметра поля. Для

<sup>2</sup> Поскольку ранее была выявлена четырехмерность цветового пространства периферии сетчатки [3], в приборе предусмотрена возможность работы одновременно с четырьмя основными цветами.

опытов со светлым окружением тестового поля используется лампочка 21, освещающая побеленную поверхность диафрагмы 18. Для измерения длины волны в световой пучок вводится призма 13, отводящая свет в отдельный спектроскоп со шкалой (на схеме не показан). Для измерения мощности света в пучок света вводится фотоэлемент 22.

3. Собственно опыт заключается в подборе такого раскрытия основных щелей, при котором замена смеси измеряемого света с некоторыми основными излучениями смесью остальных основных излучений не заметна для наблюдателя. Замена одной смеси другой производится поворотом поляроида 5 (рис. 1,а).

После того как необходимое раскрытие щелей найдено, производится измерение мощностей как измеряемого, так и основных излучений. Для этого с помощью заслонок 9 и 10 (рис. 2,б) закрывают все щели, кроме одной. Фотоэлементом измеряется мощность света, проходящего через эту незакрытую щель. То же самое продельвается с остальными щелями.

Зависимость коэффициента пропускания объектива 19 (рис. 1,б) от длины волны проверяется экспериментально. Поправка на него вводится при расчете мощности светового потока.

Мы применили серно-серебряные фотоэлементы с запирающим слоем ФЭСС-У2. Выбор пал на них за плавный ход их спектральной чувствительности и равномерное распределение чувствительности по поверхности фотоэлемента. Ток от фотоэлемента через механический прерыватель (быстродействующее реле, питаемое от специального звукового генератора) подается на вход измерительного усилителя низкой частоты 28-ИМ.

Случайная ошибка при измерении относительных энергий в области спектра  $\lambda > 470$  м $\mu$  оценена нами для нашего прибора в 3%; при измерениях в области  $\lambda < 470$  м $\mu$  ошибка достигает 5%. При оценке возможных ошибок мы учитывали влияние высоты основных щелей на распределение света по поверхности фотоэлемента, нестабильность и нелинейность характеристик фотоэлемента и усилителя, нестабильность работы механического прерывателя, отклонение параметров делителя напряжения усилителя 28-ИМ от номинала.

Помимо случайной ошибки, возможна еще систематическая ошибка, вызванная неточностью определения кривой спектральной чувствительности фотоэлемента. Эту погрешность мы оцениваем в 5% при сравнении излучений, принадлежащих к двум противоположным концам видимого спектра. При сравнении мощностей близких длин волн возможная ошибка будет соответственно меньше. Заметим, что погрешность градуировки фотоэлемента может сказаться только при абсолютном определении кривых сложения. При сравнении кривых сложения нескольких наблюдателей, при проверке аддитивности цвета для приемников глаза и т. п. эта погрешность значения не имеет.

Погрешность измерения длины волны в нашем приборе может составить 1 м $\mu$  при  $\lambda < 575$  м $\mu$  и 2 м $\mu$  при  $\lambda > 575$  м $\mu$ .

## Выводы

Изготовленный четырехцветный «колориметр замещения» позволяет изучать цветовое зрение как *fovea*, так и периферии сетчатки.

Опыты можно производить: а) в широком диапазоне яркостей (до 200 апостильбов); б) при разных длинах волн основных излучений; в) при разных угловых размерах поля; г) как при темном, так и при светлом окружении колориметрического поля.

В колориметре предусмотрена возможность измерения мощностей всех участвующих в опыте световых потоков.

Свет, проходящий через любую основную щель, может быть непосредственно прибавлен к измеряемому излучению. Это принципиально устраняет необходимость работы «с разбавлением цвета». Соответствен-

но устраняется возможность дополнительной ошибки из-за разбавления.

Применение метода замещения автоматически обеспечивает соблюдение «колориметрических условий опыта» и устраняет возможность ошибки из-за различий в состоянии адаптации разных мест сетчатки.

Авторы приносят благодарность сотрудникам Лаборатории биофизики зрения В. И. Чернышеву и В. И. Дроздову, принимавшим участие в изготовлении колориметра, и Д. А. Шкловеру, любезно предоставившему в их распоряжение эталонный фотоэлемент для градуировки фотоэлементов, входящих в установку.

Поступила в редакцию  
18. V. 1956

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Н ю б е р г Н. Д., Биофизика, **2**, 2. 1956.
2. Раутиан Г. Н. и Соловьева В. П., ДАН СССР, **95**, 3. 1954.
3. Бонгард М. М., Смирнов М. С., ДАН СССР, **108**, 3. 1956.

-----

#### THE REPLACEMENT METHOD IN VISUAL COLORIMETRY

M. M. BONGARD, M. S. SMIRNOV

The four-colour «replacement colorimeter» enables one to study colour vision both of the fovea and the periphery of the retina.

The experiments may be conducted:

- a) in a broad brightness range (up to 200 *asb*),
- b) at various wave lengths of the basic radiations,
- c) at various angular dimensions of the field,
- d) both in the case of dark and light surrounding of the colorimetric field.

The colorimeter may be used to measure the energy of all luminous fluxes that are met with in the experiment.

The light passing through any basic slit may be added directly to the radiation being measured. This eliminates in principle the necessity of working «with dilution of light». It correspondingly eliminates the possibility of an additional error due to dilution.

The replacement method automatically guarantees observance of the «colorimetric conditions of the experiment» and eliminates the possibility of an error due to differences in the state of the adaptation of different parts of the retina.

Received: 18.V.1956