

*Н.Д. НЮБЕРГ и Е.Н. ЮСТОВА*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЦВЕТНОГО ЗРЕНИЯ ДИХРОМАТОВ

### ЗНАЧЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗРЕНИЯ ДИХРОМАТОВ И СПОСОБЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Исследования цветного зрения дихроматов, помимо чисто практического интереса, связанного с испытанием зрения, необходимым в ряде профессий (железнодорожники, колористы и т. п.), привлекают давно внимание исследователей еще и по той причине, что зрение дихроматов широко используется как средство выяснения физиологического механизма нормального цветного зрения.

Особенности зрения дихроматов всегда служили и продолжают служить одним из важнейших критериев оценки различных теорий цветного зрения. Поэтому часто в работах по дихромазии те или иные экспериментальные факты излагаются с точки зрения определенной физиологической теории. Это приводит иногда к смешению результатов, непосредственно полученных из опыта, с заключениями, опирающимися на определенные гипотетические предпосылки. Во избежание этого мы сначала изложим экспериментальные данные, как полученные нами, так и данные других исследователей вне зависимости от возможного их физиологического истолкования, а затем отдельно рассмотрим, как могут быть истолкованы эти факты с точки зрения той или иной теории.

2. В основе нашего экспериментального исследования был положен ряд фактов, достаточно твердо установленных другими исследователями, которые, по-видимому, ни с чьей стороны не вызывают возражений. Эти факты следующие:

- 1) аддитивность цветов как для нормальных трихроматов, так и для дихроматов;
- 2) трехмерность цветного многообразия трихроматов и двухмерность для дихроматов;
- 3) принятие дихроматами нормальных цветовых равенств.

Эти положения, хотя и не всегда формулируются в явном виде, используются (а, следовательно, признаются справедливыми) всеми исследователями дихромазии.

**З а к о н а д д и т и в н о с т и** (1-й закон Грассмана) мы сформулируем так:

Если к двум излучениям, тождественным по цвету с точки зрения какого-либо наблюдателя, прибавить к каждому одинаковые излучения, то цвет суммарного излучения в обоих случаях будет для того же наблюдателя одинаковым. Если же к двум излучениям, различным по цвету, прибавить одинаковые излучения, то суммарные цвета будут различны<sup>1</sup>.

*Примечание.* Под “равенством по цвету” здесь, как и всюду в дальнейшем, понимается полная неотличимость (слияние полей), т. е. в это понятие включается яркостная характеристика, а не равенство только по “цветности”. В противном случае закон был бы не верен.

В справедливости закона аддитивности не может быть никаких сомнений, поскольку никем ни разу не наблюдалось никаких отклонений от него ни для каких наблюдателей, несмотря на то, что он постоянно используется в самых различных экспериментах. В частности, для тех дихроматов, с которыми мы проводили исследования, попутно имела место косвенная проверка соблюдения для них аддитивности.

Трехмерность цветового многообразия трихроматов и двухмерность его для дихроматов также не вызывает сомнения. Остановимся только на третьем положении, когда цветовые равенства, справедливые для нормальных трихроматов, остаются справедливыми и для дихроматов. Это положение, очевидно, не может соблюдаться вполне точно хотя бы потому, что у различных трихроматов, считаемых нормальными, цветовые равенства не

---

<sup>1</sup> Вторая половина этого утверждения требует той оговорки, что различие должно быть достаточно большим, чтобы после суммирования оно превышало порог различения.

совсем одинаковы. Поэтому это положение надо понимать так, что оно соблюдается в пределах индивидуальных колебаний нормальных трихроматов. Однако в нашей работе мы независимо от этого производили сравнение установок на равенство испытуемых дихроматов и нормального трихромата, проводившего испытания. Согласие получилось достаточно хорошее, так что положение 3, во всяком случае, в наших экспериментах, было соблюдено.

Из справедливости этих положений следуют выводы, использованные в нашей работе. Важнейший из них тот, что если нам известна всего только *одна пара* цветов, различных для трихромата, но неразличимых дихроматом, то, пользуясь принципом аддитивности, можно указать *все* цвета, неразличимые дихроматом.

Докажем это. Пусть какие-то два цвета  $A$  и  $B$ , различные для трихромата, неразличимы дихроматом. Тогда, складывая каждый из них с самим собой любое число раз, легко вывести на основании принципа аддитивности, что цвета, получаемые изменением яркости цветов  $A$  и  $B$  в *любое одинаковое* число раз, также будут различны для трихромата, но неразличимы дихроматом:

$$\begin{aligned} kA &= kB \text{ — для дихромата;} \\ kA &\neq kB \text{ — для трихромата,} \end{aligned}$$

где  $k$  — произвольное число.

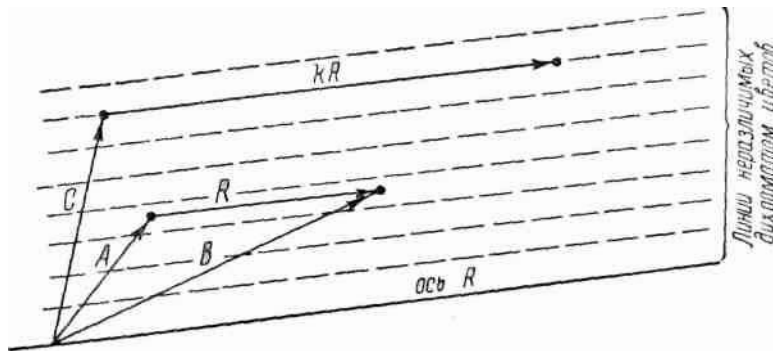
Далее, если мы к этим цветам прибавим один и тот же произвольно выбранный цвет  $C$ , то опять-таки получим:

$$C+kA = C+kB \text{ для дихромата;} \tag{1}$$

$$C+kA \neq C+kB \text{ для трихромата.}$$

Если воспользоваться представлением цветов в виде векторов трех измерений (фиг. 1), то формулу (1) удобнее переписать в виде:

$$C=C+k(B-A)=C+kR \text{ для дихромата.} \tag{1'}$$



Фиг. 1.

Это равенство показывает, что если дихромат не различает какие-либо два цвета, то вектор  $R$ , являющийся разностью соответствующих цветовых векторов  $B$  и  $A$ , обладает тем свойством, что прибавление к любому цветовому вектору  $C$  векторов любой длины, параллельных вектору  $R$ , будет всегда давать цвета, неотличимые для дихромата от цвета  $C$ . Следовательно, *все цвета, лежащие в цветовом пространстве на прямых некоторого определенного направления, будут неразличимы для соответствующего дихромата*. Для различных дихроматов эти направления могут быть и различны.

Не трудно доказать, что приведенные формулы исчерпывают *все* цвета, которые неразличимы одним и тем же дихроматом. Если бы имелись какие-то еще неразличимые цвета, то, применяя рассуждения, подобные вышеизложенным, мы пришли бы к заключению, что испытуемое лицо не дихромат, а монохромат с одномерным цветовым многообразием.

3. Вывод, который мы только что сделали, *не связан ни с какой физиологической гипотезой*, а является следствием экспериментальных наблюдений, указанных выше. По-

сколькx соблюдение аддитивности установлено весьма надежно, постольку для характеристики зрения любого дихромата, теоретически говоря, достаточно знать только какую-либо одну пару неразличимых для него цветов, чтобы по ним определить направление вектора  $R$ . Кроме того, необходимо, конечно, удостовериться, что испытуемый является действительно дихроматом (многообразие цветов двухмерно) и что он принимает нормальные цветовые равенства.

Из сказанного вытекает простейший и наиболее естественный способ исследования дихромазии. Надо найти два каких-либо цвета, неразличимые дихроматом, и выразить их в какой-либо трехцветной системе, например, взять для каждого из них три отсчета при измерении этих цветов на трехцветном колориметре нормальным наблюдателем.

Пусть координаты этих цветов (отсчеты на колориметре) равны  $a_1, a_2, a_3$  для первого цвета и  $b_1, b_2, b_3$  – для второго, тогда компоненты искомого вектора разности  $R$  будут:

$$\bar{r}_1 = \bar{b}_1 - \bar{a}_1; \quad \bar{r}_2 = \bar{b}_2 - \bar{a}_2; \quad \bar{r}_3 = \bar{b}_3 - \bar{a}_3. \quad (2)$$

Компоненты вектора  $R$  выражаются в той же трехцветной системе (например, в системе прибора), что и исходные цвета. Их можно перевести в любую другую систему обычным пересчетом. Положение точки  $R$  в треугольнике также вычисляется обычным путем, например:

$$r_1 = \frac{\bar{r}_1}{\bar{r}_1 + \bar{r}_2 + \bar{r}_3}; \quad r_2 = \frac{\bar{r}_2}{\bar{r}_1 + \bar{r}_2 + \bar{r}_3}. \quad (3)$$

Описанный метод решения задачи в настоящее время воспринимается как нечто новое, между тем он в точности соответствует методике, использованной еще Максвеллом (хотя под его именем в настоящее время фигурирует совсем другой и менее целесообразный способ). Так, Максвелл [1] пишет:

“М-р Джемс Симпсон, в прошлом студент натуральной философии моего класса, сделал для меня тридцать три наблюдения на хорошем солнечном свете. Десять из них были сделаны с двумя стандартными цветами и дали следующие результаты:

$$33,7 (88) + 33,1 (68) = W...”$$

“...Из шести моих наблюдений, сделанных в то же самое время, я вывел трехцветное уравнение:

$$22,6 (104) + 26 (88) + 37,4 (68) = W.$$

Если мы предположим, что свет, достигающий органа зрения, был в обоих случаях тот же самый, можно скомбинировать оба уравнения путем вычитания, и тогда найдем:

$$22,6 (104) - 7,7 (88) + 4,3 (68) = D,$$

где  $D$  — есть тот цвет, отсутствие ощущения которого образует дефект дихроматического глаза...” (Цифрами в скобках Максвелл обозначает цвета примененных им эталонов.) Этим путем Максвелл совершенно правильно определил “основную ось” протанопа, с которым он экспериментировал.

4. Метод исследования зрения дихроматов, точнее метод использования данных эксперимента, примененный нами и в принципе совпадающий с тем, каким пользовался Максвелл, существенно отличается от того, чем пользовались позднейшие исследователи. Это различие тесно связано с тем, что мы, как и Максвелл, пользовались векторным представлением о цвете, тогда как исследователи последнего времени пользовались цветовым треугольником, как графиком цветностей, *без учета яркостной характеристики цвета*.

Цветовой треугольник, как известно, представляет собой центральную (перспективную) проекцию цветового пространства на плоскость с центром проекции в черной точке. Так как цвета требуют для своей характеристики трех величин, то положение точки в треугольнике не дает полной характеристики цвета, а характеризует только цветность. Поэтому при правильном использовании цветового треугольника цвет в нем должен изображаться не просто положением точки, а точкой с приложенным в ней “грузом”. Этот “груз” является третьей координатой цвета в треугольнике, и без нее никакие законченные цветовые расчеты невозможны. В соответствии с этим и Максвелл, и Гельмгольц,

введшие в употребление цветовой треугольник, никогда не забывали указывать и третью координату, которую Гельмгольц называл “количеством цвета”. Связь этих *трех* координат с трехцветными компонентами цветового вектора выражается формулами:

$$x = \frac{\bar{x}}{\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}}; y = \frac{\bar{y}}{\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}}; q = \bar{x} + \bar{y} + \bar{z} \quad (4)$$

где  $x$  и  $y$  — координаты точки в треугольнике, а  $q$  — третья координата, знание которой совершенно необходимо для расчетов в треугольнике, например, для определения суммы цветов по принципу центра тяжести.

К сожалению, впоследствии работники, недостаточно квалифицированные в математике, не поняли значения третьей координаты и вообще отбросили ее, чего вводившие этот график *никогда не* делали. Эта печальная практика настолько укоренилась, что когда Лютер в своей работе по цветовому телу вновь ввел эту же третью координату под названием “цветового момента”, то и им самим, и другими это было воспринято, как что-то совсем новое.

Порочная практика характеризовать цвет двумя координатами служит постоянным источником всяческих недоразумений и прямых ошибок, так как основные законы сложения цветов (законы Грассмана), лежащие в основе цветовых измерений, формулируются для цветов, понимаемых как величины трех измерений. В частности, как уже указывалось, для цветностей закон аддитивности несправедлив (при сложении цветов, тех же самых по цветности, можно получать цвета различных цветностей). Введение в качестве третьей координаты гетерохромной яркости, рассчитываемой по кривой видности, не спасает положения, так как эта величина не обладает свойствами “груза” при расчете по принципу центра тяжести в обычном треугольнике.

Одним из печальных последствий забвения третьей цветовой координаты в цветовом треугольнике является то, что получилось при исследовании зрения дихроматов. Параллельные прямые неразличимых дихроматом цветов цветового пространства изобразятся в цветовом треугольнике, вообще говоря, в виде прямых, сходящихся к одной точке (в частности, в виде параллельных прямых), как это и должно быть в перспективной проекции. Прямые останутся параллельными и в треугольнике в том частном случае, если произвольно выбранная плоскость проекции случайно окажется сама параллельной пучку проецируемых параллельных прямых пространства. Поэтому параллельность и сходимость прямых в треугольнике — *совершенно эквивалентные понятия*.

Будут ли эти прямые в треугольнике параллельными или сходящимися, не зависит от выбора «основных цветов» в треугольнике, как думают Джедд и Рант [2, 3], так как в пределах того же графика можно поместить вершины треугольника в любые, точки. Грубой ошибкой является, конечно, когда этой случайной особенности применяемого чертежа приписывают какой-то физиологический смысл.

Таким образом, если мы нанесем в треугольнике две точки, соответствующие двум неразличимым для дихромата цветам, то они должны лежать на прямой, проходящей через искомую точку схода таких прямых (в случае параллельности это будет так называемая «бесконечно удаленная точка» проективной плоскости). Однако этим еще самая точка не определяется. Поэтому при использовании треугольника обычно находят еще вторую пару неразличимых цветов, определяющих в треугольнике вторую прямую. Искомая точка является точкой пересечения этих двух прямых.

Эта методика стоит как будто в противоречии с доказанным выше положением, что особенности зрения дихромата вполне определяются *одной* парой неразличимых цветов, тогда как в описанном выше случае их требуется по крайней мере две пары. Это расхождение связано исключительно с дурной привычкой отбрасывать третью координату цветового треугольника.

Между параллельными прямыми неразличимых дихроматом цветов в пространстве и соответствующими прямыми в треугольнике есть существенная разница. В то время как *любые* цвета, лежащие на той же прямой в пространстве, *всегда* будут неразличимы для дихроматов, далеко не *любые* цвета, лежащие на соответствующей прямой в треугольнике, будут для него неразличимы. В самом деле, в одной и той же точке треугольника ле-

жат все цвета одинаковой цветности, но *любой яркости*, а такие цвета всегда различны не только для трихромата, но и для любого дихромата. Чтобы условие неразличимости двух цветов дихроматом было бы не только необходимым, но и достаточным, надо, чтобы не только соответствующие точки лежали в треугольнике на указанных прямых, но чтобы, кроме того, *третьи координаты этих цветов удовлетворяли некоторому вполне определенному соотношению*.

Для того, чтобы по одной паре неразличимых дихроматом цветов найти искомую точку в треугольнике, надо указать все три их координаты, т. е. изобразить их в виде точек с определенным “грузом”, равным сумме соответствующих пространственных координат. Если произвести после этого вычитание соответствующих параллельно направленных сил, то точка приложения равнодействующей будет лежать, как известно, на прямой, соединяющей исходные точки на расстояниях от них, обратно пропорциональных грузам, за большим из грузов.

Таким образом, мы видим, что правильное использование координат цвета в треугольнике также позволяет уже по *одной паре* неразличимых дихроматом цветов определять искомую точку. Когда, отбрасывая третьи координаты, ограничиваются только положением соответствующих точек в треугольнике, то нахождение точки приложения равнодействующей параллельных сил становится невозможным, и можно сказать только, что она лежит где-то на прямой, соединяющей точки неразличимых цветов.

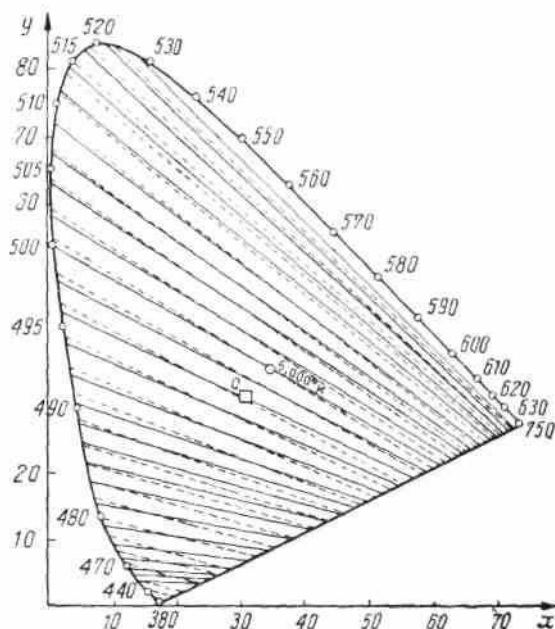
Такое игнорирование третьих координат, т. е. соотношений яркостей, при которых цвета данных цветностей неразличимы, объясняется плохим пониманием изучаемых количественных закономерностей вообще и свойств цветового треугольника в частности, что ярко сказывается и при обсуждении полученных результатов. Об этом будет сказано ниже.

Не трудно убедиться, что расчет по методу сложения параллельных сил в треугольнике в точности совпадает, что и естественно, с изложенным нами векторным способом по формулам (2) и (3). Мы, однако, пользовались этим последним, так как он удобнее при выведении средних значений из ряда экспериментов.

5. Использование всех трех координат цвета вместо двух представляет большие преимущества во многих отношениях. Во-первых, так как каждая пара найденных экспериментально неразличимых цветов дает возможность определить искомое направление в пространстве (точку в треугольнике), то то же самое количество независимых определений положения искомой точки можно получить при числе экспериментов в два раза меньшем. Во-вторых, самые определения при использовании всех трех цветовых координат дают значительно большую точность по той причине, что чувствительность к изменению цвета при изменении яркости у дихроматов, вообще говоря, того же порядка, что у нормального глаза, и третьи координаты неразличимых дихроматом цветов определяются со значительной точностью. Когда мы попробовали обработать наши данные по тому и другому способу, то и определение точки “схода” при использовании всех трех координат дало для протанопов примерно в два раза меньшую среднюю ошибку. Для дейтеранопов разница получилась еще более разительной. В этом можно убедиться при рассмотрении графика, приводимого Джеддом [4, 2] на основании данных Питта (фиг. 2).

Точность определения точки пересечения двух прямых зависит от точности определения направления этих прямых и от угла, который они образуют. Для более точного определения направления необходимы возможно более далекие друг от друга точки этой прямой, т. е. длинный ее отрезок. Чтобы угол между прямыми был больше, необходимо взять две возможно более далекие прямые. Между тем, как это видно на графике Джедда, длинные отрезки прямых, а, следовательно, и более или менее точное их направление в случае дейтеранопов можно получить только в “длинноволновой” части графика (правая сторона фигуры). В “коротковолновой” части графика отрезки прямых настолько коротки, что в пределах ошибки опыта направления прямых определяются крайне неточно. Сам Джедд, обрабатывая эти данные, нашел поэтому возможным весьма заметно отступить от непосредственных данных эксперимента (на фиг. 2 пунктиром показаны экспериментальные данные Питта, а сплошными линиями — прямые, проведенные Джеддом).

При использовании всех трех координат цвета эти трудности полностью отпадают. В любой цветовой области в *пространстве* можно получить весьма длинные отрезки прямых, определяющие их направление достаточно точно. С другой стороны, каждая пара неразличимых цветов дает независимое определение, и его точность не связана с выбором двух далеко отстоящих неразличимых пар. В частности, как легко видеть из приводимых ниже наших данных, такие отступления от экспериментальных данных Питта, какие Джэйдд считает вполне допустимыми при его расчете, лежат очень далеко за пределами разброса точек, полученных нами.



Фиг. 2.

Наконец, использование всех трех цветовых координат дает возможность последующей проверки правильности окончательного результата, не только полученного нами, но и данных других исследователей. Принадлежность к прямой, сходящейся в одной (конечной или “бесконечно удаленной”) точке в треугольнике, является, как уже было указано, необходимым, но не достаточным условием неразличимости двух цветов дихроматом. В то же время, *любые* цвета, лежащие на прямой соответствующего направления в пространстве, если направление найдено верно, должны быть неразличимы дихроматом. Поэтому, найдя направление соответствующей оси в пространстве, мы проделали поверочный эксперимент, а именно: установили на трехцветном колориметре цветовые пары, для которых цветовой вектор-разность имел найденное нами направление.

Эти установки предъявлялись дихроматам и были ими принимаемы, что указывает, что сделанное определение направления искомой оси лежит в пределах порога различения. Такие же установки, когда вектор-разность параллелен оси  $G$ , предлагаемые Джэйддом, дейтеранопами уверенно отвергаются. Эти проверочные эксперименты настолько просты, что могут быть легко проведены в любой лаборатории, где есть трехцветный колориметр.

Этот опыт должен проводиться так. Пусть  $x_0$  и  $y_0$  — координаты предполагаемой точки схода в треугольнике. (Так как нам важно лишь направление искомой оси в пространстве, то в данном случае достаточно двух координат.) Переводим эти координаты в систему цветов прибора. Пусть это будут числа  $\bar{k}_0, \bar{z}_0, \bar{c}_0$ . (Так как точки схода лежат вне области реальных цветов, то по крайней мере одна из координат  $\bar{k}_0, \bar{z}_0, \bar{c}_0$  в системе прибора будет отрицательна.) После этого устанавливаем в поле объекта какой-либо цвет и производим его измерение обычным путем. Пусть мы получаем при этом отсчеты  $\bar{k}_1, \bar{z}_1, \bar{c}_1$ . Прибавляем (или вычитаем, если величина отрицательна) к этим отсчетам величины, пропорциональные  $m\bar{k}_0, m\bar{z}_0, m\bar{c}_0$  с произвольным коэффициентом пропорцио-

нальности  $m$ . Полученные суммы  $\bar{k}_2, \bar{z}_2, \bar{c}_2$ :

$$\bar{k}_2 = \bar{k}_1 + m\bar{k}_0; \bar{z}_2 = \bar{z}_1 + m\bar{z}_0; \bar{c}_2 = \bar{c}_1 + m\bar{c}_0$$

представляют собой отсчеты по трем шкалам прибора для цвета, который должен быть неотличим для дихромата от первоначального. Поэтому, если в поле объекта оставить прежний цвет  $\bar{k}_1, \bar{z}_1, \bar{c}_1$ , а в поле сравнения установить цвет, соответствующий отсчетам  $\bar{k}_2, \bar{z}_2, \bar{c}_2$ , поля должны остаться равными для дихромата. Если этого нет, значит, направление оси определено для данного дихромата не точно. Оценить эту неточность удобнее всего, предоставив дихромату исправить равенство, пользуясь *только двумя* шкалами колориметра, не трогая той, которая ближе всего подходит к его типу дихроматизии, т. е. протаноп не должен изменять “красного” отсчета, а дейтераноп — “зеленого”.

Такого рода проверка положения осей дихроматов в различных лабораториях представляется в высшей степени желательной, что и заставило нас дать подробно методику этой проверки. Такая проверка, в частности, показывает с полной несомненностью неправомерность предположения Джедда, что точка  $G$  лежит на алихне.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РАБОТА С ДИХРОМАТАМИ

б. Экспериментальная работа проводилась на трехцветном колориметре следующим порядком. В поле объекта устанавливались выкраски или цветные стекла, подобранные так, чтобы можно было проводить измерения в различных областях цветового пространства. После этого цвет измерялся нормальным трихроматом и проверялась приемлемость этого равенства для испытуемого дихромата. Отсчеты по трем шкалам прибора давали трехцветные координаты измеряемого цвета в системе цветов прибора, т. е. в системе, в которой за единичные цветовые векторы приняты цвета, получаемые в поле сравнения колориметра, когда отсчеты по трем его шкалам равны: 1, 0, 0; 0, 1, 0; 0, 0, 1.

После этого, оставляя тот же образец в поле объекта, в поле сравнения резко изменялась одна из составляющих, а именно та, которая ближе всего подходила к цвету, “невидимому” испытуемым дихроматом, т. е. при испытании протанопов резко изменялась красная составляющая колориметра, а для дейтеранопов — зеленая. Равенство полей для трихроматов при этом нарушалось очень резко. Нарушалось оно и для дихромата, поскольку основные цвета колориметра заметно отличаются от цветов, «невидимых» дихроматами. Это нарушенное равенство дихромату предлагалось восстановить, оперируя, однако, только двумя другими основными цветами прибора. Для дихромата, имеющего двухмерное цветовое многообразие, это всегда возможно.

Полученные таким путем новые три отсчета по шкалам прибора давали трехцветные координаты в системе прибора для цвета, неотличимого дихроматом от первоначального. Пусть, например,  $\bar{k}_1, \bar{z}_1, \bar{c}_1$  — отсчеты по трем шкалам прибора, дающие равенство, приемлемое как для дихромата, так и для нормального трихромата. Если испытуемый, положим, — дейтераноп, мы резко изменяем величину зеленой компоненты прибора, давая ей какое-либо произвольное положительное или отрицательное приращение  $\Delta z$ . Установку, соответствующую отсчетам  $\bar{k}_1, \bar{z}_1 + \Delta z, \bar{c}_1$  по шкалам прибора предъявляют дихромату, который приводит ее к равенству изменением компонент  $\bar{k}, \bar{c}$ . Пусть для этого ему потребуется дать им приращения  $\Delta k, \Delta c$ . Тогда два цвета, соответствующие отсчетам  $\bar{k}_1, \bar{z}_1, \bar{c}_1$  и  $\bar{k}_2 = \bar{k}_1 + \Delta k, \bar{z}_2 = \bar{z}_1 + \Delta z, \bar{c}_2 = \bar{c}_1 + \Delta c$ , будут цветами, неразличимыми дихроматом, причем величина  $\Delta z$ , произвольно задаваемая экспериментатором, заведомо довольно велика. Нанося эти точки в пространстве (мы изображали цветовое пространство с помощью двух ортогональных проекций на координатные плоскости), мы можем определить искомое направление прямой, на которой должны лежать эти точки. Компоненты вектора, проведенного в этом направлении из начала координат, будут, очевидно, относиться, как

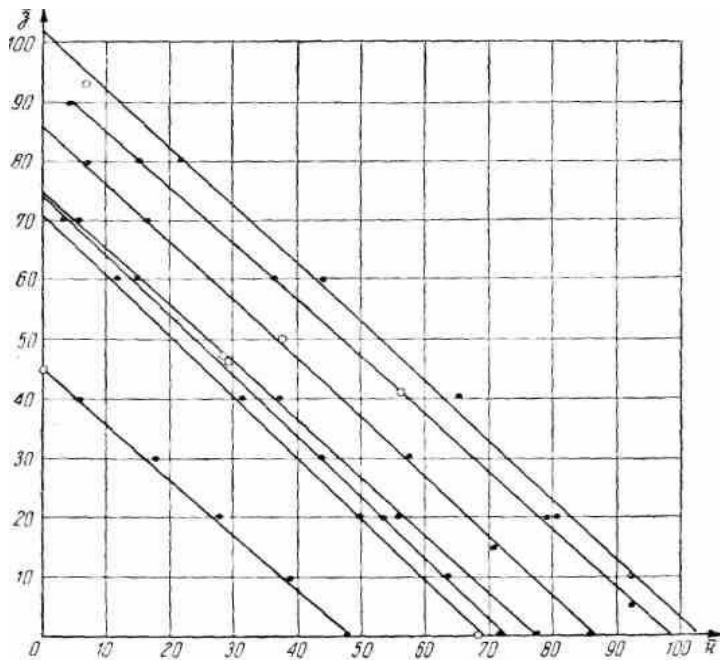
$$\Delta k : \Delta z : \Delta c,$$

а потому, если мы построим в плоскости цветового треугольника сетку, соответствующую основным цветам прибора, то положение искомой точки в треугольнике определяется по этой сетке, как

$$\kappa_0 = \frac{\Delta\bar{\kappa}}{\Delta\bar{\kappa} + \Delta\bar{\lambda} + \Delta\bar{c}}; \lambda_0 = \frac{\Delta\bar{\lambda}}{\Delta\bar{\kappa} + \Delta\bar{\lambda} + \Delta\bar{c}}. \quad (5)$$

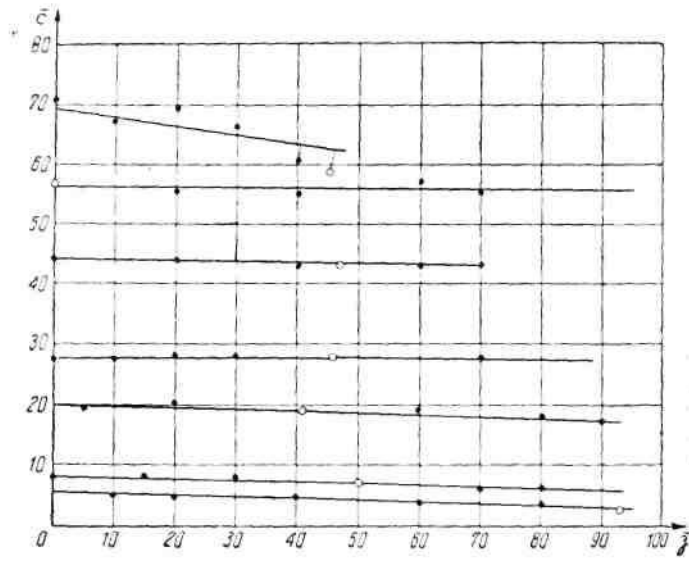
Мы, однако, предпочитали определять положение прямой по первому способу — с помощью двух проекций цветового пространства на координатные плоскости основных цветов прибора. Для более точного определения этой прямой мы строили ее в большинстве случаев не по двум, а по нескольким точкам (от 5 до 12 точек), которые получали, заставляя дихромата восстанавливать равенство при различных, задаваемых экспериментатором, величинах приращения  $\Delta\lambda$  или  $\Delta\kappa$ .

Проводя эксперименты с различными исходными цветами, мы получали ряд прямых, для которых, как можно судить по приводимым ниже графикам (фиг. 3—7), ожидаемая параллельность соблюдалась вполне удовлетворительно. Так как точка, соответствующая измерениям нормального трихромата (на фигурах отмечена кружком), отклонялась от прямой, построенной по остальным точкам, в пределах, не превышающих разброса точек для дихромата, то это подтверждало законность принятия того положения, что равенства трихромата остаются справедливыми для дихромата. То, что точки удовлетворительно укладываются на параллельные прямые, подтверждает справедливость для дихроматов принципа аддитивности.

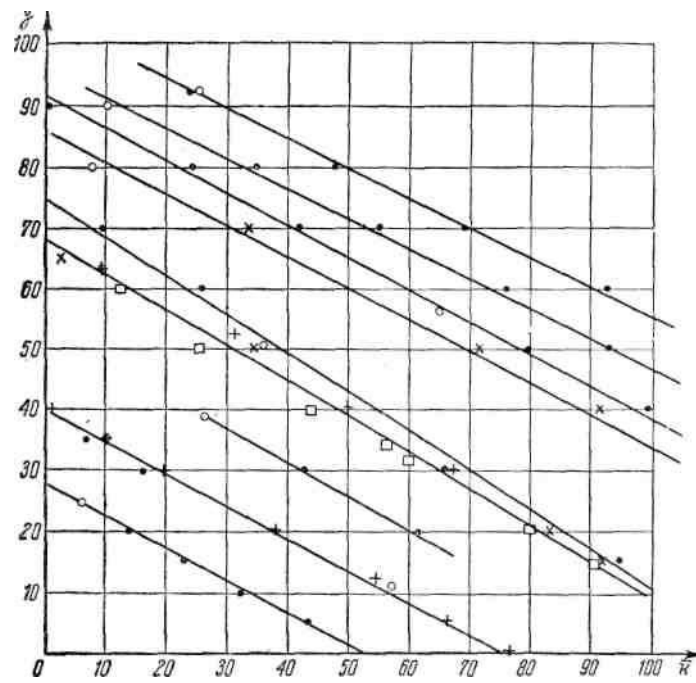


Фиг. 3. Линии цветов, неразличимых зеленослепым А.В.К. (проекция на плоскость  $\bar{\kappa}\bar{\lambda}$ ).

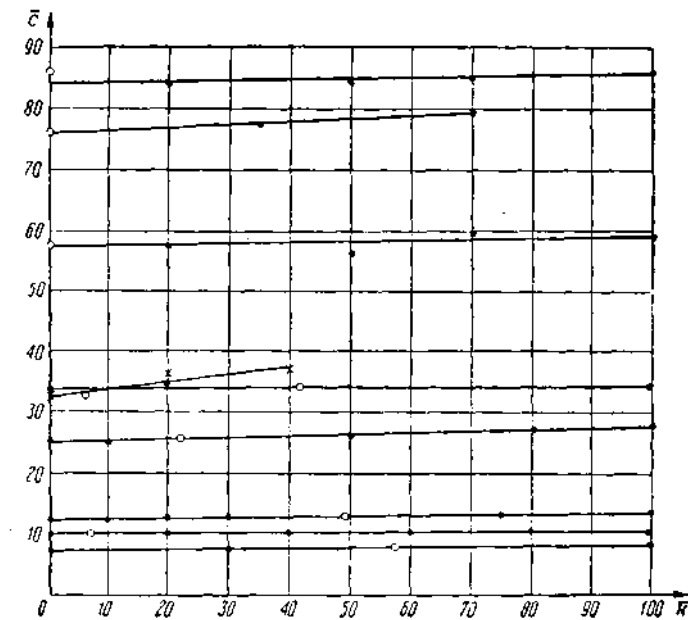




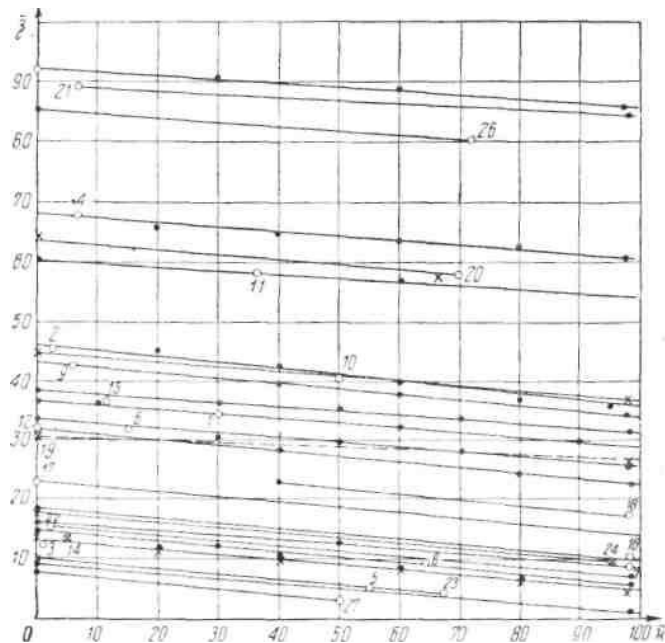
Фиг. 4. Линии цветов, неразличимых зеленослепым А.В.К. (проекция на плоскость  $\overline{K\bar{C}}$ ).



Фиг. 5. Линии цветов, неразличимых краснослепым А.С.Б. (проекция на плоскость  $\overline{K\bar{Z}}$ ).



Фиг. 6. Линии цветов, неразличимых краснорслепым А.С.Б. (проекция на плоскость  $\bar{k}\bar{c}$ )



Фиг. 7. Линии цветов, неразличимых краснорслепым Ю.А.Д. (проекция на плоскость  $\bar{k}\bar{c}$ )

7. Проведению этих опытов предшествовал отбор испытуемых дихроматов и проверка того, что их зрение двумерно. Предварительный отбор производился с помощью таблиц Исихара. Однако эти таблицы не позволяют надежно отличать полную дихромазию от случая, который можно охарактеризовать, как сильное увеличение порога различимости вдоль направления неразличимых цветов дихромата. Такие лица принимают установки, сходные с теми, какие дают дихроматы, когда различия в цвете для трихромата не очень велики; когда же им дают установку с очень большим  $\Delta\bar{z}$  или  $\Delta\bar{k}$ , то они затрудняются восстановить равенство, *пользуясь всего только двумя цветами прибора*, что показывает на наличие у них все же трехмерного многообразия цветов. Таких лиц мы отвергали, оставляя только тех, которые в любом случае могли получить равенство полей с помо-

щью только двух цветов прибора.

В результате такого отбора мы нашли четырех протанопов и трех дейтеранопов, с которыми и проводили эксперименты.

В число этих лиц входили только такие, которые удовлетворительно принимали равенства нормального трихромата. Им предъявлялись равенства нормального трихромата, которые они или принимали, или вносили поправки. Величина этих поправок характеризовала степень индивидуальных отклонений, причем к испытаниям допускались только те, для которых эти отклонения не превышали обычно наблюдаемых различий в колориметрических установках наблюдателей, признаваемых нормальными. Примером таких испытаний могут служить приведенные в табл. 1 данные для одного из допущенных к испытаниям протанопов. Приведенные в этой таблице данные представляют собой средние результаты из пяти установок на равенство.

Все измерения были выполнены на колориметре системы Дональдсона, за исключением опытов с первым протанопом Ю.А.Д., которые проводились на колориметре системы Дёмкиной.

В колориметре Дональдсона мы предварительно проверили с помощью селенового фотоэлемента качество рабочих шкал, т. е. соблюдение пропорциональности между пропущенным потоком и отсчетом по шкалам. В результате, были получены данные, приводимые в табл. 2, выражающие зависимость показаний гальванометра от отсчетов по шкалам. Эти данные позволяют считать, что пропорциональность соблюдается удовлетворительно.

Таблица 1

Измеряемый цвет	Наблюдатель	Показания колориметра		
		$\bar{k}$	$\bar{z}$	$\bar{c}$
Сине-зеленый	нормальн.	0	36,5	54,9
	дихромат	0	36,1	54,1
Зеленый	нормальн.	6,8	88,3	5,8
	дихромат		89,2	7,3
Синий	нормальн.	2,1	16,8	90,3
	дихромат		15,4	85,1
Красный	нормальн.	67,2	4,2	3,3
	дихромат		4,5	4,0
Желтый	нормальн.	66,7	56,8	6,5
	дихромат		57,5	8,7
Белый	нормальн.	71,2	81,7	27,8
	дихромат		80,0	28,1

Оба колориметра были проградуированы в международной системе X, Y, Z по способу трех цветов. Цветовые характеристики градуировочных светофильтров были проведены на основании спектрофотометрических измерений на трех спектрофотометрах (визуальном Кёнига—Мартенса и двух объективных: Бекмана и Цейсса); цветовая температура ламп была проверена. Влияние индивидуальных особенностей цветного зрения наблюдателя при градуировке колориметра было по возможности устранено путем выбора нормального трихромата, результаты колориметрических измерений которого близко соответствовали данным для стандартного наблюдателя. С этой целью испытывались шесть нормальных наблюдателей, которые градуировали колориметры и одновременно измеряли на них набор цветных образцов с известными цветовыми характеристиками для стандартного наблюдателя М.О.К.

Результаты проверки линейности шкал светофильтров в колориметре Дональдсона

Отсчеты по шкалам	Показания гальванометра в мм (средние из пяти)					
	шкалы					
	нижн.	Δ	средн.	Δ	верхн.	Δ
5	9,1		7,7		8,8	
10	18,1	18,8	15,0	15,9	17,5	18,1
20	36,9	18,3	30,9	14,5	35,6	18,3
30	55,2	18,2	45,4	14,6	53,9	18,5
40	73,4	18,0	59,8	14,0	72,4	18,5
50	91,4	17,8	73,8	14,1	90,9	18,6
60	109,2	18,5	87,9	14,5	109,5	18,7
70	127,7	19,0	102,4	14,1	128,2	17,5
80	146,7	15,8	116,5	14,5	145,7	17,6
90	162,5		131,0		163,3	
95	171,4	17,7	137,9	14,2	172,9	17,9
100	180,2		145,2		181,2	

Ниже мы приводим уравнения градуировок колориметров системы Дёмкиной и системы Дональдсона для перехода от отсчетов  $\bar{k}, \bar{z}, \bar{c}$  по трем шкалам прибора к международным координатам цвета  $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$  в системе МОК.

Для колориметра Демкиной:

$$\left. \begin{aligned}
 \bar{x} &= 0,866 \bar{k} + 0,260 \bar{z} + 0,139 \bar{c} \\
 \bar{y} &= 0,326 \bar{k} + 0,643 \bar{z} + 0,0306 \bar{c} \\
 \bar{z} &= 0,0014 \bar{k} + 0,020 \bar{z} + 0,718 \bar{c}
 \end{aligned} \right\} \text{Для колориметра Дональдсона:}$$

$$\left. \begin{aligned}
 \bar{x} &= 0,787 \bar{k} + 0,205 \bar{z} + 0,256 \bar{c} \\
 \bar{y} &= 0,302 \bar{k} + 0,578 \bar{z} + 0,120 \bar{c} \\
 \bar{z} &= 0,00 \bar{k} + 0,059 \bar{z} + 1,429 \bar{c}
 \end{aligned} \right\} (6)$$

8. Пользуясь описанной выше методикой, мы провели, как сказано, опыты с четырьмя протанопами и тремя дейтеранопами. В табл. 3...9 даны результаты этих опытов в виде серий цветов, неразличимых дихроматами. Эти данные приведены в виде трехцветных координат в системе, основных цветов прибора. Таким образом, каждый цвет обозначен тремя отсчетами по трем шкалам колориметра, при которых этот цвет получается в поле сравнения прибора. Связь этой системы с международной определяется приведенными выше формулами. Во избежание лишних расчетов всю работу по усреднению экспериментальных данных и по определению искомого направления, вдоль которого ложатся в цветовом пространстве цвета, неразличимые дихроматом, мы проводили в системе цветов приборов без всякого пересчета, и только когда это направление было найдено, переходили к международной системе. Это чрезвычайно сокращало вычислительную работу, не влияя на точность результатов.

Расположение данных в таблицах следующее. В первом столбце даны номера и приблизительные наименования исходных цветов, т. е. цвета в поле объекта колориметра с точки зрения нормального трихромата. Во втором, третьем и четвертом столбцах даны отсчеты по трем шкалам колориметра, т. е. абсолютные координаты  $\bar{k}, \bar{z}, \bar{c}$  в системе основных цветов прибора. В пятом и шестом — координаты  $k, z$  (трехцветные коэффициенты) соответствующих точек в треугольнике  $kzс$ . Каждому исходному цвету, названному в первом столбце, соответствует серия отсчетов. Эти серии отделены друг от друга горизон-

тальной чертой. Координаты, указанные в первой строке каждой серии, являются координатами исходного цвета при его измерении нормальным трихроматом; эта установка, как было сказано, принималась также теми дихроматами, с которыми проводились эксперименты. В остальных строках каждой серии даны отсчеты, сделанные дихроматом, которые, таким образом, представляют собой координаты (в системе прибора) цвета неотличаемых дихроматом от исходного. Все приводимые данные измерений являются средними из пяти повторных установок каждое.

Таблица 3

Цвета, неразличимые краснотелым Ю.А.Д.

№ и название цвета	$\bar{k}$	$\bar{z}$	$\bar{c}$	$\kappa$	$z$
I Белый	29,8	34,2	9,2	0,407	0,464
	60,0	32,0	8,8	0,595	0,317
	90,0	29,6	8,6	0,702	0,231
	10,0	36,2	9,1	0,181	0,655
	0,0	36,2	9,8	0	0,786
2 Сине-зеленый	2,5	46,0	57,7	0,024	0,433
	20,0	45,7	56,3	0,164	0,374
	40,0	42,5	56,5	0,288	0,306
	60,0	39,4	54,4	0,390	0,256
	80,0	36,4	54,6	0,468	0,213
3 Синий	97,5	35,4	54,5	0,520	0,189
	1,0	12,4	72,4	0,012	0,144
	20,0	11,8	75,1	0,187	0,110
	40,0	10,1	74,6	0,321	0,081
	60,0	7,9	78,2	0,411	0,054
4 Зеленый	80,0	6,3	76,7	0,490	0,039
	97,5	4,7	76,1	0,546	0,026
	6,5	67,8	7,6	0,079	0,828
	20,0	65,6	7,3	0,215	0,706
	40,0	64,6	7,1	0,358	0,578
5 Пурпурный	60,0	63,1	7,6	0,459	0,483
	80,0	62,2	7,6	0,534	0,415
	97,8	60,4	7,8	0,589	0,364
	55,0	4,8	96,3	0,352	0,031
	0	9,3	93,1	0	0,091
6 Сиреневый	98,0	0,1	93,7	0,511	0
	15,0	31,8	77,0	0,121	0,267
	0	34,2	77,8	0	0,305
	30,0	30,6	77,4	0,217	0,222
	50,0	29,6	79,5	0,314	0,186
7 Сиреневый	70,0	27,9	78,5	0,397	0,158
	98,0	25,6	78,7	0,485	0,127
	98,0	7,8	37,4	0,685	0,054
8 Розовый	50,0	12,2	38,0	0,499	0,122
	0	16,1	37,6	0	0,300
	64,0	9,3	33,4	0,600	0,087
	98,0	6,0	32,2	0,720	0,044
	30,0	11,9	32,4	0,404	0,160
	0	15,0	31,5	0	0,323

9 Зеленый	6,0	43,1	7,7	0,106	0,758
	97,8	34,7	7,9	0,696	0,247
	60,0	37,7	7,7	0,569	0,358
	40,0	39,0	7,7	0,461	0,450
10 Желтый	50,0	41,3	7,6	0,506	0,418
	0	45,1	7,8	0	0,851
	98,0	36,9	8,2	0,685	0,258
11 Дневной белый	36,0	58,5	54,7	0,241	0,392
	0	60,2	49,3	0	0,550
	98,0	53,9	53,6	0,476	0,262
	60,0	56,5	51,0	0,358	0,338
12 Голубой	0	32,1	47,5	0	0,403
	20,0	29,9	46,8	0,207	0,309
	40,0	28,2	47,7	0,345	0,243
	60,0	26,2	47,7	0,448	0,196
	80,0	24,4	47,7	0,526	0,160
	98,0	22,6	47,6	0,582	0,134
13 Сине-зеленый	11,3	36,3	20,2	0,166	0,536
	0	38,3	19,2	0	0,666
	30,0	36,2	21,5	0,344	0,413
	50,0	35,0	21,8	0,467	0,327
	70,0	33,4	23,1	0,553	0,264
	98,0	31,3	23,9	0,640	0,204
14 Синий	4,0	12,8	51,4	0,039	0,188
	20,0	11,7	49,7	0,246	0,144
	40,0	9,5	48,8	0,407	0,096
	60,0	7,6	49,2	0,513	0,065
	80,0	5,8	48,1	0,591	0,043
	98,0	4,2	49,3	0,645	0,028
	0	13,2	50,5	0	0,207
15 Зеленый	0	91,8	4,4	0	0,954
	30,0	90,4	4,2	0,240	0,723
	60,0	88,5	4,1	0,392	0,577
	98,0	85,5	3,9	0,522	0,455
16 Красный	98,0	9,4	5,6	0,865	0,083
	0	18,6	3,5	0	0,841
17 Красный	0	22,9	4,2	0	0,832
	98,0	13,9	4,5	0,840	0,119
18 Красный.	98,0	16,8	0	0,853	0,146
	40,0	22,5	0	0,640	0,360
19 Сине-зеленый	0	31,1	54,1		
	98,0	26,7	53,2		
20 Желтый	69,0	57,6	6,4		
	0	64,1	9,2		
21 Зеленый	6,8	89,2	7,3		
	98,0	84,4	10,4		
22 Синий	2,1	15,4	85,1		
	98,0	7,2	86,7		
23 Красный	67,2	4,2	4,0		
	0	10,2	0		
24 Красный	95,0	9,3	6,1		
	0	18,2	2,9		

25 Желтый	66,0 0	57,5 64,5	8,7 10,4		
26 Белый	71,2 0	80,0 86,5	28,1 27,8		
27 Пурпурный	50,0 0	3,3 7,8	70,7 73,0		

Таблица 4

Цвета, неразличимые краснослепым Т.П.К.

№ и название цвета	$\bar{k}$	$\bar{z}$	$\bar{c}$	$k$	$z$
1 Сиреневый	0	40,0	21,8	0	0,647
	100	31,0	25,4	0,640	0,198
	50	36,4	22,2	0,460	0,335
	25,0	38,2	20,9	0,298	0,455
	75,0	33,9	20,5	0,580	0,262
2 Голубой	32,0	62,6	55,6	0,213	0,417
	15,0	62,5	51,6	0,116	0,484
	0	64,7	48,1	0	0,573
	50,0	62,6	51,2	0,305	0,383
	75,0	61,9	48,8	0,404	0,333
	100,0	59,6	46,5	0,485	0,289
3 Белый	0	66,7	13,4	0	0,833
	20,0	64,0	13,4	0,206	0,658
	40,0	63,1	12,3	0,347	0,547
	60,0	60,9	12,9	0,448	0,455
	80,0	59,9	12,8	0,524	0,392
	100,0	58,8	13,8	0,580	0,341
4 Зеленый	0	89,6	0,8	0	0,992
	20,0	88,4	1,3	0,182	0,806
	40,0	86,1	0,4	0,316	0,681
	60,0	84,1	0,7	0,414	0,581
	80,0	83,2	1,0	0,487	0,507

Таблица 5

Цвета, уравниваемые краснослепым А.С. Б.

№ и название цвета	$\bar{k}$	$\bar{z}$	$\bar{c}$	$k$	$z$
1 Белый Вечерний	57,1	58,5	7,9	0,462	0,473
	100,0	54,6	8,1	0,613	0,335
	0	62,5	7,5	0	0,893
	30,0	61,3	7,8	0,303	0,618
	100,0	26,1	4,1	0,770	0,201
2 Голубой	41,9	42,7	33,9	0,353	0,360
	100,0	38,0	33,8	0,580	0,220
	0	45,4	33,3	0	0,577
	20,0	44,9	34,5	0,201	0,452

3 Синий	6,1	10,0	32,6	0,125	0,205
	0	10,4	33,2	0	0,238
	20,0	8,4	36,4	0,308	0,129
	40,0	6,8	36,9	0,478	0,081
4 Голубой Зеленый	22,2	44,3	25,1	0,202	0,484
	50,0	42,4	26,1	0,442	0,358
	80,0	40,1	26,8	0,544	0,273
	100,0	38,8	27,4	0,610	0,236
	0	45,8	25,2	0	0,646
	10,0	45,4	25,1	0,124	0,564
5' Сиреневый	49,0	31,2	12,9	0,526	0,335
	30,0	32,5	12,8	0,398	0,432
	0	35,5	12,4	0	0,742
	75,0	29,3	12,6	0,642	0,251
	100,0	27,4	13,4	0,710	0,194
	10,0	34,5	12,3	0,176	0,608
	20,0	33,5	12,4	0,304	0,508
	100,0	14,9	8,7	0,810	0,121
6 Сине-зеленый	7,2	41,1	10,3	0,123	0,702
	0	41,6	10,0	0	0,806
	20,0	39,8	10,1	0,286	0,570
	40,0	38,8	10,4	0,448	0,435
	60,0	37,6	10,1	0,557	0,349
	80,0	35,3	10,4	0,638	0,281
	100,0	33,5	10,3	0,696	0,233
7 Зеленый	0	84,9	0	0	1,000
	20,0	83,9	0	0,192	0,808
	40,0	82,4	0	0,327	0,673
	60,0	81,9	0	0,423	0,577
	80,0	79,7	0	0,501	0,499
	100,0	78,7	0	0,560	0,441
	100,0	36,4	0,1	0,733	0,267
8 Сине-зеленый	0	11,1	76,4	0	0,126
	35,0	9,2	77,3	0,288	0,076
	70,0	6,1	79,3	0,450	0,039
9 Сине-зеленый	100,0	0	92,1	0,520	0
	20,0	9,0	78,3	0,186	0,084
10 Сине-зеленый	0	47,2	86,2	0	0,354
	20,0	46,6	84,0	0,133	0,309
	50,0	44,9	84,1	0,272	0,244
	70,0	43,9	84,5	0,353	0,221
	100,0	40,8	85,9	0,441	0,180
11 Сине-зеленый	0	47,5	57,9	0	0,450
	20,0	46,8	57,5	0,161	0,376
	50,0	44,3	56,2	0,332	0,294
	70,0	42,8	59,0	0,407	0,249
	100,0	40,4	59,0	0,502	0,203



Таблица 6[

Цвета, неразличимые краснослепым В.О.К.

№ и название цвета	$\bar{k}$	$\bar{z}$	$\bar{c}$	$\kappa$	$z$
1 Белый	76,0	76,9	11,8	0,461	0,467
	100,0	81,6	12,2	0,516	0,421
	55,0	80,8	12,1	0,372	0,546
	36,0	87,0	11,5	0,268	0,646
2 Голубой	52,0	54,7	38,9	29	0,375
	100,0	50,7	38,3	0,367	0,268
3 Сиреневый	46,8	34,7	16,3	0,479	0,355
	20,0	36,9	15,0	0,278	0,514
	0	38,4	15,2	0	0,716
	60,0	35,9	15,8	0,57	0,321
	80,0	34,7	14,0	0,622	0,270
	100,0	33,7	15,2	0,671	0,226
4 Голубой	30,3	54,4	69,2	0,197	0,364
	0	58,0	61,1	0	0,486
	60,0	53,6	67,2	0,332	0,296
	100,0	51,0	68,4	0,455	0,232

Таблица 7

Цвета, неразличимые зеленослепым И.С.О.

№ и название цвета	$\bar{k}$	$\bar{z}$	$\bar{c}$	$k$	$z$
Сиреневый	62,2	48,5	22,8	0,466	0,363
	47,0	70,0	20,7	0,342	0,508
	19,1	100,0	19,8	0,138	0,720
	83,8	30,0	22,4	0,616	0,220
	30,4	85,0	19,1	0,223	0,632
	97,3	15,0	23,6	0,716	0,110
2 Зеленый	1,0	90,0	12,1	0	0,882
	20,4	70,0	12,3	0,199	0,665
	40,3	50,0	12,2	0,393	0,488
	63,3	30,0	13,4	0,590	0,284
	79,8	15,0	13,9	0,735	0,138
	95,6	0	14,4	0,870	0
3 Белый	42,3	52,0	8,0	0,413	0,508
	20,3	70,0	6,5	0,210	0,723
	67,3	30,0	8,4	0,636	0,284
	81,6	15,0	8,3	0,778	0,143
	96,6	0	9,1	0,914	0
4 Бледно-голубой	42,8	48,0	31,0	0,351	0,393
	60,3	30,0	31,6	0,495	0,246
	80,0	15,0	31,9	0,631	0,118
	93,4	0	32,5	0,742	0
	20,4	70,0	30,0	0,169	0,581
	0,6	90,0	29,1	0,005	0,750
5 Голубой	25,5	63,0	47,0	0,188	0,465
	54,8	40,0	49,4	0,380	0,278
	77,3	20,0	55,4	0,506	0,131
	98,1	0	55,9	0,637	0
	14,6	80,0	52,0	0,100	0,546
	7,6	87,0	50,6	0,052	0,600
6 Зеленый	3,4	94,0	2,8	0,034	0,938
	23,0	80,0	3,0	0,217	0,755
	48,7	60,0	3,8	0,433	0,534
	67,2	40,0	4,2	0,603	0,360
	93,0	20,0	4,9	0,790	0,170
7 Сине-зеленый	25,7	54,0	90,2	0,151	0,318
	3,6	75,0	90,6	0,021	0,444
	14,5	65,0	85,7	0,088	0,394
	51,2	35,0	85,7	0,298	0,204
	58,5	25,0	86,3	0,344	0,147
85,2	0	87,8	0,493	0	
8 Синий	2,4	40,0	70,4	0,021	0,354
	14,0	30,0	77,0	0,116	0,248
	25,6	20,0	71,9	0,218	0,170
	35,6	10,0	76,0	0,293	0,082
	46,4	0	78,0	0,373	0

Цвета, неразличимые зеленослепым А.В.К.

№ и название цвета	$\bar{k}$	$\bar{z}$	$\bar{c}$	$k$	$z$
1 Сиреневый	54,6	41,0	19,0	0,477	0,358
	36,2	60,0	19,0	0,314	0,521
	15,0	80,0	18,0	0,133	0,708
	4,2	90,0	17,2	0,038	0,808
	78,8	20,0	20,4	0,661	0,168
	92,4	5,0	19,7	0,789	0,043
2 Белый	37,3	50,0	7,0	0,396	0,530
	57,3	30,0	8,0	0,601	0,315
	70,7	15,0	8,0	0,755	0,160
	85,7	0	8,0	0,914	0
	16,3	70,0	6,2	0,176	0,757
	7,2	80,0	6,2	0,08	0,856
3 Пурпурный	68,2	0	56,8	0,546	0
	49,7	20,0	55,3	0,398	0,160
	31,2	40,0	55,0	0,247	0,317
	11,7	60,0	57,0	0,091	0,466
	0,2	70,0	55,3	0,015	0,557
4 Зеленый	7,0	93,0	2,5	0,068	0,908
	21,8	80,0	3,8	0,206	0,757
	44,0	60,0	3,7	0,408	0,557
	65,0	40,0	4,7	0,592	0,365
	80,1	20,0	4,6	0,764	0,191
	92,3	10,0	5,2	0,858	0,093
5 Голубой 1	29,0	46,0	27,8	0,282	0,447
	53,3	20,0	28,0	0,526	0,197
	63,3	10,0	27,8	0,626	0,099
	71,7	0	28,0	0,720	0
	43,7	30,0	27,8	0,430	0,295
	3,2	70,0	27,5	0,031	0,695
6 Голубой 2	28,5	47,0	43,0	0,240	0,398
	5,3	70,0	43,0	0,045	0,591
	15,0	60,0	43,0	0,127	0,508
	37,0	40,0	43,0	0,308	0,333
	55,5	20,0	44,0	0,463	0,167
	77,5	0	44,5	0,635	0
7 Синий	0	45,0	58,5	0	0,396
	5,7	40,0	60,5	0,051	0,359
	17,8	30,0	66,3	0,156	0,236
	27,7	20,0	69,3	0,237	0,171
	39,0	10,0	67,3	0,335	0,086
	47,7	0	71,0	0,401	0

Цвета, неразличимые зеленослепым С.Е.Г.

№ и название цвета	$\bar{k}$	$\bar{z}$	$\bar{c}$	$k$	$z$
1 Зеленый	9,2	93,0	3,0	0,087	0,883
	28,0	70,0	2,0	0,280	0,700
	43,8	50,0	1,5	0,458	0,524
	72,5	30,0	5,8	0,670	0,277
	84,5	15,0	5,2	0,805	0,143
	97,2	10,0	4,8	0,867	0,089
	85,6	20,0	5,4	0,772	0,180
	67,0	40,0	4,7	0,600	0,358
	36,0	60,0	2,7	0,365	0,608
	23,3	80,0	2,0	0,221	0,759
2	49,8	50,0	8,7	0,458	0,460
	57,8	40,0	8,2	0,545	0,377
	68,4	30,0	7,4	0,646	0,283
	74,3	20,0	7,7	0,728	0,196
	92,8	10	9,4	0,827	0,089
	94,2	0	8,8	0,913	0
	41,4	60	8,4	0,377	0,546
	31,5	70	7,2	0,289	0,642
	21,8	80	8,1	0,198	0,727
	2,3	95	7,2	0,022	0,907
3 Сиреневый	55,8	38,0	17,8	0,501	0,340
	77,7	20,0	19,0	0,668	0,171
	96,2	0	19,5	0,832	0
	86,4	10,0	20,2	0,741	0,086
	68,5	30,0	19,1	0,583	0,255
	46,2	50,0	18,5	0,403	0,436
	36,2	60,0	17,5	0,319	0,528
	24,8	70,0	17,2	0,221	0,626
	19,4	80,0	18,0	0,165	0,682
	1,2	90,0	16,8	0,011	0,833
4 Голубой	37,2	52,7	28,3	0,315	0,446
	46,5	40,0	28,8	0,403	0,347
	76,1	20,0	32,1	0,594	0,156
	69,5	30,0	33,7	0,522	0,225
	86,9	10,0	34,7	0,660	0,076
	92,2	0	31,6	0,744	0
	33,3	70,0	30,1	0,189	0,568
	11,0	80,0	30,3	0,091	0,659
	69,9	35,0	30,6	0,508	0,269
	30,0	65,0	32,9	0,235	0,508
6,8	85,0	32,1	0,055	0,686	
5	49,0	47,0	49,1	0,337	0,324
	58,1	40,0	51,0	0,390	0,268
	63,8	30,0	48,5	0,448	0,211
	89,0	10,0	51,8	0,590	0,066
	77,2	20,0	49,0	0,528	0,137
	95,0	5,0	54,5	0,615	0,032
	38,5	60,0	54,0	0,252	0,394
	27,2	70,0	50,6	0,184	0,473

	16,6	80,0	51,7	0,112	0,539
	4,2	90,0	52,1	0,029	0,615
	47,4	50,0	50,8	0,320	0,337
	85,7	15,0	49,0	0,572	0,100
6	0,2	35,0	80,7	0,002	0,302
	10,0	30,0	69,7	0,091	0,274
	16,1	25,0	61,1	0,157	0,245
	22,5	20,0	59,8	0,220	0,195
	27,0	15,0	68,3	0,245	0,136
	36,5	10,0	67,8	0,319	0,087
	43,7	5,0	75,4	0,362	0,040
	46,7	0	75,1	0,384	0
	6,7	35,0	69,5	0,060	0,315
	11,4	30,0	74,5	0,098	0,259
	15,6	25,0	76,2	0,133	0,214
	23,1	20,0	68,1	0,208	0,180
	28,9	15,0	70,0	0,254	0,132
	35,6	10,0	76,4	0,292	0,082
	46,2	0	76,0	0,379	0
3,5	35,0	76,0	0,031	0,306	
7	77,6	0	4,0	0,950	0
	61,5	20,0	2,7	0,730	0,238
	47,8	40,0	2,8	0,528	0,442
	24,0	60,0	2,9	0,276	0,691
	3,3	80,0	0,8	0,039	0,952
	52,0	30,0	3,7	0,607	0,350
	36,3	50,0	2,8	0,407	0,561
	75,2	10,0	3,9	0,844	0,112
8	3,2	43,0	44,7	0,035	0,474
	16,2	30,0	41,3	0,178	0,343
	41,9	10,0	41,8	0,447	0,107
	3,0	43,0	39,7	0,035	0,502
	30,9	20,0	41,5	0,335	0,217
	51,3	0	41,1	0,555	0

9. Как уже было доказано, прямая, проведенная в цветовом пространстве через точки, соответствующие двум цветам, неразличимым для дихромата, в принципе уже определяет искомое направление вектора-разности. Но мы, в целях смягчения влияния случайных ошибок, в большинстве случаев использовали для проведения каждой прямой не одну пару неразличимых цветов, а все отсчеты одной серии. Так как соответствующие цвета все неразличимы между собой, то они должны давать точки одной и той же прямой. В результате, для определения направления отдельных прямых мы имели от двух до двенадцати точек этой прямой, в большинстве же случаев — пять-шесть точек. Как показывают приводимые экспериментальные данные, точки, соответствующие одной и той же серии, как правило, очень хорошо ложатся на прямые линии, однако неизбежно случается, что отдельные точки несколько “выпадают”, а поэтому определение направления прямых только по двум точкам может приводить к заметным неточностям.

Для графического изображения полученных числовых данных и для использования графических методов расчета мы изображали цветовое пространство в виде ортогональных проекций на две координатные плоскости: для протанопов — на плоскости  $kz$  и  $kc$ , а для дейтеранопов — на плоскости  $kz$  и  $zc$ . Этот наиболее обычный в технике способ изображения пространственных образов на плоскости, описываемый в курсах начертательной геометрии, представлял для нас то удобство, что при такой проекции интересующие нас параллельные прямые пространства сохраняют параллельность и в обеих проекциях. Пространственное положение точки или прямой вполне определяется двумя ее проекциями.

Такие проекции на координатные плоскости мы получаем, нанося в плоской координатной сетке две соответствующие пространственные координаты из трех. Направление прямой в пространстве при этом определяется направлениями двух ее проекций. Так проекция на плоскость  $kz$  определяет отношение  $\Delta \bar{z} : \Delta \bar{k}$ , проекция на плоскость  $kc$  — отношение  $\Delta \bar{c} : \Delta \bar{k}$ , откуда получаем

$$\Delta \bar{k} : \Delta \bar{z} : \Delta \bar{c},$$

определяющие пространственное положение прямой.

На фиг. 3—7 приведен ряд таких проекций для различных дихроматов. На них можно видеть, что не только точки каждой серии хорошо ложатся на прямые линии, но и прямые, соответствующие различным сериям, прекрасно удовлетворяют условию параллельности. Это обстоятельство указывает на хорошую точность, с какой испытуемые дихроматы делали установки на равенство, а также лишний раз подтверждает соблюдение принципа аддитивности для дихроматов. Точки исходных цветов (отмеченные кружком), координаты которых определялись нормальным трихроматом, уклоняются от прямых, проведенных по остальным точкам той же серии, не более, чем другие точки. Это показывает, что для испытанных дихроматов установки нормального трихромата приемлемы в пределах погрешности.

Для каждого из испытуемых были определены отношения:  $\Delta \bar{k} : \Delta \bar{z} : \Delta \bar{c}$ , для протанопов: для Ю.А.Д. по 27 прямым, для А.С.Б. по 11 прямым, для В.О.К. по 10 прямым и для Т.П.К. по 4 прямым; для дейтеранопов: для И.С.О. по 8 прямым, для А.В.К. по 7 прямым и для С.Е.Г. по 8 прямым. Согласованность результатов для каждого испытуемого в отдельности и для различных испытуемых одного и того же типа дихромазии достаточно хорошая, чтобы считать эти данные вполне пригодными для определенных выводов.

10. Наибольший интерес представляют данные, полученные с дейтеранопами, поскольку направление соответствующего “вектора невидимого дихроматом цвета” (положение точки схода  $G$  в цветовом треугольнике) до сего времени не могло считаться установленным с достаточной определенностью. Нам представляется, что в наших опытах это удалось достигнуть.

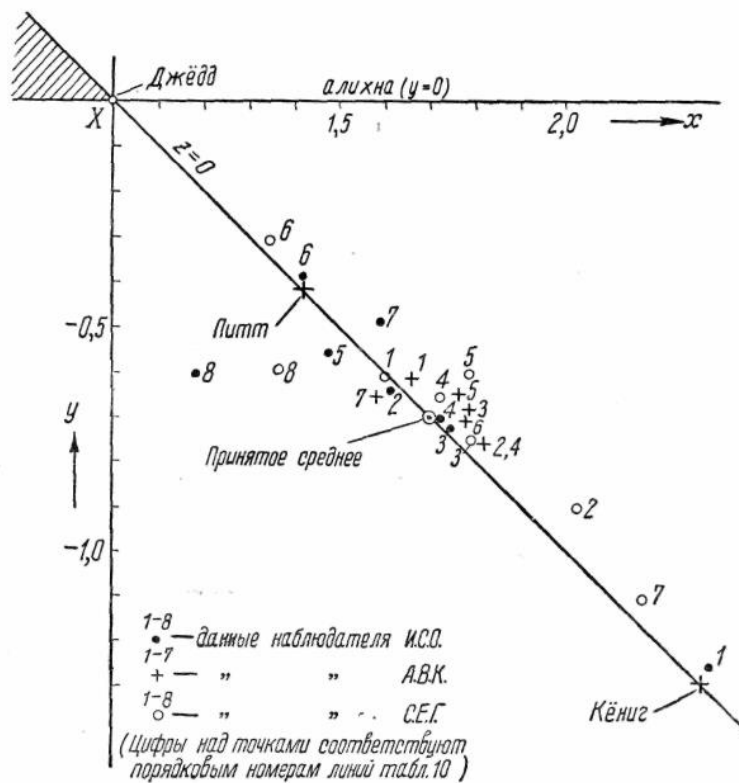
## Дейтераноны

И.С.О. (колориметр Дональдсона)								
	$\frac{\Delta \bar{z}}{\Delta \bar{k}}$	$\frac{\Delta \bar{c}}{\Delta \bar{k}}$	$\Delta \bar{x}_g$	$\Delta \bar{y}_g$	$\Delta \bar{z}_g$	$x_g$	$y_g$	$z_g$
1	-1,077	-0,051	-0,538	0,292	+0,014	2,320	-1,26	-0,06
2	-0,942	-0,033	-0,638	0,254	-0,012	1,612	-0,642	+0,03
3	-0,970	-0,039	-0,616	0,262	-0,003	1,742	-0,734	-0,008
4	-0,961	-0,037	-0,623	0,260	-0,006	1,721	-0,705	-0,016
5	-0,939	-0,068	-0,654	0,247	+0,038	1,475	-0,555	+0,080
6	-0,836	-0,029	-0,747	0,213	-0,018	1,419	-0,386	-0,033
7	-0,905	+0,029	-0,654	0,249	-0,100	1,692	-0,493	-0,199
8	-0,912	-0,146	-0,690	0,212	+0,141	1,183	-0,603	-0,420

А.В.К. (колориметр Дональдсона)								
1	-0,934	-0,028	-0,644	0,252	-0,019	1,660	-0,614	-0,046
2	-0,992	-0,027	-0,597	0,267	-0,020	1,820	-0,763	-0,057
3	-1,037	-0,011	-0,657	0,285	-0,043	1,788	-0,687	-0,101
4	-0,986	-0,027	-0,597	0,267	-0,020	1,820	-0,763	-0,057
5	-1,024	-0,006	-0,664	0,282	-0,050	1,767	-0,652	-0,115
6	-0,972	-0,022	-0,612	0,264	-0,028	1,777	-0,702	-0,075
7	-0,933	-0,262	-0,653	0,248	+0,029	1,584	-0,660	+0,076

С.Е.Г. (колориметр Дональдсона)								
1	-0,926	-0,043	-0,656	0,247	+0,002	1,602	-0,607	+0,005
2	-1,030	-0,013	-0,561	0,285	-0,040	2,028	-0,902	-0,126
3	-0,982	-0,032	-0,606	0,266	-0,013	1,791	-0,754	-0,037
4	-0,953	-0,024	-0,628	0,258	-0,025	1,717	-0,654	-0,063
5	-0,957	+0,012	-0,617	0,263	-0,076	1,788	-0,611	-0,177
6	-0,785	-0,021	-0,800	0,192	-0,029	1,348	-0,302	-0,046
7	-1,069	-0,032	-0,539	0,281	-0,013	2,170	-1,110	-0,060
8	-0,862	+0,018	-0,706	0,228	+0,085	1,367	-0,584	+0,217

В табл. 10 приведены результаты вычисления направления “вектора невидимого дихроматом цвета” и положения точки в цветовом треугольнике по приведенным выше первичным экспериментальным данным. Каждая серия дает независимое определение искомого направления; эти значения приведены в таблицах. В первом столбце даны номера серий, соответствующие номерам исходных цветов, указанным в табл. 7—9. Во втором и третьем столбцах даны отношения  $\Delta \bar{z} : \Delta \bar{k}$  и  $\Delta \bar{c} : \Delta \bar{k}$ , найденные графическим путем. Для этой цели на графиках, представляющих собой проекции цветового пространства на координатные плоскости  $kz$  и  $zc$ , по точкам, соответствующим отсчетам одной серии, проведены прямые и затем для каждой прямой определен ее тангенс угла наклона, дающий отношения, помещенные в таблицах. Эти отношения определяют искомое направление в системе основных цветов прибора. Для перехода к международной системе мы полагали  $\Delta \bar{z} = 1$  и, определив соответствующие  $\Delta \bar{k}$  и  $\Delta \bar{c}$ , по формулам (6) градуировки колориметра рассчитывали соответствующие координаты по международной системе, приведенные в четвертом, пятом и шестом столбцах табл. 10, а также относительные координаты в треугольнике  $XYZ$ , приведенные в седьмом, восьмом и девятом столбцах.



Фиг. 8.

Этим путем мы получили 24 независимых друг от друга определения положения точки  $G$  в треугольнике  $XYZ$ , сделанные на основании опытов с тремя различными дейтеранопами. Эти результаты представлены графически на фиг. 8. Фигура представляет собой часть плоскости треугольника  $XYZ$ , лежащую за его вершиной  $X$ , захватывая продолжение гипотенузы треугольника  $z = 0$  в пределах значений координат  $1,0 < x < 2,5$ ;  $0 > y > -1,5$ . Сам треугольник поэтому на фигуре не поместился, за исключением части его, примыкающей к вершине  $X$  (на фигуре заштрихована). На фиг. 8 показаны результаты отдельных определений положения точки  $G$  в наших опытах и положение той же точки по данным Кёнига и Питта. Последняя была рассчитана по формулам перехода от координат треугольника, использованного Питтом, к международным, считая, что в треугольнике Питта прямые параллельны, т. е. точка  $G$  лежит в бесконечности. Это дает для координат точки  $G$  значения  $x_g = 1,42$ ;  $y_g = -0,42$ . (Совершенно непонятно, как мог у Джёдда [2] получиться другой результат для того же расчета). Естественно, что эксперименты дали известный разброс, который, однако, нельзя считать большим. Этот разброс различен для различных наблюдателей, что отражает различную точность, с какой они делали колориметрические установки. Наилучшие результаты дал наблюдатель А.В.К., точки которого лежат особенно тесно, что же касается двух других, то, хотя для них разброс точек больше, они все ложатся вокруг примерно того же самого среднего значения. Кроме того, и для них большинство точек ложится в той же области, где лежат точки наблюдателя А.В.К.

Это позволяет сделать следующие выводы: положение точки для испытанных трех дейтеранопов можно считать совпадающим. Индивидуальные различия между ними сводятся только к различной точности, с какой они уравнивают цвета. Поэтому мы можем считать, что точка  $G$  с большой степенью достоверности должна лежать где-то в пределах отсчетов наблюдателя А. В. К.

11. Вычисление среднего положения точки  $G$  как среднего арифметического, строго говоря, лишено смысла, так как отдельные определения не являются равноценными. В частности, разности двух отсчетов, определяющие направления прямых, имеют разную точность; она тем меньше, чем больше величина отсчетов, разность которых берется.



Этим объясняется то обстоятельство, что точки в верхних частях (см., например, фиг. 4, 7) обнаруживают иногда больший разброс, чем в нижних частях. Кроме того, разные прямые проведены по различному числу точек. Наконец, ввиду проективного характера геометрии цветового треугольника среднее арифметическое зависит от того, какой взят треугольник. Для статистической обработки подобных данных следовало бы выражать отклонения от среднего в порогах различения. Впрочем, в данном случае большинство определений дает столь близкие результаты, что различные способы вычисления среднего не могут дать значительных расхождений. Поэтому мы не можем значительно уклониться от истины, если примем для точки  $G$  координаты:

$$\begin{aligned} x_g &= 1,70; \quad y_g = -0,70, \text{ а следовательно,} \\ z_g &= 1 - x_g - y_g = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Последнее требует некоторых пояснений. Большинство отсчетов дает для  $z_g$  хотя и небольшие, но все же отрицательные значения. Однако все отклонения  $z_g$  от нуля лежат, видимо, в пределах ошибки опыта. Между тем, у нас имеются веские косвенные соображения в пользу того, что для точки  $G$ , как и для точки  $R$  (точка схода прямых для протанопов), координата  $z$  должна равняться нулю, как это принимается и всеми остальными исследователями. Действительно, если бы  $z \neq 0$ , было бы трудно объяснить дихроматический характер цветов длинноволновой части спектра. Поскольку сделанное допущение вполне согласуется с результатами наших экспериментов, мы его и принимаем.

Что касается координат  $x_g$  и  $y_g$ , то можно с большой уверенностью утверждать, что их значения во всяком случае не выходят за пределы:

$$1,6 < x_g < 1,8; \quad -0,6 > y_g > -0,7.$$

Из 24 независимых определений положения точки  $G$  подавляющее большинство укладывается в эти пределы.

Из других авторов, занимавшихся исследованием зрения дихроматов, в первую очередь следует отметить А. Кёнига [5], который на приборе Гельмгольца для смешения цветов с высокой для того времени колориметрической точностью определял кривые сложения дихроматов. Опыты показали, что эти кривые принадлежат к числу кривых сложения нормальных трихроматов. Это эквивалентно высказанному нами тезису о том, что дихроматы принимают нормальные равенства. Кроме того, сравнение двух кривых дихромата с тремя кривыми сложения трихромата позволило Кёнигу найти положение в треугольнике точек  $R$  и  $G$ . К сожалению, его данные не вполне сопоставимы с современными, и перевод их в значения, соответствующие современной международной системе, связан с известными затруднениями. Кроме того, в настоящее время указывают на недостатки его аппаратуры.

Следует, однако, заметить, что у Кёнига при определении кривых сложения используются *все три* координаты цвета, а не две, как у последующих исследователей, и это представляет, как мы уже показали, существенные преимущества. Этим объясняется, что хотя данные Кёнига трудно перевести в современную международную систему, они позволили ему определить положение точки  $G$  в его системе с гораздо большей определенностью, чем позднейшим исследователям, пользовавшимся только двумя координатами цвета.

В 1935 г. Питт [6] провел свои исследования на спектральном колориметре Райта. Он исследовал пять протанопов и семь дейтеранопов, заставляя их уравнивать цвета монохроматических излучений со смесью монохроматических красного и синего. Через каждую пару соответствующих точек цветового треугольника он проводил прямую и искал их общую точку пересечения. Эти пары точек были взяты через один порог, что позволяет в известной мере оценить точность, с которой определяются направления указанных прямых.

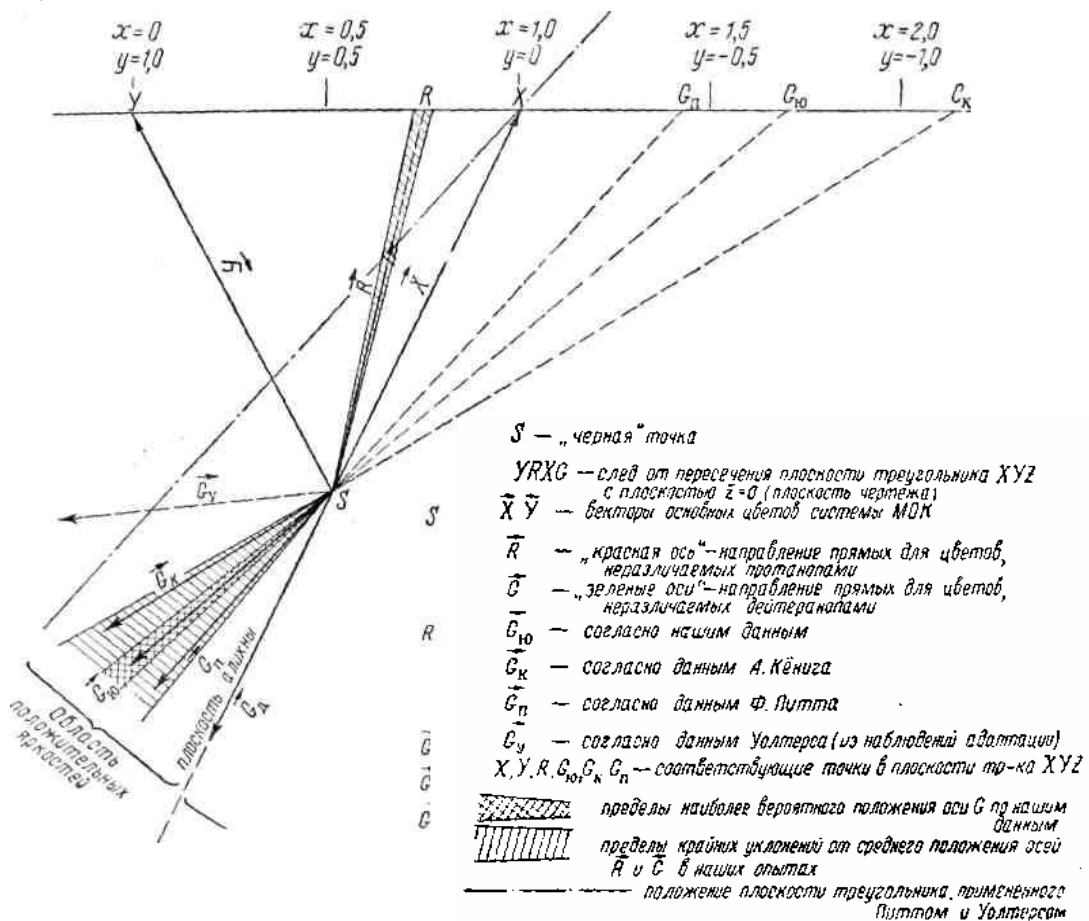
Данные Питта были подвергнуты анализу Джеддом [2], который строил на них свои выводы. Мы уже приводили выше на фиг. 2, взятой из статьи Джедда, результаты опытов Питта для дейтеранопов и критически рассмотрели их. Сопоставляя эти данные с нашими, мы видим, что они не противоречат друг другу «в пределах точности опыта», а точнее - в пределах точности, с которой данные Питта позволяют определить точку пересечения

прямых в треугольнике при использовании только двух цветовых координат. Однако предложение Джэда поместить точку  $G$  на алихне, более или менее удовлетворяющее данным Питта в пределах их точности\*, как можно видеть на фиг. 8, лежит далеко за пределами точности наших опытов. Точка, помещенная на алихне, уклоняется от указываемой нами примерно в два раза больше, чем самые крайние отклонения в наших опытах. Не трудно убедиться также с помощью описанного выше поверочного опыта, что ни один дейтераноп не примет равенства, рассчитанного, исходя из того положения точки  $G$ , которое указывает Джэдд.

Существенно отметить, что Джэдд, «исправляя» экспериментальные данные Питта, хотя и делает эти исправления «в пределах порога», всюду систематически отклоняется от данных Питта в одну сторону, как это можно видеть на фиг. 2. Если же провести прямые по данным Питта без такого их «исправления», то результаты, как указывалось, гораздо более близки к нашим, чем предложение Джэда.

Трудно не выразить досады, что привычка характеризовать цвет двумя числами вместо трех, несмотря на всем известную трехмерность цветового многообразия, привела к тому, что Питт в своей статье не находит нужным хотя бы упомянуть, при каких соотношениях яркостей испытанные им дихроматы уравнивали цвета. Эти данные, которые не

Фиг. 9. Расположение векторов в плоскости  $z=0$ .



\* Необходимо всё же заметить, что прямые, проводимые Джэдом, особенно в синей части спектра на графике, уклоняются от данных Питта больше, чем позволяют ошибки опыта, указываемые самим Питтом. Питт считает, что ошибки должны лежать в пределах полосы, ограниченной двумя соседними прямыми (см. фиг. 2).

могут не содержаться в первичных протоколах испытаний, могли бы позволить путем использования всех трех координат цвета значительно уточнить выводы, которые, мы не сомневаемся в том, оказались бы еще более близкими к нашим.

На фиг. 8 приведено, кроме наших данных, положение точки  $G$  по данным Питта и А. Кёнига. Кроме того, мы приводим еще фиг. 9, более наглядно показывающую положение в цветовом пространстве осей  $R$  и  $G$  согласно данным различных авторов.

Все авторы согласно приходят к выводу, что точки  $R$  и  $G$  лежат в треугольнике на его гипотенузе  $z = 0$ . Это означает, что в цветовом пространстве основные оси  $R$  и  $G$  должны лежать в плоскости, проходящей через оси  $x$ ,  $y$ . На фигуре изображена эта плоскость с положением в ней векторов  $G$  по данным различных авторов. (Для вектора  $R$  они для всех авторов настолько близки, что он показан только однажды). Здесь показан также след пересечения плоскости чертежа  $z = 0$  с плоскостью треугольника  $XYZ$ , причем можно видеть, что положительные направления векторов  $G$  ни у одного из авторов не пересекаются с плоскостью треугольника  $XYZ$ , а пересекаются с ней только продолжения этих векторов в обратную сторону. Значение этого обстоятельства будет разъяснено далее. На фигуре показано также положение плоскости того треугольника, которым пользовались Питт и Уолтерс (см. ниже).

Из этого чертежа видно, что наш результат лежит между данными Кёнига и Питта, причем эти данные оказались в пределах крайних отклонений, отмеченных нами. Положение оси  $G$ , предложенное Джёддом, прямо противоположное направлению оси  $x$ , как можно видеть, расходится со всеми экспериментальными данными весьма заметно.

12. Некоторых объяснений требует то обстоятельство, что точка  $G$  оказалась расположенной в треугольнике (см. фиг. 8) ниже алихны, т. е. в области отрицательных яркостей. Несомненно, когда Джёдд, вопреки данным Питта, которые при всей их неточности всё же с полной определенностью указывают на положение точки схода ниже алихны, переместил ее на алихну, то он поступал так, считая неправдоподобным ее положение в области отрицательных яркостей. Подобные сомнения нам пришлось встретить и у других лиц.

Эти сомнения основаны на том, что цвета, расположенные ниже алихны, должны, казалось бы, обладать отрицательной яркостью, что представляется неправдоподобным для «основного физиологического зеленого», какой по предположению соответствует точке  $G$ . Сомнения связаны, выражаясь геометрически, с тем, что, если взять в качестве основных цветов трехцветной системы те, которые соответствуют направлениям неразличимых цветов дихроматов, то представляется невероятным, чтобы в этой системе так называемые яркостные коэффициенты были бы отрицательны по какой-либо из осей. Это и означает то, что скрывается за словами: «невероятно, чтобы основные физиологические цвета имели отрицательную яркость».

Не затрагивая вопроса о том, действительно ли это является невероятным, рассмотрим, в каких случаях эта яркость на самом деле оказалась бы отрицательной и, в частности, действительно ли положение точки схода  $G$  ниже алихны всегда означает то, что этому приписывается.

В нашем предварительном сообщении [7] мы уже указывали, что это далеко не так. Повторим вкратце эти рассуждения с некоторыми дополнениями. Цветовой треугольник есть центральная проекция цветового пространства на произвольно расположенную в нем плоскость. Каждый вектор, проведенный из начала координат, служащего центром проекции, изображается, как известно, точкой пересечения этого вектора или его продолжения с плоскостью треугольника. Однако, как легко видеть, при произвольном положении вектора, с одной стороны, и плоскости треугольника, с другой, может случиться, что вектор, даже не параллельный плоскости проекции, не пересечет ее при продолжении вектора в *положительном* его направлении (см. фиг. 9). Тогда, если вектор не параллелен плоскости, продолжение его в обратную сторону пересечется с ней. Эта точка пересечения и будет изображением вектора в плоскости треугольника. Иначе говоря, каждая точка треугольника изображает, собственно, векторы двух прямо противоположных направлений.

В цветовом пространстве алихна представляет собой плоскость, проходящую через начало координат так, что все реальные цвета оказываются лежащими по одну ее сторону. Цветовым векторам, лежащим в пространстве по одну сторону плоскости алихны, будет соответствовать положительная яркость, а лежащим по другую сторону — отрицательная.

Из двух взаимно противоположных векторов, если один лежит в области положительных яркостей, другой, очевидно, будет лежать в области отрицательных яркостей. В цветовом треугольнике оба изобразятся той же самой точкой. Однако третья координата цвета в треугольнике  $q$ , о котором мы неоднократно говорили, будет для них различна, и если для вектора, соответствующего положительной яркости, она положительна, то для прямо противоположного она будет отрицательна, или наоборот (это зависит от того, как расположена плоскость проекций). Поэтому для решения вопроса, будет ли яркостная характеристика какого-либо цвета (речь, конечно, может идти практически только о так называемых «нереальных» цветах), положительна или отрицательна, недостаточно знать только положение соответствующей точки в треугольнике, но необходимо знать и третью координату треугольника, точнее — знак этой третьей координаты.

При этих условиях правило будет таково: если третья координата положительна, то положение соответствующей точки в треугольнике выше алихны означает, что яркость положительна, положение же ниже алихны, — что она отрицательна. Если же третья координата отрицательна, то, наоборот, положение точки ниже алихны указывает на положительную яркостную характеристику, а положение выше алихны — на отрицательную. Для всех реальных цветов во всех практически применяемых треугольниках третья координата (сумма абсолютных координат) всегда положительна, а поэтому для них справедлив первый случай, и все реальные цвета лежат по одну сторону алихны (при обычном расположении треугольника — выше алихны).

С чисто экспериментальной точки зрения, точка  $G$  в цветовом треугольнике изображает пространственное направление параллельных прямых, на которых лежат цвета, неразличимые дейтеранопами. В какую сторону считать направление этих прямых положительным и в какую отрицательным, пока мы находимся на почве чистого эксперимента, — дело условное. Но если мы, исходя из определенных физиологических представлений, хотим приписать вектору, проведенному из начала координат, значение некоторого гипотетического «основного цвета», из которого вместе с двумя другими «основными» слагаются все реальные цвета, то мы должны выбрать какое-то одно направление из двух взаимно противоположных. Очевидно, что его надо выбрать так, чтобы реальные цвета получились при сложении основных, взятых в положительных количествах. При таком выборе вектора, соответствующего «основному зеленому», нетрудно убедиться, что его положительное направление не пересекается с плоскостью стандартного треугольника  $XYZ$ , а положение точки  $G$  в стандартном треугольнике является следом от пересечения плоскости треугольника продолжением вектора, соответствующего «основному зеленому», в *обратную сторону*.

Это следует из того, что реальные цвета дихроматического участка спектра лежат в треугольнике  $XYZ$  не между точками  $R$  и  $G$ , а так, что точка  $R$  лежит между точками дихроматического участка и точкой  $G$ . При определении суммы цветов в треугольнике по принципу сложения параллельно направленных сил для получения реальных цветов из «основных»  $R$  и  $G$  необходимо приложить в этих точках силы *противоположного* направления, а так как направление результирующей силы (реальные цвета) должно считаться положительным, то отсюда немедленно приходим к выводу, что сила, приложенная в точке  $G$ , должна быть отрицательной.

Таким образом, мы приходим к выводу, что если предполагаемые «основные» цвета должны быть таковы, чтобы путем их сложения получались реальные цвета, то «основной зеленый» изображается в плоскости треугольника  $XYZ$  точкой  $G$  с приписанным ей *отрицательным* «весом». Это означает, что в цветовом пространстве вектор, соответствующий «основному зеленому», не пересекает плоскости треугольника  $XYZ$ , а пересекается с ней только его продолжение в обратную сторону.

В силу сказанного мы приходим к выводу, что для того, чтобы яркостный коэффици-

ент для «основного зеленого» был положителен, для вектора обратного направления он должен быть отрицательным, а соответствующая точка должна лежать в стандартном треугольнике *ниже* алихны, что и согласуется с опытом.

Лица, недоумевающие по поводу положения точки *G* ниже алихны, видимо не пробовали рассчитать яркостный коэффициент, соответствующий этому ее положению. Иначе они убедились бы, что он положителен, и наоборот – был бы отрицательным, если бы точка *G* лежала между алихной и точкой *R*. Желаящие могут убедиться в этом, проведя такой расчет.

В табл. 10 мы, давая абсолютные координаты вектора-разности для цветов, неразличимых дихроматами, могли бы выбрать его положительное направление произвольно, но мы его взяли умышленно в направлении «основного зеленого», компоненты которого фигурируют в четвертом, пятом и шестом столбцах этих таблиц. В них мы видим, что компонента  $y_g$ , определяющая яркость, всё время положительна, однако сумма абсолютных координат по международной системе, определяющая третью координату («вес») в треугольнике, отрицательна, а потому координата  $y_g$  в треугольнике будет отрицательна

$$y_g = \frac{\bar{y}_g}{\bar{x}_g + \bar{y}_g + \bar{z}_g}.$$

Если бы мы взяли вектор противоположного направления, то третья координата для «основного зеленого» была бы положительна и суммирование его с «основным красным» не могло бы давать реальных цветов, а только точки, лежащие в плоскости треугольника между точками *R* и *G*.

Изложенный здесь экспериментальный материал 1948 г. был впоследствии пополнен путем экспериментов, аналогичных описанным и проведенных в 1949 г. [8] еще для девяти дейтеранопов. В табл. 11 приведены найденные по данным этих испытуемых координаты точки *G*.

Т а б л и ц а 11

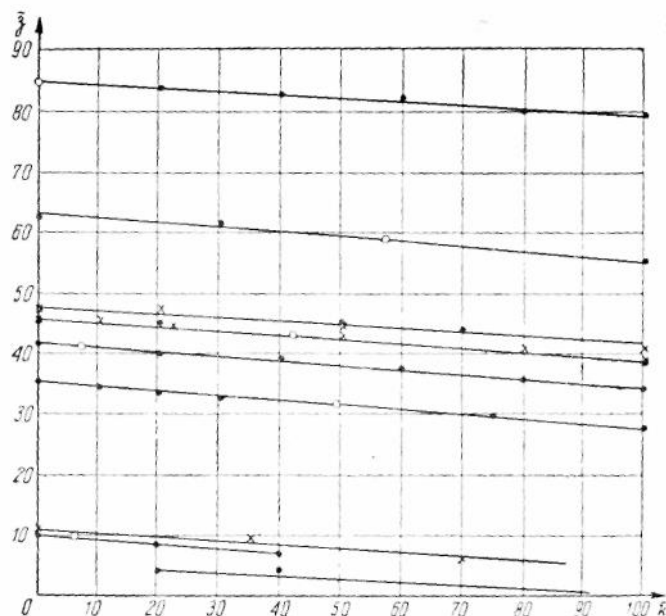
**Результаты определения направления оси *G***

1948 г.	1949 г.								
Среднее из трех наблюдений	инициалы наблюдателей								
	С.И.Ш	И.М.И	Б.Н.С	Е.М.Л	Ю.А.М	П.П.Т	Б.А.Т	Л.Н.Т	Е.А.Е
1,70	1,72	1,43	1,85	1,12	1,64	1,38	1,92	1,82	1,78
-0,70	- 0,73	- 0,45	- 0,81	- 0,17	-0,73	- 0,37	- 0,76	-0,74	- 0,66

Для большинства из них данные хорошо согласуются с данными 1948 г. Однако для одного из них (наблюдатель Е.М.Л.) результаты  $x_g = 1,12$  и  $y_g = - 0,17$  оказались заметно отличающимися от остальных, а для другого (наблюдатель П.П.Т.) — на границе разброса точек, полученных для трех дейтеранопов 1948 г.:  $x_g = 1,38$ ;  $y_g = 0,38$ . Следует заметить, что эти числа выведены из большого числа отдельных прямых, каждая из которых проведена по нескольким точкам. Для примера на фиг. 10 приводим проекции прямых неразличимых цветов на плоскость  $\bar{k}\bar{z}$  для наблюдателя Е.М.Л.

Из этой фигуры видно, что параллельность прямых для этого наблюдателя соблюдается хорошо, так что расхождения с данными других наблюдателей едва ли могут быть отнесены за счет ошибок эксперимента, а отражают действительные отличия зрения данного наблюдателя от зрения большинства дейтеранопов. Это обстоятельство, несмотря на то, что такой случай встретился только однажды, имеет большое принципиальное значение, так как представляет собой существенно новый факт. До сих пор из литературы известен был только один тип дейтеранопии, так что цвета, неразличимые различными дейтеранопами, были теми же самыми в пределах ошибок опыта. Указанный случай не укладывается в эти общие представления. К сожалению, пока что трудно сказать, почему данные дейтераномала Е.М.Л. отклоняются от остальных, а потому на основании этого одного случая нельзя делать никаких выводов. Однако этот случай должен быть отмечен,

как особый, достойный специального внимания.



Фиг. 10. Линии цветов, неразличимых зеленослепым Е.М.Л. (проекция на плоскость  $\bar{k}\bar{z}$ ).

13. Вопреки установившейся традиции, мы начали изложение рассмотрением результатов, полученных с дейтеранопами, так как именно в них содержатся наиболее важные новые данные, полученные нами. Что касается определения положения точки  $R$ , то, так как она лежит гораздо ближе к области реальных цветов, это положение определяется гораздо легче. По-видимому, впервые определил его Максвелл, который в цитированной выше работе указывает: «...Вероятно это цвет, к которому стремится крайний красный спектра и который отличается от крайнего спектрального красного только отсутствием маленькой доли «желтого», который делает крайний красный видимым для дихромата...»

Сравнительная легкость определения положения точки  $R$  привела к тому, что расхождения разных авторов по этому поводу невелики. В частности, даже использование только двух координат цвета в треугольнике позволило определить положение точки  $R$  довольно точно. Наши результаты, основанные на использовании всех трех координат, дают несколько меньший разброс точек, но среднее значение мало отличается от указываемого другими авторами.

В табл. 3—6 для протанопов, аналогичных табл. 7—9 для дейтеранопов, приведены наши первичные экспериментальные данные (средние из пяти установок) для четырех дихроматов. На фиг. 5—7 приведено несколько проекций цветового пространства на координатные плоскости основных цветов прибора. При этом надо иметь в виду, что для протанопы Ю.А.Д. плоскость проекций несколько иная, так как опыты с ним проводились, как уже указывалось, на другом колориметре (системы Дёмкиной) с другими основными цветами. Поэтому и угол наклона прямых несколько иной, чем для других протанопов. При пересчете на международную систему, как это можно видеть по табл. 12, существенных расхождений между различными протанопами не обнаруживается.

Особый интерес представляют данные протанопы Ю.А.Д., прямой, исследованного наиболее подробно и делавшего установки, по-видимому, с наибольшей точностью. Для него были определены направления 27 прямых в различных областях цветового пространства. Из них 15 прямых было определено по четырем и более точкам, а остальные 12 (от № 16 по № 27) — по двум точкам.

Как показывают данные табл. 12 и фиг. 7, результаты опыта обнаруживают поразительную согласованность. На фигуре видно, как хорошо ложатся точки одной серии на прямые и насколько точно соблюдается параллельность отдельных прямых. Только для одной из прямых, к тому же определенной только по двум точкам (прямая № 19), угол наклона немного отличается от остальных. Несколько отклоняются от параллельности

также прямые № 15 и № 21, что объясняется тем, что для них  $\Delta \bar{z}$  определяется как разность двух больших величин, а это ведет к меньшей точности в определении разности. Впрочем, и эти отклонения в смысле определения положения точки  $R$  также невелики, что можно видеть из табл. 12 (третий и четвертый столбцы).

Так же, как и в случае дейтеранопов, общетеоретические соображения говорят в пользу того, что точка  $R$  должна лежать на прямой  $z = 0$ . Правда, эти соображения связываются с определенными представлениями о физиологическом механизме, в какой-то мере гипотетическими, что не мешает им быть достаточно вескими. Поэтому они обычно, даже без особых оговорок, принимаются всеми авторами. Наши опыты этому не противоречат.

Действительно, из последних уравнений (6) градуировки обоих колориметров легко видеть, что  $\Delta \bar{c}_r$  при  $z_r = 0$  должно быть значительно меньше  $\Delta \bar{z}_r$ , а так как само  $\Delta \bar{z}$  в случае протанопов значительно меньше  $\Delta \bar{k}$ , то  $\Delta \bar{c}$  для протанопов следует ожидать исчезающе малым по сравнению с  $\Delta \bar{k}$ . Поэтому прямые, на которых в пространстве лежат цвета, неразличимые протанопом, должны в проекции на плоскость  $кз$  давать прямые, параллельные оси  $к$ .

Если мы обратимся к нашим экспериментам, результаты которых даны в табл. 3—6, то увидим, что отношение  $\frac{\Delta \bar{c}}{\Delta \bar{k}}$  (отношение разности двух отсчетов четвертого столбца к разности соответствующих отсчетов второго столбца) почти всегда есть величина малая и притом имеющая в разных случаях различный знак. Правда, разброс точек здесь значительно больше, чем при определении отношения  $\frac{\Delta \bar{z}}{\Delta \bar{k}}$ , всё же малые значения величины  $\Delta \bar{c}$  и по большей части нерегулярная смена ее знака, наряду с упомянутыми выше общетеоретическими соображениями, позволяет считать  $\Delta \bar{c}$  практически равным нулю, а отклонения от этого относить за счет ошибок опыта. Поэтому во всех случаях мы положили  $\bar{z}_r = 0$  и из опыта по каждой из пространственных прямых (или по их проекциям на плоскость  $кз$ ) определяли только  $x_r$  и  $y_r = 1 - x_r$ .

Как видно из табл. 12, разброс для каждого из протанопов очень невелик. Для различных испытуемых имеется некоторое расхождение в средних значениях, но и оно не достигает единицы второго знака, причем отсчеты всех четырех наблюдателей перекрываются. В результате, в качестве пределов для возможного положения точки  $R$  мы находим возможным указать:

$$0,760 > x_r > 0,745; \quad 0,255 > y_r > 0,240.$$

В качестве средних значений координат  $x_r$  и  $y_r$  можно округленно считать:

$$x_r = 0,750; \quad y_r = 0,250.$$

Эти результаты хорошо согласуются с данными других авторов, причем расхождения в третьем знаке, который мы в конечной формуле сознательно округлили, едва ли можно считать реальными.

В опытах 1949 г. [8] были испытаны еще шесть протанопов по методике, тождественной описанной. Полученные для них данные по определению точки  $R$  приведены в табл. 13. Как можно видеть, они хорошо согласуются с остальными — как полученными нами в 1948 г., так и с данными других авторов.

## Данные испытаний протанопов

Наблюдатель Ю.А.Д.  
(колориметр Дёмкиной)

№	$\frac{\Delta\bar{x}}{\Delta k}$	$x_r$	$y_r$
1	0,07	0,753	0,247
2	5	0,762	0,238
3	0,10	0,759	0,241
4	0	0,755	0,245
5	0,09	0,760	0,240
6	0	0,759	0,241
7	0,08	0,757	0,243
8	0	0,759	0,241
9	0,09	0,760	0,240
10	3	0,755	0,245
11	0,09	0,751	0,249
12	0	0,761	0,239
13	0,08	0,752	0,248
14	6	0,759	0,241
15	0,09	0,749	0,251
16	0	0,760	0,240
17	0,09	0,759	0,241
18	3	0,762	0,238
19	0,08	0,743	0,257
20	3	0,760	0,240
21	0,07	0,746	0,254
22	0	0,757	0,243
23	0,09	0,758	0,242
24	6	0,760	0,240
25	0,07	0,764	0,236
26	3	0,758	0,242
27	0,09	0,759	0,241

Наблюдатель А.С.Б.  
(колориметр Дональдсона)

№	$\frac{\Delta\bar{x}}{\Delta k}$	$x_r$	$y_r$
1	0,079	0,751	0,24
2	0,074	0,749	0,25
3	0,053	0,741	0,25
4	0,070	0,747	0,25
5	0,081	0,751	0,24
6	0,081	0,751	0,24
7	0,062	0,744	0,25
8	0,071	0,748	0,25
9	0,112	0,762	0,23
10	0,064	0,745	0,25
11	0,071	0,747	0,25

Наблюдатель В.О.К.  
(колориметр Дональдсона)

1	0,090	0,750	0,245
2	0,080	0,751	0,249
3	0,050	0,740	0,260
4	0,075	0,749	0,251
5	0,030	0,732	0,268
6	0,075	0,749	0,251
7	0,045	0,738	0,262
8	0,050	0,740	0,260
9	0,075	0,749	0,251
10	0,060	0,744	0,256

Наблюдатель Т.П.К.  
(колориметр Дональдсона)

1	0,085	0,753	0,247
2	0,040	0,736	0,264
3	0,075	0,749	0,251
4	0,075	0,749	0,251

## Средние данные

Наблюдатель	$x_r$	$y_r$
Ю.А.Д.	0,757	0,243
А.С.Б.	0,749	0,251
Т.П.К.	0,747	0,253
В.О.К.	0,745	0,255
Общее «среднее»	0,752	0,248

Принятые значения:

$$x_r = 0,750$$

$$y_r = 0,250$$



Результаты определения направления оси  $R$ 

1948 г.				1949 г.					
Инициалы наблюдателей									
Ю.А.Д.	А.С.Б.	В.О.К.	Т.П.К.	Ю.М.П.	И.Ш.Т.	А.М.С.	В.С.С.	В.А.У.	Б.В.Л.
0,757	0,749	0,745	0,747	0,749	0,745	0,741	0,744	0,753	0,737
0,243	0,251	0,255	0,253	0,252	0,251	0,250	0,243	0,249	0,253

14. Изложенным исчерпываются, в основном, чисто экспериментальные результаты проведенной работы, которые, как мы постарались показать, являются наиболее точными из полученных до сего времени, особенно в том, что касается зрения дейтеранопов.

Общие выводы, всё еще свободные от каких-либо гипотез физиологического характера, могут быть сделаны следующие:

а) Для всех испытанных дихроматов подтвердилось безупречное соблюдение принципа аддитивности цветов, что подтверждает данные других авторов, по которым принцип аддитивности соблюдается для дихроматов так же, как и для нормальных трихроматов.

б) Для испытанных дихроматов подтвердилось принятие ими равенств нормальных трихроматов. Этот результат нельзя, однако, в полной мере обобщить на всех дихроматов вообще, поскольку испытуемые в этом отношении специально подбирались. Однако мы, по-видимому, вправе утверждать, что случай дихромазии с принятием нормальных равенств является достаточно частым и, вероятно, типическим. В этом, впрочем, мы только присоединяемся к общепринятой точке зрения.

в) Данные различных дихроматов одного и того же типа дихромазии обнаруживают поразительное согласие между собой, в то время как дихроматы различных типов резко различаются друг от друга. Данные большинства испытанных нами дихроматов хорошо согласуются с общеизвестным фактом, что два случая дихромазии — протанопы и дейтеранопы, резко обособлены, причем никаких *дихроматов промежуточных типов не существует*, т. е. не существует лиц с *двухмерным* многообразием цветов, для которых направления неразличимых цветов занимают какое-то промежуточное положение между теми, каки ехарактерны для протанопов и для дейтеранопов.

Однако для одного из дихроматов — дейтераноба Е.М.Л. — обнаружилось, хотя и небольшое, но вполне отчетливое отклонение от этого правила. Он, правда, совершенно очевидно принадлежит к группе дейтеранопов, и его нельзя считать дихроматом особого типа, однако его зрение всё же несколько иное, чем у остальных дейтеранопов. Возможно, что отличие зрения дейтераноба Е.М.Л. от других дейтеранопов имеет сходное происхождение с отличиями нормальных и аномальных трихроматов.

Впрочем, для окончательного решения вопроса имеющихся данных недостаточно. Наши данные, отличающиеся от данных других авторов главным образом большей точностью, не противоречат им по существу. Это позволяет думать, что наблюденное нами согласие для различных дихроматов одного типа представляет собой общее явление. Этот вывод об отсутствии промежуточных форм дихромазии имеет существенное теоретическое значение для выяснения физиологического механизма цветного зрения и причин врожденной дихромазии.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИВЫХ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПРИЕМНИКОВ

15. Как подробно обосновано нами в работе [9], опыты по так называемому «сложению цветов», из которых выводятся известные законы Грассмана, с полной несомненностью показывают, что в сетчатке глаза в условиях так называемого «дневного зрения» имеются светочувствительные приемники трех и *только трех* различных типов с раз-

личными кривыми спектральной чувствительности. Эти кривые спектральной чувствительности обязательно должны принадлежать к числу кривых сложения соответствующего индивида и никакими другими быть не могут.

С другой стороны, в этой же работе еще раз проиллюстрировано классическое положение, что все опыты по сложению цветов совершенно в одинаковой степени согласуются с любым выбором кривых чувствительности из числа кривых сложения. Поэтому, на основании этих опытов, с одной стороны, мы можем с уверенностью сказать, что кривые спектральной чувствительности приемников должны принадлежать к числу кривых сложения, но, с другой стороны, эти опыты принципиально не могут дать ничего, что бы позволило дальше уточнить, каковы эти кривые чувствительности без добавочных гипотез. Только исходя из общих физических соображений, мы должны исключить из рассмотрения кривые, принимающие для некоторых длин волн отрицательные значения.

Те же самые выводы мы можем приложить и к дихроматам с той только разницей, что у дихроматов должны быть приемники только двух различных типов.

Для дихроматов, принимающих нормальные цветовые равенства, кривые сложения принадлежат к числу кривых сложения нормальных трихроматов. Так как все нормальные кривые сложения являются линейными комбинациями произвольно выбранных трех, то отсюда следует, что кривые чувствительности приемников дихроматов или вообще совпадают с кривыми чувствительности приемников нормального глаза, или являются их линейными комбинациями. Из общефизических соображений, аналогичных изложенным в уже цитированной работе [9], можно с большой уверенностью утверждать, что светочувствительные вещества сетчатки нормального и дихроматического глаза те же самые (иначе совершенно невозможно себе представить наблюдаемое очень точное соблюдение линейной зависимости).

Эти достаточно достоверные соображения приводят к мысли использовать особенности зрения дихроматов для дальнейшего уточнения кривых спектральной чувствительности приемников нормального глаза. Уточнение в данном случае надо понимать, *только* как выбор из бесчисленного множества нормальных кривых сложения тех трех, которые являются кривыми спектральной чувствительности нормального глаза.

Однако такое использование опытов с дихроматами неразрывно связано с определенными представлениями о причинах дихромазии, а эти представления неизбежно в какой-то степени гипотетичны. В сущности, в этом отношении имеются только две возможности — или кривые спектральной чувствительности приемников у дихроматов те же самые, либо они являются какими-то линейными комбинациями этих последних.

В первом случае дихромазия объясняется простым отсутствием — «выпадением» — у дихроматов одного из трех нормальных приемников (примеры такого выпадения известны и в других областях физиологии). Во втором случае, так как светочувствительные вещества сетчатки несомненно те же самые, приходится предположить какой-то механизм «слияния» двух приемников в один.

Обе эти теоретические возможности отмечены еще Гельмгольцем, хотя первоначальные исследователи дихромазии, как Максвелл, Кёниг, Гельмгольц, обычно описывают дихромазию в терминах теории «выпадения», указывая, впрочем, и вторую теоретическую возможность. В частности, Гельмгольц во втором издании своей «Физиологической оптики» в одном месте добавил замечание в пользу вероятности «слияния» приемников. Однако это замечание сделано в условной форме и не мотивировано. Точно также отсутствуют какие-либо уточнения того, каким мог бы быть этот механизм «слияния» при различных типах дихромазии.

В последние годы теория «слияния», снабженная определенной мотивировкой, была выдвинута вновь в гораздо более конкретизированной форме. Защитниками ее выступили Питт [11], Джэйд [2], Райт [3] и др. Она имеет такой вид.

Протанопия и тританопия объясняются и в этом случае согласно теории «выпадения» отсутствием одного из приемников, в то время как механизм дейтеранопии иной. У дейтеранопов, согласно этим взглядам, периферические приемники имеются всех трех родов, как и у нормального трихромата, но реакции двух из них возбуждают, складываясь вместе, один и тот же «центр», который, таким образом, реагирует на сумму возбуждений

двух самостоятельных периферических приемников.

Таким образом, согласно этой точке зрения происхождение дейтеранопии принципиально совершенно иное, чем двух других случаев дихромазии. Если последние представляются явлением периферическим как дефект сетчатки, то дейтеранопия — явление, вызванное нарушениями в более центральной области. Райт прямо говорит о «выпадении» в данном случае одного из «мозговых центров».

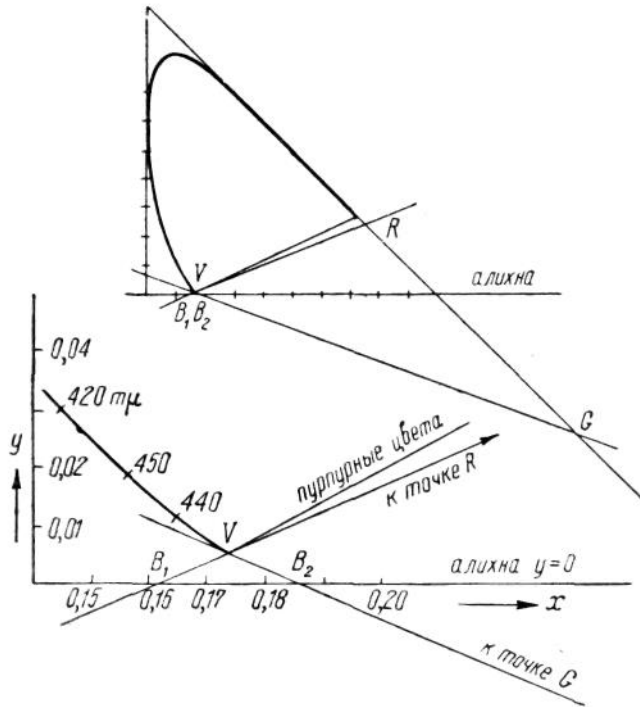
Аргументацию за и против такого усложнения теории мы разберем впоследствии. Независимо, однако, от этого мы можем истолковать результаты наших опытов как с той, так и с другой точки зрения.

16. Если принять, что три типа дихромазии имеют своей причиной отсутствие одного из трех нормальных приемников, то определение их спектральной чувствительности не представляет затруднения. Для этой цели достаточно взять трехцветную систему, основные цвета которой соответствуют в цветовом пространстве векторам, параллельным прямым неразличимых дихроматами цветов. Кривые сложения, соответствующие этой трехцветной системе «основных физиологических цветов», и будут искомыми кривыми спектральной чувствительности. Это будет единственная возможная система физических приемников, которые все три дают одинаковые реакции на свет тогда и только тогда, если цвета излучений одинаковы для нормальных трихроматов, а та или иная пара *тех же приемников* дает равенство реакций, когда излучения неразличимы для того или иного типа дихромазии. Никакие другие приемники такими свойствами не обладают.

Однако для нахождения соответствующих кривых сложения надо знать все три основных цвета трехцветной системы, мы же в наших опытах исследовали только два типа дихромазии. Впрочем, направление третьей оси, соответствующей направлению цветов, неразличимых тританопами, как будто не вызывает больших сомнений. Проводившиеся другими авторами исследования указывают положение соответствующей точки в непосредственной близости к точке, отвечающей крайнему сине-фиолетовому спектральному. Изложенные нами в предварительном сообщении [7] соображения общего характера вполне согласуются с этим и дают весьма узкие границы для возможного положения точки  $B$  в треугольнике.

Эти соображения следующие. Прямые, соединяющие попарно точки, соответствующие в цветовом треугольнике «основным физиологическим цветам», не должны пересекаться с линией расположения спектральных цветов, так как иначе кривые спектральной чувствительности приемников имели бы для некоторых длин волн отрицательные значения, что представляется совершенно неправдоподобным с физической точки зрения. С другой стороны, представляется очень мало правдоподобным, чтобы для какого-либо из основных цветов яркость могла бы быть отрицательной. Правда, нам совершенно неизвестен физиологический механизм, соответствующий ощущению яркости, однако представление об отрицательной яркости является столь парадоксальным, что для его введения нужны были бы очень веские экспериментальные основания, чего на самом деле нет.

Поскольку нам известны положения точек  $R$  и  $G$ , соединяя их с точкой  $V$  крайнего фиолетового спектрального прямыми линиями (фиг. 11), мы легко приходим к выводу, что точка  $B$  должна лежать ниже обеих этих прямых, чтобы кривые спектральной чувствительности были всюду положительны. В то же время, отказ от отрицательной яркости заставляет помещать эту точку выше алихны. В результате, возможное положение точки  $B$  ограничивается площадью, заключенной внутри малого треугольника  $B_1VB_2$  вблизи фиолетового конца спектра. Этот треугольник настолько мал, что на фиг. 11, кроме изображения в мелком масштабе всего цветового графика  $XYZ$  в целом, показывающего положение в нем прямых  $VR$ ,  $VG$  и алихны, внизу дано увеличенное в 20 раз изображение небольшого участка того же графика вблизи точки  $V$ . Положение точки  $B$  внутри треугольника  $B_1VB_2$  хорошо согласуется с данными исследования тританопов у других авторов (см., например, Питта [6]), а поэтому может быть принято.



Фиг. 11.

Координаты вершин этого треугольника определяются путем совместного решения попарно уравнений трех прямых: алихны

$$y = 0,$$

и двух прямых, проходящих каждая через две точки, из которых одна  $V$  соответствует крайнему фиолетовому спектральному с координатами  $x_V = 0,174$  и  $y_V = 0,005$ , а вторая — в одном случае точке  $R$ , а в другом — точке  $G$ ; таким образом, получаем уравнения:

$$\frac{x - x_V}{x_R - x_V} = \frac{y - y_V}{y_R - y_V} \text{ или } \frac{x - 0,174}{0,750 - 0,174} = \frac{y - 0,005}{0,250 - 0,005},$$

$$\frac{x - x_V}{x_G - x_V} = \frac{y - y_V}{y_G - y_V} \text{ или } \frac{x - 0,174}{1,70 - 0,174} = \frac{y - 0,005}{-0,70 - 0,005}.$$

Координаты вершин малого треугольника будут:

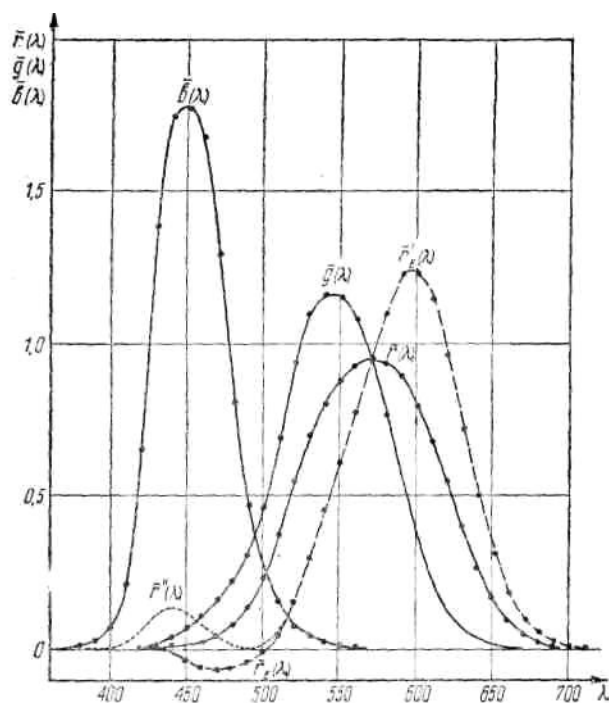
вершина  $V$ :  $x_V = 0,174$ ;  $y_V = 0,005$ ,

вершина  $B_1$ :  $x_1 = 0,163$ ;  $y_1 = 0$ ,

вершина  $B_2$ :  $x_2 = 0,185$ ;  $y_2 = 0$ .

Координаты точки  $B$  не выходят за эти пределы, и мы с достаточной точностью можем положить их равными

$$x_B = 0,17; y_B = 0.$$



Фиг. 12.

Кривые чувствительности приемников выразятся тогда через стандартные кривые сложения формулами:

$$\begin{aligned} \bar{r}(\lambda) &= 0,310\bar{x}(\lambda) + 0,754\bar{y}(\lambda) - 0,064\bar{z}(\lambda), \\ \bar{g}(\lambda) &= -0,453\bar{x}(\lambda) + 1,360\bar{y}(\lambda) + 0,093\bar{z}(\lambda), \\ \bar{b}(\lambda) &= \bar{z}(\lambda). \end{aligned} \quad (7')$$

Кривые чувствительности приемников глаза, рассчитанные по этим формулам, приведены в табл. 14 и на фиг. 12. Единицы для основных физиологических цветов выбраны так, чтобы:

$$R + G + B = X + Y + Z,$$

поэтому на фиг. 12 все три кривые описывают равные площади, что, конечно, является произвольным.

17. Результаты опытов с дихроматами могут быть истолкованы также и с точки зрения теории «слияния», причем и в этом случае можно рассчитать кривые спектральной чувствительности приемников нормального глаза. Мы приведем здесь этот расчет, не давая за недостатком места, однако, полностью его математического вывода. Впрочем, этот вывод не представляет принципиальных трудностей, если принять во внимание, что цвета, не различаемые дейтеранопами, согласно теории «слияния» являются теми, для которых сумма возбуждений красного и зеленого приемников одинакова. Требуется, следовательно, обычными методами аналитической геометрии только найти такую координатную систему цветового пространства  $\bar{r}', \bar{g}', \bar{b}'$ , чтобы вдоль оси  $G'$ , найденной из опытов с дейтеранопами, в этой координатной системе соблюдались соотношения:

$$\bar{b}' = 0; \alpha \bar{r}' + \beta \bar{g}' = 0, \quad (8)$$

которые позволяют найти положение соответствующей координатной оси  $G'$ .

Так как согласно теории «слияния» причиной протанопии и тританопии по-прежнему принимается «выпадение» соответствующих приемников, то «основные цвета»  $R$  и  $B$  остаются прежними, определяемыми направлениями прямых, на которых лежат цвета, неразличимые при соответствующих видах дихроматии. Однако «основной зеленый» с

Исходя из найденных таким образом координат положения «основных физиологических цветов» в цветовом треугольнике, после соответствующих вычислений получаем следующие цветовые (векторные) уравнения, связывающие единичные цвета  $R, G, B$  «основной физиологической системы» со стандартными основными цветами  $X, Y, Z$ :\*

$$\begin{aligned} R &= 1,782 X + 0,594 Y, \\ G &= -0,987 X + 0,406 Y, \\ B &= 0,205 X + 1,0 Z \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} X &= 0,310 R - 0,453 G, \\ Y &= 0,754 R + 1,360 G, \\ Z &= -0,064 R + 0,093 G + 1,0 B. \end{aligned}$$

\* В силу небольших уточнений и округления численных данных в пределах точности опыта эти уравнения слегка отличаются от данных в предварительном сообщении [12].

Спектральная чувствительность приемников глаза

$\lambda$	$\bar{r}(\lambda)$	$\bar{g}(\lambda)$	$\bar{b}(\lambda)$	$\lambda$	$\bar{r}(\lambda)$	$\bar{g}(\lambda)$	$\bar{b}(\lambda)$
380	0,0000	0,0000	0,0065	570	0,9540	0,9462	0,0021
390	0,0001	0,0001	0,0201	580	0,9394	0,7672	0,0017
400	0,0004	0,0003	0,0679	590	0,8984	0,5641	0,0011
410	0,0011	0,0012	0,2074	600	0,8056	0,3761	0,0008
420	0,0034	0,0044	0,6456	610	0,6893	0,2280	0,0003
430	0,0071	0,0156	1,3856	620	0,5515	0,1300	0,0002
440	0,0136	0,0358	1,7471	630	0,3990	0,0697	0,0000
450	0,0191	0,0639	1,7721	640	0,2710	0,0345	0,0000
460	0,0255	0,1046	1,6692	650	0,1685	0,0171	0,0000
470	0,0469	0,1548	1,2876	660	0,0971	0,0080	0,0000
480	0,0824	0,2212	0,8130	670	0,0512	0,0038	0,0000
490	0,1369	0,3116	0,4652	680	0,0273	0,0019	0,0000
500	0,2271	0,4621	0,2720	690	0,0132	0,0009	0,0000
510	0,3717	0,6945	0,1582	700	0,0066	0,0004	0,0000
520	0,5496	0,9436	0,0782	710	0,0034	0,0003	0,0000
530	0,6986	1,1010	0,0422	720	0,0017	0,0001	0,0000
540	0,8089	1,1651	0,0203	730	0,0008	0,0001	0,0000
550	0,8837	1,1568	0,0087	740	0,0004	0,0001	0,0000
60	0,9340	1,08365	0,0039	750	0,0001	0,0000	0,0000

точки зрения теории «слияния» не совпадает с точкой  $G$ , определяемой из опытов с дейтеранопами, а соответствует некоторой другой точке  $G'$ , лежащей, однако, в треугольнике на той же прямой  $Z = 0$ , что точки  $R$  и  $G$ .

Кривые спектральной чувствительности приемников связаны с положением в треугольнике точек, соответствующих «основным цветам» так, что каждая из кривых чувствительности определяется положением в треугольнике прямой, соединяющей точки двух других «основных цветов». Заменяя «основной зеленый»  $G$  на  $G'$ , лежащий на той же прямой  $RG$ , мы изменяем только положение прямой  $BG$ . Поэтому кривые спектральной чувствительности «зеленого»  $\bar{g}(\lambda)$  и «синего»  $\bar{b}(\lambda)$  приемников, определяемые соответственно положением прямых  $BR$  и  $RG$ , остаются прежними согласно формулам (7').

Подлежит замене только кривая чувствительности  $\bar{r}'(\lambda)$  «красного» приемника, причем она должна быть такова, чтобы прежде найденная кривая  $\bar{r}(\lambda)$  представляла собой линейную комбинацию искомой кривой  $\bar{r}'(\lambda)$  и кривой  $g(\lambda)$ . Однако при этом возникает вопрос, в каком соотношении должны складываться кривые  $\bar{r}'(\lambda)$  и  $g(\lambda)$ , чтобы дать  $\bar{r}(\lambda)$ , или, иначе говоря, какие соотношения масштабов надо взять для складываемых кривых. (От этого в приведенной выше формуле (8) будут зависеть коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$ ).

Когда в колориметрии строят кривые сложения, к которым принадлежат и рассматриваемые кривые спектральной чувствительности, то соотношение масштабов для разных кривых является совершенно произвольным (вопреки ошибочным представлениям некоторых авторов [2]), поскольку у нас нет оснований (да нет и надобности) сравнивать по величине качественно различные компоненты цвета. Если, как это обычно делается, кривые вычерчиваются так, чтобы описываемые ими площади были равны, то тем самым автоматически принимаются численно равными компоненты, соответствующие источнику

$E$  с равномерным спектральным распределением. Это диктуется соображениями чисто технического удобства и никаких физиологических оснований не имеет.

В теории «слияния» это соотношение масштабов приобретает вполне определенный физиологический смысл и не может выбираться произвольно. В самом деле, когда у дейтеранопа два приемника «сливаются», воздействуя на один и тот же общий для них «центр», то какие-то вполне определенные возбуждения «сливающихся» приемников оказываются эквивалентными в отношении этого «центра». Указание этого и его физиологическая мотивировка необходимы для полноты теории «слияния».

Сторонники теории «слияния», видимо, не осознали существенного значения этого вопроса, поскольку никогда не ставят его в явной форме, но решают только косвенным путем. Во всех рассуждениях принимается без оговорок, что «равные возбуждения» соответствуют «белому» цвету, но поскольку существует целый ряд источников, принимаемых в качестве «белого», это допущение не является еще вполне определенным. Однако в выкладках используется обычно стандартная система XYZ, в которой в качестве «белого» фигурирует источник  $E$ . К тому же приводит обычай вычерчивать кривые спектральной чувствительности так, чтобы описываемые ими площади были равными. Всё это в совокупности равносильно утверждению, что возбуждения  $\bar{r}_E$  и  $\bar{g}_E$ , соответствующие источнику  $E$ , и есть те самые, которые при «слиянии» приемников являются физиологически эквивалентными по действию на общий «центр». Мы воздержимся пока от критики, но едва ли можно принимать указанное положение безоговорочно, как самоочевидное, поэтому мы в дальнейших выкладках рассмотрим также вариант, где в качестве «физиологически белого» принят стандартный источник  $C$ , что тоже произвольно.

Указание «физиологически белого» сообщает теории «слияния» необходимую полноту и позволяет истолковать наблюдения над дихроматами. Это можно сделать либо путем отыскания положения «основных цветов» в цветовом треугольнике, либо путем непосредственного определения кривых спектральной чувствительности нормального глаза из формул (7').

Методику расчета мы приведем, опять-таки опуская математический ее вывод.

18. Для непосредственного расчета кривых спектральной чувствительности надо первым делом привести их к такому соотношению масштабов, чтобы излучению, принятому в качестве «физиологически белого», соответствовали равные возбуждения всех трех приемников. В формулах (7') эти масштабы таковы, что численное равенство возбуждений соответствует источнику  $E$  (сумма коэффициентов каждого равенства равна единице). Если в качестве «физиологически белого» взято какое-то другое излучение, каждое из равенств (7') должно быть предварительно помножено на соответствующий множитель. Если координаты «физиологически белого» по стандартной системе XYZ известны, то для нахождения этих множителей надо помножить коэффициенты каждого из равенств (7') соответственно на координаты «физиологически белого» и полученные произведения сложить. После этого надо каждое из равенств разделить на соответствующую сумму произведений.

Так, например, принимая в качестве «физиологически белого» источник  $C$  с координатами по стандартной системе:

$$x_c = 0,981; y_c = 1,00; z_c = 1,18,$$

производим расчет. Для первого из равенств (7') получим:

$$0,310 \cdot 0,981 + 0,754 \cdot 1,00 - 0,064 \cdot 1,18 = 0,983.$$

Аналогично для двух других суммы произведений будут 1,017 и 1,18. Поделив каждое из равенств на эти числа, мы «приведем их к источнику  $C$ . Таким образом получим:

$$\begin{aligned} r_c(\lambda) &= 0,315 x(\lambda) + 0,767 y(\lambda) - 0,065 z(\lambda), \\ g_c(\lambda) &= -0,442 x(\lambda) + 1,326 y(\lambda) + 0,091 z(\lambda), \\ b_c(\lambda) &= 0,847 z(\lambda). \end{aligned} \quad (9)$$

После этого преобразования можно положить в формулах (8)  $\alpha = \beta = 1$ , что означает «слияние в равных количествах».

Кривые спектральной чувствительности «синего» и «зеленого» приемников, как уже





должаем до пересечения с прямой, проведенной через точки  $R$  и  $G$  (в стандартном треугольнике до пересечения с прямой  $z = 0$ ). Обозначим точку пересечения через  $W'$ . Взяв три точки  $R$ ,  $G$  и  $W'$ , лежащие на одной прямой, строим так называемую «четвертую гармоническую» точку  $G'$ , сопряженную с точкой  $R$  относительно пары точек  $GW'$ . Иначе говоря, отрезки, отсекаемые на прямой четырьмя точками  $G$ ,  $R$ ,  $W'$  и  $G'$ , должны удовлетворять соотношению:

$$\frac{G'G}{G'W} = \frac{RG}{WR}. \quad (11)$$

Пользуясь этой формулой, легко найти положение искомой точки  $G'^*$ , которая и соответствует «основному зеленому» согласно теории «слияния». Приведенное построение «проективно-инвариантно», поэтому оно применимо в любом цветовом треугольнике и покажет в нем положение той же самой «основной зеленой» точки  $G'$ .

Пользуясь приведенными формулами, мы рассчитали положение точки  $G'$ , т. е. «основного зеленого» согласно теории «слияния» в зависимости от выбора «физиологически белого».

Для «белого»  $E$ :  $x'_G = -0,160$ ;  $y'_G = 1,160$ .

Для «белого»  $C$ :  $x'_G = -0,243$ ;  $y'_G = 1,243$ .

### ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ТЕОРИИ ДИХРОМАЗИИ

19. До сих пор мы, излагая обе теории дихромазии, хотя и отмечали некоторую недоработанность теории «слияния», воздерживались от какой-либо их критики, чтобы полностью отделить достоверную экспериментальную часть работы от каких-либо физиологических гипотез. Теперь перейдем к критическому рассмотрению теорий дихромазии.

Первым долгом следует отметить, что теория «слияния» не столько отвергает теорию «выпадения», сколько усложняет ее, так как для протанопии и тританопии принимается «выпадение» приемников и лишь для объяснения дейтеранопии предлагается совсем новый механизм. Основанием этому может быть только наличие фактов, которые нельзя объяснить без такого усложнения. Мы рассмотрим их позднее, а сначала коснемся тех фактов, которые не согласуются с теорией «слияния».

В первую очередь можно указать на то, что кривая чувствительности «красного» приемника, рассчитанная согласно теории «слияния» и приведенная в формуле (10), оказалась имеющей отрицательные значения в сине-зеленой части спектра (см. фиг. 12). Это совершенно невероятно для физических приемников и могло бы быть решающим аргументом, чтобы отвергнуть эту теорию. Однако возникает вопрос, не могло ли это произойти вследствие ошибок эксперимента или положенных в основу расчета предположений.

Мы провели поэтому ряд расчетов, которые показали, что, изменяя положение экспериментальных точек  $R$  и  $G$  в пределах точности эксперимента и одновременно выбирая наивыгоднейшим образом «физиологический белый», невозможно избавиться от отрицательных значений в кривой чувствительности, если только не брать в качестве «белого» источник значительно более зеленоватый, чем источник  $C$ , являющийся из известных источников наивыгоднейшим. Остается еще пересмотреть вопрос о положении точки  $B$ . Однако при этом надо учесть, что кривая «зеленого» приемника также должна быть всюду положительной, о чем говорилось выше. При этих условиях оказалось, что для получения всех кривых чувствительности положительными приходится поместить точку  $B$  ниже алихны, в силу чего «основной синий» оказывается имеющим отрицательную яркость. У нас нет, конечно, прямых экспериментальных данных, говорящих, что это невозможно, но всё же такое предположение не очень правдоподобно. Впрочем, можно еще допустить, что стандартная кривая видности, а вместе с тем и положение алихны, определена не совсем точно. Это представляется возможным, так как достаточно сместить

---

\* В частном случае треугольника, в котором прямые дейтеранопов параллельны, т. е.  $G$  лежит в бесконечности, точка  $W$  делит отрезок  $RG'$  пополам:  $WR = G'W$ .

точку  $B$  очень немного за алихну (примерно  $y_b = -0,015$ ).

На фиг. 12 изображена пунктиром кривая  $r'_E(\lambda)$ , рассчитанная по формуле (10) и имеющая отрицательную часть. Кроме того, там же нанесены (кривая  $r''_E(\lambda)$ ) изменения, которые вносит указанное смещение точки  $B$  ниже алихны. Отрицательная часть кривой тем самым ликвидируется, но кривая приобретает добавочный максимум. Последнее, хотя и нельзя считать безусловно невозможным (в той мере, как, несомненно, невозможна отрицательная чувствительность), всё же такая «двухвершинная» кривая чувствительности представляется маловероятной. Таким образом, теорию «слияния» можно, в конце концов, согласовать с экспериментальными данными дихроматов, однако это достигается не без существенных затруднений.

Если не считать этих трудностей, обе теории позволяют найти кривые чувствительности приемников, дающие согласие для всех установок на тождество по цвету, как нормальных, так и делаемых дихроматами.

Против теории «слияния», однако, говорит существование всего только трех видов дихромазии. Это обстоятельство совершенно естественно вытекает из теории «выпадения», но требует специальных допущений при теории «слияния». Приходится специально предполагать и давать мотивировку тому, что «выпадать» могут только «красный» и «синий» приемники, а «зеленый» выпасть никогда не может, несмотря на то, что существуют лица, зрение которых может быть объяснено как такое выпадение. Надо еще постулировать, что «красный» приемник может не только «выпасть», но и «сливаться», а «синий» никогда не «сливается». Без этих допущений непонятно существование только трех видов дихромазии.

Кроме того, отсутствие дихроматов иных промежуточных типов заставляет считать «слияние» явлением более или менее центральным. При периферическом «слиянии», например, при смешении светочувствительных веществ, трудно объяснить строгое соблюдение пропорции, в которой происходит «слияние». Таким образом, не приемники сливаются, а суммируются реакции этих приемников.

Однако это объяснение связано с другими трудностями, так как приходится допустить, что сетчатка дейтеранопа содержит все три нормально функционирующих приемника. Если бы это было так, то это могло бы быть обнаружено, например, при цветной адаптации.

В самом деле, допустим: какие-то красный и зеленый цвета неразличимы дейтеранопом. Согласно теории «слияния» это толкуется так. На сетчатке в одном случае сильно возбужден один приемник, в другом — другой, однако суммы возбуждений общего «центра» равны. Допустим теперь, что сравнение произведено после общей адаптации к красному, снизившему чувствительность одного приемника по отношению к другому. Легко видеть, что после этого суммы реакций приемников на те же цвета станут различны. (Кстати сказать, при цветной адаптации излучение, представлявшееся «белым», перестанет быть таковым.) Иначе говоря, при цветной адаптации дейтераноп должен превращаться в дихромата иного типа, в частности, промежуточного между протанопией и дейтеранопией\*.

Мы пока не предельвали специальных опытов этого рода, однако, если бы это явление имело место, было бы совершенно невозможно получение такого согласия в данных как одного и того же наблюдателя, так и разных, какое получилось в наших опытах, да и в опытах других исследователей. Кроме того, невозможно, чтобы это явление могло остаться незамеченным при массовых испытаниях зрения, в которых применяется, между прочим, и цветная адаптация («хроматическое утомление»).

Наконец, нельзя не признать, что дейтеранопия и протанопия обнаруживают много черт сходства как в самом характере дефекта (различие, в сущности, только в направлениях прямых, на которых лежат неразличимые цвета), так, например, даже и в характере

---

\* При очень сильной адаптации к красному дейтераноп должен был бы превращаться в типичного протанопа. Уже после написания данной статьи нами были проведены опыты над дейтеранопами с адаптацией. Равенства дейтеранопа при любой адаптации (в частности, и к красному) остаются типичными для дейтеранопа.

передачи этого дефекта по наследству. Необходимы, несомненно, чрезвычайно веские соображения, чтобы для этих двух столь сходных явлений предположить физиологические причины, ничего общего между собой не имеющие. К сожалению, мы этого совсем не видим. Вся аргументация у таких видных защитников теории «слияния», как Райт и Джэйд, сводится к двум аргументам, которые оба представляют собой несомненные недоразумения, опирающиеся на явные математические ошибки.

20. Теория «слияния» в ее современном виде была выдвинута Ф. Питтом [6, 11]. Проводя опыты с дихроматами, он наносил неразличимые ими цвета в треугольнике и отыскивал их общую точку пересечения. Использованный им цветовой треугольник не был стандартным треугольником  $XYZ$ , и случилось так, что прямые цветов, неразличимых дейтеранопами, оказались в *этом треугольнике* практически параллельными друг другу (с небольшими отклонениями в обе стороны). Общую точку пересечения для них, естественно, поэтому найти было нельзя. Исходя из этой случайной особенности использованного треугольника, Питт заявил, что якобы теория «выпадения» требует, чтобы прямые сходились в одной точке, а их параллельность якобы означает, что приемники «сливаются». Это положение, по заявлению Питта, доказано будто бы Гельмгольцем. Со своей стороны, Питт «доказывает» только, что прямые, параллельные в одном треугольнике, не могут оказаться сходящимися в другом, что, как известно, неверно.\*

Скоро, однако, было обнаружено, что прямые, параллельные в треугольнике Питта, сходятся в точке на конечном расстоянии при переходе к другим треугольникам, в частности, в стандартном треугольнике  $XYZ$ . Тем самым стало очевидно, что параллельность прямых в графике Питта есть случайность чертежа и никакого физиологического смысла иметь не может. Признав это обстоятельство, Райт [3], руководитель Питта, всё же повторяет ссылку на Гельмгольца, а затем ведет длинные и полные всякого рода ошибок рассуждения и выкладки, имеющие целью, очевидно, «реабилитировать» Гельмгольца в том смысле, что приписанное ему утверждение якобы справедливо для «треугольника, отнесенного к основным цветам».\*\* (Весьма комично, что Райт находит нужным «извинить неполноту анализа» у Гельмгольца тем, что тот писал свою работу 70 лет тому назад).

Мы, по счастью, избавлены от необходимости демонстрировать все ошибки Райта, так как в конечном итоге он признает, что параллельность прямых в треугольнике Питта никаких физиологических выводов делать не позволяет. Всё же настаивая, что дейтеранопия имеет причиной «слияние» приемников, Райт ссылается только на «близость кривых видности» дейтеранопов и нормальных трихроматов. Этот аргумент мы разберем ниже.

Предварительно, однако, не можем не внести ясности по поводу ссылки на Гельмгольца. Ничего похожего на то, что ему приписывается, он, конечно, не доказывает, поскольку и самое утверждение неверно. В соответствующих местах\*\*\* со всей необходимой строгостью и полнотой доказывалось то самое положение, с которого мы начали настоящую работу, а именно: что *независимо от каких-либо физиологических гипотез*, используя только принцип аддитивности, можно, зная только одну пару цветов, неразличимых дихроматом, указать все неразличимые им цвета, причем эти цвета лежат в цветовом треугольнике на прямых, сходящихся в одной точке, или *параллельных*. Последнее специально оговорено в доказательстве. Именно по той причине, что приведенное доказательство не зависит от физиологической гипотезы, Гельмгольц после его окончания указывает, что рассмотренное положение может быть истолковано не только с точки зрения «выпадения», но и с точки зрения «слияния» приемников

Во втором издании\*\*\* добавлено замечание, специально подчеркивающее возможность двоякого физиологического истолкования сходимости прямых в одной точке (которая, конечно, может быть, в частности, бесконечно удаленной). Не понимая, что сходи-

\* «Доказательство» не выдерживает никакой критики.

\*\* Все, что имеется верного в выводе Райта (но не в его «доказательстве» этого), выражается приведенной выше формулой (11), точнее — тому частному случаю, который отмечен в примечании на стр. 41.

\*\*\* Н. Н e l m h o l t z, Handbuch der Physiol. Optik, Leipzig, 1885—1896, 2 Aufl., z. 363—364.

Н. Н e l m h o l t z, Handbuch der Physiol. Optik. Voss. Leipzig, 1911, 3 Aufl., z. 123—124.

мость в точке включает в себя и случай параллельности, и, не заметив, что доказательство опирается *только* на принцип аддитивности, Питт, Райт и др., очевидно, решили, что сходимость в точке есть следствие «выпадения». Достаточно внимательно просмотреть доказательство Гельмгольца, чтобы убедиться, что оно совершенно независимо от этой теории.

Таким образом, первый аргумент в пользу теории «слияния» основан на математической ошибке, признанной самими авторами этой теории, и на неправильной ссылке.

Второй аргумент в пользу теории «слияния» был выдвинут Джэдом [2] и основан на предполагаемом тождестве (Райт осторожнее говорит о сходстве) кривых видности дейтеранопов и нормальных трихроматов. Согласно Джэду, это будто бы противоречит теории «выпадения» и должно поэтому доказывать, что у дейтеранопов приемники «сливаются».

В первую очередь следует заметить, что раньше, чем использовать восприятие яркости для выяснения работы приемников, необходимо хотя бы сформулировать, какова предполагаемая связь гетерохромных установок с работой трех приемников, а затем какими-то опытами доказать, что эта связь такова, а не иная. Без этого никакие выводы принципиально невозможны. В частности, мы уже видели, как различные гипотезы о происхождении дихромазии приводят к различным «основным цветам». Связь гетерохромных установок с работой трех приемников глаза совершенно не ясна. Существует ли особый «яркостный приемник», или ощущение яркости как-то «складывается» из реакций трех приемников и как именно, остается пока совершенно неясным, а потому материал гетерохромных установок пока что никаких разъяснений вопроса дать не может.

С другой стороны, вывод о тождестве кривых видности дейтеранопов и нормальной *несомненно неверен*. Это заключение Джэдд сделал, рассматривая большое количество кривых видности различных нормальных наблюдателей и сравнивая их с кривыми видности дейтеранопов. И те, и другие имеют значительный разброс, а так как те и другие несомненно довольно близки, то при желании можно с небольшими натяжками провести кривую, общую для тех и других. Однако мы можем всё же утверждать, что вывод Джэда неверен и основан исключительно на неточности определения кривых видности.

В самом деле, все цвета, которые дейтераноп вообще не различает, очевидно, должны иметь для него, в частности, и одинаковую яркость. Но если его кривая видности совпадает с нормальной, то эти цвета должны быть равнорядными и для нормального наблюдателя. Это, очевидно, может иметь место только в том случае, если точка схода прямых неразличимых цветов лежит в треугольнике на алихне, куда ее, основываясь на указанном допущении, и поместил Джэдд. Однако такое положение точки *G* стоит в явном противоречии с опытами установок на полное цветовое равенство.

Уже из чертежа, приводимого Джэдом (см. фиг. 2), видно, что экспериментальные данные Питта (пунктир) систематически отклоняются от прямых, проведенных Джэдом, исходя из его допущений. Эти отклонения местами в 2—2,5 раза превышают порог в данных Питта (расстояние между двумя соседними пунктирами). Расхождение с нашими данными вдвое превышает самые крайние отклонения от среднего, какие у нас встречались (см. фиг. 8 и фиг. 9), и далеко превышает возможные ошибки опыта.

Кроме того, мы проводили описанный выше поверочный опыт, причем дейтеранопы совершенно уверенно отвергали все равенства, которые они должны были бы принимать, если бы точка *G* лежала на алихне. Установки на полное равенство полей вообще значительно более точные, чем гетерохромные, а в особенности проведенный нами поверочный опыт с полной несомненностью показывает, что если кривая видности дейтеранопов и близка к нормальной, то всё же заметно отличается от стандартной кривой видности.

Наконец, если бы даже предположение Джэда было верно, оно несколько не противоречило бы теории «выпадения». Уже не говоря о возможности строить различные гипотезы о связи ощущения яркости с работой трех приемников, достаточно остановиться на той, которой, видимо, хочет оперировать Джэдд. С этой точки зрения изменение кривых видности у дихроматов толкуется так.

Ощущение яркости, согласно этой гипотезе, возникает в результате суммирования для трех приемников возбуждений, умноженных на определенные «яркостные коэффициен-

ты»  $L_R, L_C, L_B$ , представляющие собой яркости соответствующих «основных цветов». При этих условиях кривая видности  $V(\lambda)$  выразится через кривые чувствительности приемников так:

$$V(\lambda) = L_R \bar{r}(\lambda) + L_G \bar{g}(\lambda) + L_B \bar{b}(\lambda). \quad (12)$$

В случае «выпадения» одного из приемников, например,  $\bar{g}(\lambda)$ , соответствующий член написанной формулы выпадает, и кривая видности дихромата будет:

$$V_d(\lambda) = L_R \bar{r}(\lambda) + L_B \bar{b}(\lambda). \quad (13)$$

Однако, если бы верно было предположение Джедда, то это означало бы только, что яркостный коэффициент «основного зеленого»  $L_G$  равен нулю, поскольку точка  $G$  лежит на алихне. В таком случае второй член формулы (12) равен нулю, и кривые видности нормального наблюдателя и дейтеранопы совпадают, а «выпадение» приемника  $g(\lambda)$  у этой кривой не меняет соотношения

$$V(\lambda) = V_d(\lambda).$$

Иначе говоря, если бы точка схода прямых для дейтеранопов действительно лежала бы на алихне, то и с точки зрения теории «выпадения» следовало бы ожидать совпадения кривых видности дейтеранопов с нормальными. Поэтому, если бы даже этот факт не был бы заведомо неверным, это ровно ничего не говорило бы в пользу теории «слияния».

Таким образом, мы видим, что оба главных аргумента, выдвигаемых в пользу теории «слияния», основаны на совершенно очевидных недоразумениях или прямых ошибках.

Указанным исчерпываются аргументы в пользу теории «слияния», сформулированные в явном виде. Однако несомненно большую роль в настойчивом желании отстоять эту теорию во что бы то ни стало играют соображения так называемой «интроспекции». В частности, несомненно, большую роль играют более или менее смутные надежды, что «слияние» приемников «красного» и «зеленого» создаст какой-то «желтый» приемник, могущий возвести желтый цвет в ранг «основных», на чем сторонники интроспекции всегда настаивали.

В другой работе [9] один из нас подробно разобрал этот вопрос. Из всей приведенной там аргументации повторим только то, что из самого факта существования таких цветовых равенств, как уравнение Рэлея, со всей неизбежностью следует, что даже самые насыщенные желтые цвета соответствуют одновременному возбуждению, по крайней мере, двух приемников. Кроме того, «слияние» красного и зеленого приемников вовсе не означает, что это даст какой-то «желтый» (в каком смысле желтый?) приемник.

В качестве последнего аргумента против теории «слияния» укажем на то, что эта теория неразрывно связана с некоторым совершенно особым «физиологически белым» *излучением*. Это обстоятельство на первый взгляд может показаться даже привлекательным, особенно для сторонников «интроспекции». Однако эта соблазнительность только кажущаяся. В самом деле, надо в первую очередь поставить вопрос, идет ли речь о «белом» *стимуле*, который можно определить через излучение определенного спектрального состава, или о «белом» *ощущении*. Это понятия разные, поскольку излучение *того же самого спектрального состава* может в зависимости, например, от состояния адаптации давать как белое, так и совсем не белое *цветовое ощущение*.

Сторонники теории «слияния», принимая, что «белому цвету» соответствуют равные возбуждения приемников, не уточняют вопроса, понимается ли под «белым цветом» определенный стимул или определенное ощущение. Разберем оба случая.

Если считать, что равные реакции приемников соответствуют «белому ощущению», то во всех случаях, когда физические стимулы, соответствующие «белому ощущению», оказываются разными (цветная адаптация и даже при явлениях константности), стимулы, т.е. излучения, представляющиеся дейтеранопу неразличимыми, также должны соответственно измениться, что резко противоречит данным опыта. Если же, как мы это делали в расчетах и как это, сознательно или нет, всегда делают в расчетах другие авторы [2, 3, 6], считать, что равенство реакций соответствует *определенному стимулу*, то, во-первых, это противоречит наблюдаемым явлениям адаптации, несомненно связанным с изменением

чувствительностей приемников, а, во-вторых, вся совокупность исследований по цветному зрению до сих пор, несмотря на большое внимание к этому вопросу, не позволила указать определенное «белое излучение», чем-либо принципиально выделяющееся из всех прочих.

Существует целый ряд излучений, принимаемых в качестве «белых», но выбор их продиктован чисто техническими соображениями до экономических включительно и к физиологии отношения не имеет. Впрочем, если бы даже был найден какой-то особый «белый стимул», это не могло бы дать никакого удовлетворения сторонникам «интроспекции», поскольку таковая, очевидно, может относиться только к ощущениям, но не к стимулам.

21. Хотя это не связано непосредственно с темой настоящей работы, мы не можем не коснуться других методов определения кривых спектральной чувствительности приемников или «основных физиологических цветов».

Особое место занимают среди них опыты Гранита [14, 15, 16], регистрировавшего электрические импульсы, возникающие при освещении сетчатки препарированных животных. В другой работе [9] один из нас уже дал подробную критику этих работ. Несмотря на исключительный общий интерес, который они представляют, их количественные результаты, безусловно, очень мало точны.

Кривые, найденные Гранитом, никоим образом не могут быть кривыми чувствительности приемников, обуславливающих цветное зрение человека. Правда, можно предположить, что зрение исследованных животных иное, чем у человека, или что регистрировались фотохимические реакции, не имеющие отношения к цветному зрению, но нам представляется более правдоподобным просто малая точность опытов. Поэтому мы считаем возможным оценивать эти опыты как чисто качественные, в целом подтверждающие наличие приемников, чувствительных в трех спектральных областях, но непригодных для более определенных количественных заключений.

Прочие попытки определения спектральной чувствительности связаны с различными явлениями цветного зрения, наблюдаемыми в виде тех или иных визуальных установок. Особенно важно подчеркнуть, что никакие опыты такого рода не могут быть использованы для вычисления спектральных чувствительностей приемников *без определенной физиологической гипотезы* о связи наблюдаемых явлений с работой приемников. Кроме того, многие наблюдаемые явления несомненно связаны не с работой периферических приемников, а с деятельностью центральной системы. В других случаях такая связь, хотя бы частичная, представляется возможной. Поэтому, прежде чем вычислять предполагаемые кривые чувствительности, необходимо доказать, что результаты опытов определяются исключительно работой периферических приемников и что используемая в расчетах связь наблюдаемого явления с работой приемников действительно такова и не может быть иной. То же надо сказать и про нахождение «основных физиологических цветов», если под ними понимается изолированная реакция одного приемника. Без отчетливой формулировки предполагаемой связи наблюдаемого явления с работой приемников и обоснования, почему эта связь должна быть такой, а не иной, всякие выводы об «основных цветах» или «спектральных чувствительностях» совершенно лишены какого-либо смысла.

У нас есть действительно чрезвычайно веские аргументы, что при правильно поставленных экспериментах с установками на полное равенство их результаты определяются исключительно работой периферических физических приемников глаза. Эти соображения, не представляющие, впрочем, чего-то принципиально нового, изложены одним из нас в работе [9].

В настоящей работе мы также постарались обосновать, что светочувствительные вещества у дихроматов безусловно те же самые, что и в нормальной сетчатке. Также тщательно разобрали два теоретически возможных механизма дихромазии — «выпадение» и «слияние» приемников. Все сделанные физиологические допущения обоснованы экспериментально. Того же надо требовать и во всех других случаях.

Если не считать работ Гранита, из всех других методов определения «основных цве-

тов» наиболее важными являются опыты с цветной адаптацией. Они основаны на представлении, что адаптация представляет собой изменение чувствительностей тех же периферических приемников. В подтверждение этого можно указать, что спектральная чувствительность приемников при адаптации действительно не изменяется (известный факт сохранения цветовых уравнений).

Кроме того, одновременное изменение различных цветов при изменении адаптации, по-видимому, действительно всегда представляет собой так называемое «линейное преобразование» цветового пространства; притом при любых изменениях адаптации «главные оси преобразования» остаются теми же самыми. Всё это представляет собой весьма специфическую картину, неизбежно вытекающую из представления об адаптации, как об изменении чувствительности периферических приемников. Экспериментальное подтверждение этих весьма строгих закономерностей является очень веским подтверждением правильности предположения о механизме адаптации.

Кроме того, если опыты проводятся в форме установок на полное равенство (в условиях различной адаптации полей), то при надлежащих предосторожностях мы можем, как и в случае обычных цветовых равенств, утверждать, что результаты опытов не зависят от влияния центральной нервной системы. Необходимо, впрочем, оговориться, что экспериментальная проверка гипотезы еще не может считаться достаточной, хотя всё, что до сих пор известно, согласуется с ней. Важен, впрочем, в первую очередь самый факт возможности экспериментальной ее проверки.

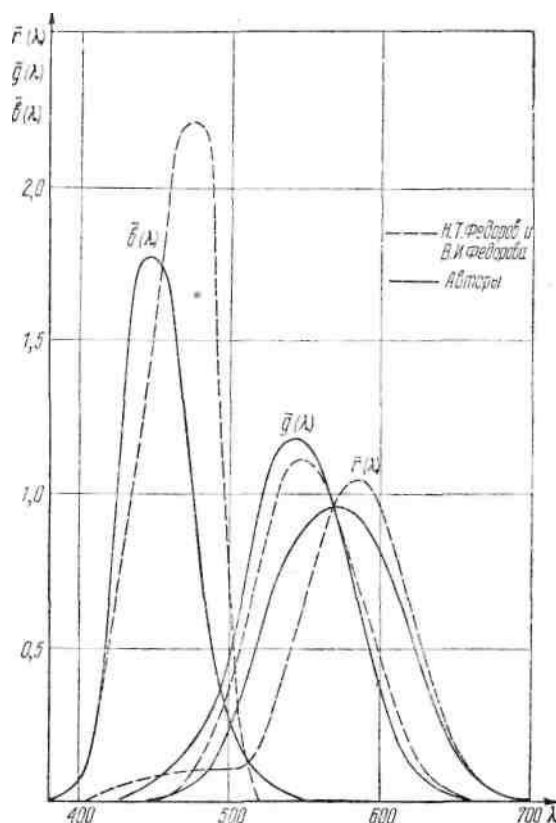
При полной пригодности явлений адаптации для выводов относительно работы приемников глаза следует отметить, что результаты этих опытов заметно уступают в точности опытам с обычными установками на равенство, в том числе и опытам с дихроматами. Но они важны, как опыты, проводимые на нормальных наблюдателях.

Идя по этому пути, Райт провел обширную серию экспериментов по цветной адаптации [3]. К сожалению, он совсем не в состоянии был справиться с довольно сложной математической стороной проблемы, да и сама примененная им методика экспериментирования, представляющая в любом случае значительные трудности, может вызвать некоторые возражения. Эти опыты, по-видимому, хорошо подтверждают линейность преобразования, но сам Райт не сумел извлечь из своих опытов какие-либо окончательные выводы.

Сотрудник Райта, Уолтерс [17], продолжил его работу, используя примерно ту же методику. По сравнению с данными опытов с дихроматами, точность опытов Уолтерса не очень велика. Впрочем, для точки  $R$  данные получились весьма близкими к опытам с протанопами, а именно:  $x_r = 0,744$ ;  $y_r = 0,256$ .

Для точки  $G$  расхождения больше, что и понятно, так как точка  $R$  лежит совсем рядом с красным концом спектра и можно экспериментировать с цветами, к ней весьма близкими. Точка  $G$  лежит значительно дальше, и ее определение поэтому менее точно (это сказывается, например, на большем расхождении данных по дейтеранопам у разных исследователей).

Фиг. 14. Кривые спектральной чувствительности приемников глаза по сравнению с кривыми, полученными Н.Т. Федоровым и В.И. Федоровой методом адаптации.



В случае опытов с адаптацией при этом усложняются и расчеты, в чем, как мы уже видели, школа Райта не сильна. При пересчете на систему XYZ результаты Уолтерса дают:  $x_g = 11,80$ ,  $y_g = -10,07$  и, следовательно,  $z_g = -0,73$ . Поскольку почти наверное можно утверждать, что на самом деле  $z_g = 0$ , это дает возможность судить о точности результатов Уолтерса. Соответствующее направление вектора  $G$  приведено примерно (с несколько произвольной поправкой на  $z_g = 0$ ) на фиг. 9.

В небольшой работе, проведенной одним из нас [18] и носившей предварительный характер, основное внимание было обращено на обоснование гипотезы, по которой адаптация есть изменение чувствительности приемников. Это, по-видимому, хорошо подтверждается. Попытка найти основные оси преобразования (основные цвета) указала на их близость к направлениям неразличимых цветов дихроматов, впрочем, эти опыты не отличались точностью, а продолжить работу не удалось.

Очень интересной по идее является работа Н.Т. и В.И. Федоровых [19], которые обошли математические трудности проблемы, применяя предельный случай очень сильной адаптации («искусственная цветная слепота»). К сожалению, этим путем не удалось получить все три вида искусственной дихромазии. Поэтому для вычисления спектральных кривых чувствительности использованы кривые видности и разные, достаточно произвольные допущения. Полученные кривые, естественно, не могут претендовать на точность, а, кроме того, совершенно несопоставимы ни с какими-либо другими исследованиями, так как найденные кривые резко не согласуются с данными стандартного наблюдателя. Это легче всего видеть по «синей» кривой. Она явно весьма далека от того, чтобы быть линейной комбинацией стандартных кривых (фиг. 14). В самом деле, так как в длинноволновой части спектра ее ординаты равны нулю, т. е. совпадают с кривой  $\bar{z}(\lambda)$ , то обе кривые должны были бы совпадать и на всем протяжении, что не выполняется даже приблизительно.

Такое резкое различие хотя бы в одной из трех кривых показывает, что в основу работы положены для нормального трихромата цветные уравнения, сильно отличающиеся от тех, какие были получены другими авторами в обычных условиях наблюдения, т. е. речь идет о совсем новой системе цветного зрения. Чем бы ни объяснялось это расхождение,



очевидно, что полученные данные заведомо не могут быть признаны кривыми чувствительности нормального глаза, характеризуемого другими цветовыми уравнениями. В том, что данные Федоровых, полученные в весьма специфических условиях наблюдения, значительно уступают в точности тем, какие получены в нормальных условиях, едва ли можно сомневаться.

Этими работами мы ограничиваем тот экспериментальный материал, каким мы располагаем по кривым спектральной чувствительности приемников нормальной сетчатки. Мы не считаем возможным рассматривать весьма многочисленные работы по определению спектральной чувствительности приемников, а еще чаще «основных цветов», с помощью самых разнообразных наблюдений (пороги различения, одновременный контраст, явление Вецольда-Брюкке и т. д.).

Для истолкования этих явлений с точки зрения того, как они связаны с работой приемников сетчатки, мы не располагаем ровно никакими данными, в частности, нет абсолютно никакой уверенности, что на результатах этих наблюдений не сказывается сильнейшим образом деятельность центральной нервной системы.

В этих работах, как правило, даже не сформулировано, хотя бы в виде гипотезы, каков механизм наблюдаемых явлений и как они связаны с работой приемников сетчатки. Между тем, всякие выводы о свойствах приемников существенно зависят от того, каков этот механизм. Примером этому может служить то, что мы видели выше, когда в зависимости от принятия гипотезы «выпадения» или гипотезы «слияния» *из тех же самых опытов* с дихроматами были выведены совсем разные кривые чувствительности приемников и разные основные цвета. Даже различный выбор «физиологически белого» в теории «слияния» оказывает влияние на получаемый результат.

Поскольку предположения, на которых чаще всего явно бессознательно строятся выводы, даже не сформулированы, нет, конечно, и речи о каком-либо их экспериментальном обосновании. Из опыта, или непосредственно, или чаще путем более или менее мудреных математических манипуляций, находят какие-то цвета или какие-то спектральные кривые и потом объявляется, что эти цвета почему-то должны быть «основными», или кривые — кривыми спектральной чувствительности приемников. Такие работы трудно даже критиковать, потому что основной вопрос, подлежащий критическому разбору, это те предпосылки, с помощью которых истолковывается эксперимент, или производятся расчеты. Но предпосылки не сформулированы, а становятся на путь догадок — труд слишком неблагодарный. Кроме того, по большей части построения таковы, что совершенно не приходит в голову, какой бы механизм мог служить им оправданием.

Приведем только один, но чрезвычайно часто встречающийся пример. Находят какой-то цвет и заявляют, что «основной» цвет хотя и не совпадает с ним, но должен быть ему равен по цветовому тону. Спрашивается, какой механизм явления может служить основанием подобному утверждению, тем более, что понятие цветового тона само многозначно (сравнить явление Вецольда-Брюкке), а, кроме того, зависит от выбора определенного «белого» (а, следовательно, и от мотивировки этого выбора).

Выводы таких работ представляют собой, в силу сказанного, совершенно голословные утверждения. Все эти работы обнаруживают чрезвычайную близость к методам «интроспекции», бесплодность которых и враждебность естественно-научным методам исследования отмечал неоднократно И.П. Павлов. Тем более совершенно непонятно, какое отношение могут иметь подобные соображения к определению такой чисто физической характеристики, как спектральная чувствительность.

## ВЫВОДЫ

1. Проведенные нами опыты благодаря использованию всех трех координат цвета позволили установить условия неразличимости цветов дихроматами (в особенности, дейтеранопами) со значительно большей точностью, чем это удавалось до сих пор. Эти данные, независимо от всего прочего, безусловно, могут и должны быть использованы при составлении таблиц для проверки цветного зрения.

2. В частности, из наших опытов с полной несомненностью следует, что помещение точки *G* на алихне, как это предлагал Джэ́дд, противоречит данным эксперимента и не может быть объяснено возможными ошибками опыта. Дейтеранопы уверенно отвергают установки, которые должны были бы принимать в случае справедливости допущения Джэ́дда. Из этого также следует, что кривая видности дейтеранопов заметно отличается от стандартной кривой видности нормального трихромата.

3. Опыты подтвердили совпадение с большой точностью направлений неразличимых цветов для дихроматов одного типа.

4. Опыты с дихроматами позволили рассчитать кривые спектральной чувствительности приемников, как в случае принятия теории «слияния», так и теории «выпадения».

5. Теория «слияния», как она обычно излагается, неполна, пока не выбран и не мотивирован выбор вполне определенного «физиологически белого» *излучения* (не цветового ощущения), вызывающего равные реакции трех приемников. От этого выбора зависит результат расчета спектральной чувствительности в случае теории «слияния», но не зависит в случае теории «выпадения».

6. В случае теории «слияния» возникают значительные трудности, чтобы не получить кривых спектральной чувствительности с отрицательными значениями, что представляется совершенно невозможными для физических приемников. Избегнуть этого затруднения можно, либо допустив, что «основной синий» имеет отрицательную яркость, либо, что стандартная кривая видности определена неправильно. Без этих допущений невозможно избежать при теории слияния отрицательных спектральных чувствительностей.

7. Опыты с установками на полное тождество полей нормальных трихроматов и дихроматов, формально говоря, могут быть истолкованы как с точки зрения теории «выпадения», так и теории «слияния», а потому сами по себе принципиально не могут служить основанием для предпочтения одной из них.

8. Теория «слияния» в современном ее виде представляет собой только усложнение теории «выпадения», которая признаётся во всяком случае справедливой для протанопии и тританопии; только для дейтеранопии предполагается особый и довольно сложный механизм, которым обусловлено ее происхождение. Поэтому следует решить, имеются ли достаточные основания для такого усложнения и, в частности, основания для резкого противопоставления дейтеранопии другим видам дихромазии.

Аргументация в пользу теории слияния, основанная на сходимости или параллельности прямых неразличимых цветов, построена на математической ошибке, причем последующее ее исправление лишило этот аргумент всякого экспериментального содержания.

10. Аргументация Джэ́дда, исходящая из сравнения кривых видности, основана на утверждении, опровергаемом опытом, и, кроме того, содержит ошибку в рассуждениях. Если бы даже предполагаемый факт имел место, он в одинаковой мере укладывался бы как в теорию «выпадения», так и в теорию «слияния».

11. Не давая каких-либо преимуществ в объяснении известных фактов, теория «слияния» создает, напротив, заметные затруднения в их истолковании. Сюда относятся: трудности ее согласования с требованием положительности кривых чувствительности приемников, необходимость целого ряда специальных допущений о невозможности для «зеленого» приемника «выпадать», а для «синего» «сливаться», необходимость выбора и физиологического обоснования особого «белого» излучения, что, несмотря на многочисленные старания, до сих пор никому не удалось сделать (возникает законный вопрос, существует ли такое особое в физиологическом смысле излучение вообще), отсутствие резких изменений в неразличимых дейтеранопом цветах в условиях цветной адаптации, в частности — чрезвычайное постоянство цветов, неразличимых дейтеранопами. Последний аргумент мы склонны считать решающим против теории «слияния». Кроме того, не в пользу этой теории говорит отсутствие каких-либо принципиальных различий между дейтеранопией и другими видами дихромазии, особенно протанопией, которые могли бы оправдывать принятие для нее совершенно иной физиологической причины (чисто центральное происхождение при чисто периферическом для других видов дихромазии).

12. Исходя из сказанного, можно утверждать, что теория «слияния» в ее современном виде представляет собой чрезвычайно прихотливое усложнение наших представлений, не

имеющее под собой *решительно никаких* экспериментальных оснований и не только не улучшает возможности объяснения наблюдаемых явлений, но и создает дополнительные трудности, а иногда (как в случае цветной адаптации) и прямо вступает в противоречие с опытом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Maxwell J.C., On the theory of compound colours, Philos. Trans., 150, 1860, p. 57.
2. Judd D.B., Standard response functions for protanopic and deuteranopic vision, Journ. Opt. Soc. Am., 35, No. 3, 1945, p. 199 — 221.
3. Wright W.D., Researches on normal and defective colour vision, London, 1946.
4. Judd D.B., Facts of colour — blindness, Journ. Opt. Soc. Am., 33, No. 6, 1943, p. 294—307.
5. König A., Gesammelte Abhandlungen, Leipzig, 1903.
6. Pitt F.H.G., Characteristics of dichromatic vision, Med. Res. Counс. Spec. Report Ser. 200, London, 1935.
7. Нюберг Н.Д., Определение положения в цветовом треугольнике основного синего цвета, ДАН СССР, т. 65, № 2, 1949, стр. 159 — 162.
8. Юстова Е.Н., Спектральная чувствительность приемников глаза, ДАН СССР, т. 74, № 6, 1950.
9. Нюберг Н.Д., Светочувствительные приемники глаза, Проблемы Физиологической Оптики, т. 9, 1950, стр. 61.
10. Helmholtz H. Handbuch der Physiol. Optik, Leipzig, 1885 — 1896, 2 Aufl.
11. Pitt F.H.G., The nature of normal trichromatic and dichromatic vision, Proc. Roy. Soc., Ser. B, 132, No. 866, 1944.
12. Юстова Е.Н., Определение координатных осей основной физиологической системы из опытов с цветнослепыми, ДАН СССР, т. 63, № 4, 1948.
- Юстова Е.Н. Новое определение спектральных характеристик цветного зрения, ДАН СССР, т. 65, 1949, стр. 661 — 664.
13. Helmholtz H., Handbuch der Physiol. Optik. Voss. Leipzig, 1911, 3 Aufl.
14. Granit R., The retinal mechanism of color reception, Journ. Opt. Soc. Am. 31, No. 9, 1941, p.570 — 580.
15. Granit R., Physiological Theory of colour reception, Nature, 151, No. 3818, 1943, p. 11
16. Granit R., The colour receptors of the mammalian retina, Journ. Neurophysiology, 8, No. 3, 1945, p. 195 — 210.
17. Walters H. V., Some experiments on the trichromatic theory of vision, Proc. Roy. Soc., Ser. B, 131, No. 862, 1942, p. 27.
18. Нюберг Н.Д. Закономерности явлений адаптации, Труды конференции по физиологической оптике, 1935.
19. Федоров Н.Т. и Федорова В.И., Исследования по цветному зрению, Известия АН СССР, 1935, № 10.