

М. М. БОНГАРД и М. С. СМЕРНОВ

ЧЕТЫРЕХМЕРНОСТЬ ЦВЕТОВОГО ПРОСТРАНСТВА ЧЕЛОВЕКА

(Представлено академиком Г. С. Ландсбергом 13 XII 1955)

1. Сумеречный приемник лягушек работает не только вблизи порога, но и при больших яркостях поля зрения (более 100 апостильбов)⁽¹⁾. Сумеречное зрение у лягушки и у человека осуществляется благодаря одному и тому же зрительному пигменту (родопсину), поэтому мы попытались выяснить, работает ли сумеречный приемник человека при больших яркостях. При этом было необходимо изучить работу одного приемника (сумеречного) при наличии еще трех функционирующих приемников (дневных). Единственный надежный способ для таких исследований — это колориметрия. Результаты колориметрических опытов на периферии поля зрения (далее 5° от центра) до сих пор, насколько нам известно, никем не опубликованы. Нас же интересовали именно эти части сетчатки, так как обнаружить работу сумеречного приемника легче там, где имеется большой процент палочек. Колориметрические исследования обычным методом на периферии сильно затрудняются малой остротой зрения. Наблюдатель плохо видит линию раздела полей и не может определить, одинаковы ли эти поля или различны. Поэтому мы пошли по пути разделения сравниваемых полей не в пространстве, а во времени. Сравнимые поля предъявлялись наблюдателю последовательно. Поля считались равными по цвету, когда наблюдатель не мог заметить момента смены одного поля другим. Оказалось, что различительная чувствительность периферии при такой методике значительно выше, чем при обычной колориметрии. Для этих опытов применялся тот же прибор, что и при исследовании цветового зрения животных⁽¹⁾.

2. Сначала было проверено, принимает ли наблюдатель периферией равенства, установленные им для фовеа. Наблюдатель подбирал смесь красного (640 мμ) и зеленого (550 мμ) излучений, не отличимую для фовеа от желтого монохроматического (590 мμ) света. Затем наблюдатель фиксировал взгляд на расстоянии 10—20° от поля колориметра. Сравнимые поля становились резко неравными. Желтый монохроматический казался темно-красным, а смесь красного и зеленого — светлозеленой. Яркости полей доходили в этих опытах до 1000 апостильбов.

Можно сделать два предположения о причине нарушения равенства:

а) На периферии работают в этой области спектра, так же как и в фовеа, только два приемника, но кривые их спектральной чувствительности несколько отличаются от кривых для фовеа. Причиной этого различия может быть, например, пигментация желтого пятна.

б) На периферии, кроме двух приемников, функционирующих в фовеа, работает еще какой-то приемник.

Если верно первое предположение, то равенства на периферии можно достигнуть, подобрав несколько другую смесь тех же основных (красного и зеленого) цветов. Если же на периферии работает еще один приемник, то для получения колориметрического равенства необходимо использовать не два, а три основных цвета.

Опыт показал, что для периферии нельзя достигнуть равенства ни при каком подборе мощностей красного и зеленого излучений. Введение же третьего основного излучения позволило получить очень хорошее равенство. Центральная часть сетчатки полностью принимала равенства, уставновленные для периферии. Это означает, что на периферии работает третий приемник. Два же приемника, функционирующих в fovea в этой части спектра ($\lambda \geq 550$ мμ), по своим спектральным характеристикам не отличаются от соответствующих приемников на периферии.

3. Вопрос о природе дополнительного приемника был решен при помощи снятия колориметрических кривых сложения для периферии. Для упрощения опыт проведен только в области спектра $\lambda > 535$ мμ, т. е. там, где

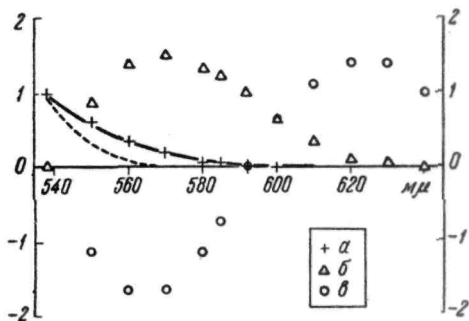


Рис. 1

«синий» приемник человека имеет настолько малую чувствительность, что практически не работает. Благодаря этому можно было применить трех-, а не четырехмерную колориметрию.

Основные излучения имели длины волн: 538; 592 и 640 мμ. Полученные кривые сложения приведены на рис. 1: *a* — кривая сложения, соответствующая основному излучению 538 мμ, *b* — 592 мμ и *c* — 640 мμ. Сплошная линия — теоретическая кривая,

соответствующая основному излучению 538 мμ в случае, если третий приемник на периферии — сумеречный. Пунктирная линия — теоретическая кривая для случая, если это «синий» приемник. Сопоставление кривых показывает, что работает сумеречный приемник.

Описанные опыты доказывают, что сумеречный приемник человека не перестает работать при больших яркостях, а продолжает функционировать одновременно с дневными приемниками.

4. Дополнительной проверкой того, что описанные выше явления вызываются работой не «синего», а сумеречного приемника, послужили колориметрические опыты в области спектра, где цветовое пространство fovea трехмерно.

Внутренность усредняющего шара поочередно освещалась то смесью красного (*K*) и голубого (*Г*), то смесью желтого (*Ж*) и синего (*С*) излучений*. Подбиралось наилучшее равенство для fovea при видимом диаметре отверстия в шаре $0,5-2^\circ$. Затем точка фиксации переносилась в сторону. При этом равенство резко нарушалось. Все наблюдатели оценивали смесь *K + Г* как яркозеленую, а *Ж + С* как розовато-пурпурную, гораздо более темную. Явное неравенство отмечалось уже при отклонении взгляда от центра поля на $1-2^\circ$.

Для периферического зрения никаким изменением пропорции *K*, *Ж*, *Г* и *С* не удалось добиться хотя бы приблизительного равенства. Из этого прямо следует, что цветовое пространство периферии сетчатки более чем трехмерно. Поэтому были проведены опыты с пятерками излучений. При любом выборе длин волн этих излучений удается подобрать их мощности так, что смесь двух из них не отличима от смеси трех остальных. Такие четырехмерные равенства, подобранные для периферии, хорошо удовлетворяли и центр сетчатки. Эти опыты еще раз показывают, что на периферии одновременно работают четыре приемника.

Четырехмерные равенства оказались устойчивыми по отношению к изменениям состояния адаптации. После световой или продолжительной тем-

* $\lambda_K > 630$ мμ; $\lambda_{Ж} = 592 \pm 2$ мμ; $\lambda_{Г} = 490 \pm 10$ мμ; $\lambda_{С} = 435 \pm 15$ мμ.

новой адаптации, а также после адаптации к яркому красному, зеленому или синему свету установленные заранее равенства полностью принимались.

5. Наличие на периферии четвертого приемника, работающего при больших яркостях*, хорошо объясняет многие явления, считавшиеся необъяснимыми с точки зрения трехкомпонентной теории. К таким явлениям относятся, например, различные периметрические границы для желтого, смешанного из красного и зеленого, и желтого монохроматического; нарушения правильности подбора смеси красного и зеленого к монохроматическому желтому при увеличении угла зрения и при изменении состояния адаптации и т. п. (2).

6. Сумеречный приемник как у человека, так и у лягушки работает не только при малых, но и при больших яркостях. Равенство двух полей по цвету не может быть достигнуто, если по-разному возбужден сумеречный приемник. Это значит, что он и у лягушки и у человека принимает участие в цветовом зрении. У человека, благодаря наличию нескольких дневных приемников, роль сумеречного приемника в цветовом зрении сравнительно мала. Уменьшению роли сумеречного приемника в цветовом зрении человека безусловно способствует также резкое уменьшение процента палочек в центральной части сетчатки. Однако в точных колориметрических опытах на периферии, а может быть и в fovea, необходимо учитывать работу четвертого приемника. В наших опытах было замечено, что четырехмерные равенства для fovea являются более «высококачественными», чем трехмерные (трехмерные равенства кажутся менее точными). Это может объясняться как тем, что часть рассеянного в глазе света попадает на периферию, так и наличием в fovea небольшого количества палочек. В пользу наличия в fovea функционирующих палочек говорит, например, работа В. Г. Самсоновой (3).

Институт биологической физики
Академии наук СССР

Поступило
7 XII 1955

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ М. М. Бонгард, ДАН, **103**, № 2 (1955). ² Г. Хартридж, Современные успехи физиологии зрения, 1952. ³ В. Г. Самсонова, Пробл. физиол. опт., **8**, 26 (1953).

* Нарушения двумерных равенств в области $\lambda > 550$ м μ для периферии обнаруживаются вплоть до самых больших из применявшихся яркостей поля — 100 000 апостильбов. Однако мы подробно не исследовали, объясняются ли эти нарушения и при таких больших яркостях только работой сумеречного приемника.