

III. ЦВЕТНОЕ ЗРЕНИЕ

Д-р физ.-мат. наук Н.Д. НЮБЕРГ

СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ПРИЕМНИКИ ГЛАЗА

1. Зрительный процесс в целом является весьма сложным, однако несомненно, он должен начинаться с чисто физического процесса превращения падающей на сетчатку лучистой энергии, производящей определенные материальные изменения в нервных окончаниях. Светочувствительные вещества носят в физике общее название «светочувствительных приемников». Задачей настоящей статьи является рассмотрение, каковы должны быть светочувствительные приемники глаза. При этом мы имеем в виду характеристику этих приемников опять-таки только с чисто физической точки зрения, с точки зрения их способности реагировать на свет, в частности имеем в виду определение кривых спектральной чувствительности этих приемников. Этот вопрос имеет тем большее значение, что различные теории цветного зрения отличаются друг от друга в первую очередь тем, какие свойства вообще и какие кривые спектральной чувствительности они приписывают светочувствительным приемникам.

В основу мы кладем главным образом данные визуальных установок на равенство полей, которые фактически сводятся к так называемым опытам по «сложению цветов». Мы придаем этим опытам первенствующее значение по той причине, что они отражают работу именно интересующих нас первичных приемников глаза, чего нельзя сказать с уверенностью ни про какие другие опыты.

Пригодность наблюдений над работой глаза для характеристики первичных приемников сетчатки может быть подвергнута сомнению, так как непосредственно наблюдаемые цветовые ощущения зависят не только от работы первичных светочувствительных приемников, но и от всего психофизиологического процесса, в частности при заведомом участии центральных факторов. Это совершенно справедливо, и потому-то мы в качестве исходного материала берем только установки на полное равенство. Они заключаются в отыскании излучений различного спектрального состава, тождественных по цвету. Конечный цвет полей, который мы видим, является результатом всего зрительного процесса в целом, однако факт равенства этих полей по цвету мы можем сделать зависящим только от работы первичных приемников, для этого надо только, чтобы влияние прочих факторов для обоих сравниваемых полей было одинаковым. Так это или нет, всегда легко проверить. Сравнимые поля освещаются одинаково светом того же самого спектрального состава. Если действие всех прочих факторов на сравниваемые поля одинаковы, то объективно одинаковые поля будут и визуально одинаковы. В противном случае объективно одинаковые поля будут визуально неравными. Во всех доброкачественных работах такую проверку обязательно проводят в начале и в конце каждой серии опытов, а в случае сомнений – до и после каждого эксперимента.

Таким образом, хотя мы и не устраняем влияние на видимый цвет всех факторов, в том числе и центральных (это принципиально невозможно), но обеспечиваем то, что эти влияния, одинаковые для сравниваемых полей, не влияют на результаты опытов. Никакие другие опыты с установками на неполное равенство (например, гетерохромные) или на получение реакции определенной силы (например, пороговой) не могут быть сделаны независимыми от внутренних факторов, поскольку их влияние при неравных первичных воздействиях всегда может быть различным. Поэтому все прочие наблюдения над работой глаза могут быть отнесены к деятельности первичных приемников только в той мере, в какой это не противоречит выводам из опытов с установками на полное цветное равенство.

Не трудно видеть, кроме того, что никакие визуальные наблюдения принципиально не могут обладать точностью большей, чем точность установок на полное равенство по цвету. В самом деле, всякое наблюдение должно быть воспроизводимо, и точность наблюдения не может быть больше, чем точность воспроизведения обстановки, в которой производится наблюдение. Но точность воспроизведения цветов определяется точностью установок на равенство.

Полезно заметить, что указанные установки на равенство являются обычным в технике физического эксперимента приемом работы с нуль-инструментом, приемом, особенно выгодным

для исключения побочных, трудно учитываемых факторов.

2. Наиболее важными результатами опытов по сложению цветов являются два положения, которые воспроизводят в слегка измененной редакции известные законы Грассмана [7]. Это: трехмерность и аддитивность. Аддитивность мы сформулируем так:

Если к одинаковым по цвету излучениям прибавить одинаковые же по цвету излучения, то полученные смеси будут одинаковыми по цвету.

Если к одинаковым прибавить излучения, разные по цвету, то и смеси будут по цвету различны¹.

Это свойство аддитивности выполняется для любых наблюдателей и в любых условиях наблюдения. Не зарегистрировано ни одного случая его нарушения ни для нормальных наблюдателей, ни при врожденных, ни при благоприобретенных аномалиях цветного зрения.

Трехмерность в строгой форме сформулирована Грассманом через посредство цветовых уравнений, однако трехмерность цветового многообразия легко наблюдать и непосредственно. Она сказывается, в первую очередь, в невозможности расположить все цвета в порядке их постоянных переходов на плоскости, что, однако, можно сделать в пространстве. В соответствии с этим все цветовые атласы всегда представляют собой серию таблиц, причем постепенные цветовые переходы имеются в пределах каждой таблицы (два измерения) и от таблицы к таблице (третье измерение), которые все располагаются в определенной последовательности. Точно так же все геометрические интерпретации многообразия цветов, предлагавшиеся разными авторами, всегда объемны: пирамида Ламберта, шар Рунге, двойной конус Оствальда и т. п. Это касается не только всей совокупности цветов, но и цветов, непосредственно близких к любому данному. Все такие цвета, мало отличающиеся от данного, нельзя разместить вокруг него в пределах одной плоскости, но можно в пространстве. Другим выражением трехмерности является необходимость для полного описания цвета указания значений для трех не зависимых друг от друга признаков.

Соблюдение трехмерности столь же неизменно, как и аддитивности, с той, правда, оговоркой, что существуют наблюдатели, для которых число измерений меньше трех (дихроматы и монохроматы), однако ни для какого наблюдателя, ни при каких условиях наблюдения никогда не было обнаружено нарушения трехмерности в сторону увеличения числа измерений.

3. Следствия этих двух чрезвычайно надежно установленных положений очень велики. В настоящее время известно огромное число светочувствительных приемников, фотохимических и фотоэлектрических, как изготовленных искусственно, так и в виде природных образований, имеющих в живых организмах. Если не считать сравнительно небольших отклонений, вызванных побочными обстоятельствами, для всех этих процессов характерна та же аддитивность, какая обнаруживается в опытах по сложению цветов. Это является добавочным подтверждением, что эти опыты действительно отражают работу первичных физических приемников.

Важнейшим следствием аддитивности, что относится к любым приемникам, а не только к приемникам глаза, является возможность полностью характеризовать реакцию приемника на свет любого спектрального состава при помощи так называемой «кривой спектральной чувствительности». Кривая спектральной чувствительности выражает собой реакцию приемника на монохроматический свет разных длин волн. Если при этом реакция приемника выражена в величинах, пропорциональных интенсивности действующего излучения, а приемник аддитивен, по кривой спектральной чувствительности можно вычислить реакцию приемника на свет любого спектрального состава. Эта реакция складывается как сумма из реакций на отдельные монохроматические излучения, из которых составляется данное сложное излучение.

Очень важно отметить, что понятие спектральной чувствительности неразрывно связано с аддитивными приемниками. Для приемников неаддитивных понятие кривой спектральной чувствительности теряет смысл. Можно, конечно, всегда измерить реакцию приемника на монохроматические излучения, но это уже не будет кривая спектральной чувствительности и по ней ничего рассчитать нельзя. Поэтому, если какой-либо автор говорит о кривой спектральной чувствительности, то это означает, что он считает исследуемый приемник аддитивным.

¹ Вторая часть положения требует оговорки, что различие должно быть достаточно большим, чтобы не оказаться ниже порога различения

Если аддитивность цветов указывает, что приемники сетчатки принадлежат к числу аддитивных, т. е. таких, каковы все известные в настоящее время приемники, то трехмерность убеждает нас, что число таких приемников с различными кривыми спектральной чувствительности не может быть меньше трех. Действительно, если бы число приемников было, скажем, равно двум, то при этих условиях все цвета в порядке всех их постепенных переходов можно было бы разместить по двум измерениям плоскости, что противоречит опыту. Собственно говоря, трехмерность цветового многообразия определенно указывает, что число разных приемников и не больше трех, а в точности равно трем, так как при большем числе приемников следовало бы ожидать, что и число измерений многообразия цветов должно было бы быть соответственно большим. Это чрезвычайно веский аргумент, но, формально говоря, можно представить себе такие приемники, что число их будет больше трех, а работать они будут так, как если бы их было только три. К этому вопросу мы еще вернемся.

Опыты с установками на равенство позволяют не только выяснить вопрос о числе и характере приемников, но, поскольку эти приемники аддитивны, они могут служить для определения кривых спектральной чувствительности приемников. Надо при этом заметить, что, если число и характер приемников одинаковы для всех трихроматов, кривые спектральной чувствительности для различных наблюдателей несколько различаются. Возможно даже, что у того же самого наблюдателя в зависимости от состояния глаза кривые чувствительности немного меняются. Кривые, которые обычно приводятся, относятся к некоторому наблюдателю, условно принятому в качестве «нормального».

Опыты по сложению цветов позволяют для каждого наблюдателя найти его так называемые «кривые сложения», характеризующие зрение этого наблюдателя. Кривые сложения представляют собой следующее. Согласно закону Грассмана, любой цвет может быть однозначно выражен через три цвета, которые могут быть выбраны практически произвольно.² Поэтому, взяв любые три цвета в качестве основных, можно выразить через них цвета монохроматических излучений. Таким образом, мы найдем для каждой длины волны соответствующее цветовое уравнение. Коэффициенты этих уравнений (их будет три) могут быть отложены по вертикали против каждой длины волны. Изменение этих трех коэффициентов с длиной волны даст три кривые, из которых каждая показывает, как изменяется соответствующий коэффициент цветового уравнения с длиной волны. Коэффициенты цветовых уравнений, когда они положительны, показывают, в каких пропорциях надо смешать цвета, принятые за основные, чтобы получить данный цвет. Однако для цветов спектра, так как обычно столь насыщенных цветов нельзя получить смешением каких-либо других, один или два коэффициента могут оказаться отрицательными и определяются косвенным путем, что, однако, не делает эти определения менее точными [1]. В зависимости от того, какие три цвета взять за основные, мы можем получать различные кривые сложения, которых для каждого наблюдателя можно построить бесчисленное множество. Однако все эти кривые связаны между собой, а именно: если мы возьмем какие-либо три кривые сложения, то все остальные можно получить из этих трех, помножая их на разные коэффициенты и складывая. Таким расчетным путем можно найти кривые сложения, которые для всех длин волн спектра будут иметь только положительные значения. Все полученные таким путем кривые будут кривыми сложения и обратно — все кривые сложения можно получить этим путем. Поэтому, чтобы знать все кривые сложения, достаточно знать какие-нибудь три из них.³

Таковы свойства этих замечательных кривых. Про эти кривые можно сказать следующее. Если мы подберем какие-либо физические три приемника, кривые чувствительности которых воспроизводят какие-нибудь три кривые сложения, то совокупность таких приборов образует так называемый объективный колориметр, т. е. объективный прибор, дающий

² Это совсем не значит, что любой цвет можно получить с л о ж е н и е м каких-либо трех, выбранных в качестве ОСНОВНЫХ. Это неверно, и такая формулировка закона Грассмана есть вульгаризация. Но в ы р а з и т ь любой цвет через три при помощи цветового уравнения всегда можно, только некоторые коэффициенты могут оказаться отрицательными.

³ Равные кривые сложения получаются в зависимости от того, какие три цвета мы возьмем за исходные, или, как говорят, "единичные" цвета, но каждый раз полученные три кривые будут изображать результаты опытов по сложению цветов. Некоторые авторы (см., напр., [4]), взяв из разных источников кривые сложения, определенные по отношению различных "единичных" цветов, удивляются, что они сильно различаются друг от друга. Это то же самое, что считать определения ДЛИНЫ неточными на том основании, что длина того же самого предмета, измеренная в метрах, выражается совсем иным числом, чем при измерении ее в аршинах.

такие же установки на равенство, как и непосредственное визуальное уравнивание. Однако, если мы возьмем какой-либо физический приемник, у которого кривая чувствительности не совпадает ни с одной из кривых сложения, то всегда можно найти бесчисленное множество таких спектральных составов, которые будут визуальны одинаковы, но по-разному действовать на этот приемник, и обратно.

Из сказанного можно сделать следующие чрезвычайно важные выводы:

1. Приемники, которыми определяется цветное зрение, не могут иметь кривых чувствительности, не являющихся какими-то из числа кривых сложения (иначе равными по цвету должны были бы быть по тем излучения, какие фактически наблюдаются).

2. Любые три приемника, кривые чувствительности которых образуют систему из трех кривых сложения, принятые в качестве приемников глаза, дадут согласие со всеми опытами по сложению цветов.

3. Никакие опыты по сложению цветов для одного и того же наблюдателя, как бы их ни комбинировать, не могут позволить предпочесть какие-то из числа кривых сложения, т. е. установить, какие же из них являются действительными кривыми чувствительности приемников сетчатки.

Второй и третий выводы следуют из того, что совокупность любых трех приборов указанного типа дает в точности такие же установки на равенство, как и нормальный глаз.

Определение кривых чувствительности приемников глаза через кривые сложения представляют собой полную аналогию с нахождением относительных спектральных кривых вообще.

Во всех подобных случаях, например при определении относительной спектральной чувствительности фотоэлемента или фотопластинки, не измеряется абсолютная реакция приемника, а производится сравнение реакции приемника на свет определенной длины волны с реакцией на какое-то излучение, принятое за единицу. Полученная таким путем кривая отличается от истинной (абсолютной) кривой спектральной чувствительности только постоянным множителем. Достаточно знать излучение, действительно вызывающее реакцию, равную единице, чтобы перевести относительные измерения в абсолютные. Можно было бы сказать, что относительные измерения дают бесконечное множество кривых чувствительности, отличающихся только постоянным множителем (масштабом). Одна из них является абсолютной кривой чувствительности.

Сходное положение с кривыми сложения. Они представляют собой результат своего рода относительных измерений кривых чувствительности приемников. Дело осложняется, однако, тем, что для глаза приходится определять сразу все три кривые чувствительности, так как устройство глаза таково, что оно видит равенство двух полей по цвету, только когда реакции всех трех приемников одновременно оказываются одинаковыми. Это приводит к тому, что относительные кривые чувствительности приемников глаза, найденные из установок на равенство, могут быть представлены не только в произвольном масштабе, но и представляют собой всевозможные сочетания трех кривых.

Кривые сложения являются, таким образом, относительными кривыми спектральной чувствительности приемников глаза, определенных относительно трех цветов, условно принятых за единичные. Чтобы найти истинные кривые чувствительности, достаточно для каких-либо трех цветов знать действительные вызываемые ими реакции. Эту задачу обычно ставят в форме указания «основных цветов», которым соответствуют изолированные возбуждения только одного из приемников.

Впрочем, не все кривые сложения следует иметь в виду как возможные кривые чувствительности приемников. Из чисто физических соображений приходится считать невероятным существование приемников, у которых кривая чувствительности для некоторых длин волн принимает отрицательные значения. Мало того, что среди многочисленных известных физических приемников таких никогда не встречается, существование подобных приемников в высшей степени невероятно из энергетических соображений. В приемнике подобного типа под действием света разных длин волн должны идти противоположно направленные процессы. Но процессы, происходящие под действием света, — процессы энергетические и всегда идут в сторону повышения энергетического уровня рецептора, поэтому невозможно представить себе возникновение противоположно направленных процессов под действием света различных длин волн. Это соображение делает гипотезу Геринга о фотохимических процессах ассимиляции и диссимиляции того же самого вещества под действием света различных длин волн невозможной с энергетической точки зрения, не говоря уже о том, что существование таких веществ не известно.

4. Вернемся теперь к вопросу о числе приемников, в частности к тому, может ли их число быть больше трех. Сколько бы их ни было, для них во всяком случае остается справедливым, что их кривые спектральной чувствительности должны принадлежать к числу кривых сложения. При выполнении этого требования автоматически получится, что, сколько бы ни было таких приемников, многообразие цветов остается трехмерным. Это происходит по следующим причинам. Все кривые сложения, как сказано, можно получить комбинированием трех из них. Отсюда следует, что, сколько бы ни имелось приемников с кривыми чувствительности, совпадающими с кривыми сложения, если два каких-либо излучения действуют одинаково на три приемника такого типа, то и на все остальные приемники с указанными кривыми чувствительности они будут действовать одинаково. Таким образом, если к трем таким приемникам добавлять еще какое угодно их число, это ничего не прибавит в смысле способности глаза различать действующие на глаз излучения. Они ничего не смогут изменить и в цветовом многообразии, которое остается трехмерным. Поэтому, если приемники сверх трех и существуют, то они должны обладать свойствами, делающими их бесполезными для зрения. Если бы они не были таковыми, многообразие цветов не могло бы быть трехмерным.

Но и помимо их полной бесполезности, что делает существование приемников сверх трех невероятным с биогенетической точки зрения, можно привести и другие соображения против их существования. Как известно, у различных лиц имеются довольно заметные, хотя и небольшие отклонения в кривых чувствительности. Если бы число приемников было больше трех, то при таких колебаниях строгое соотношение, обеспечивающее незаметность «лишних» приемников, должно было бы нарушиться и многообразие цветов сделаться четырехмерным; этого никогда не наблюдается. Наконец, сказанное невероятно и с физико-химической точки зрения.

Кривые спектральной чувствительности различных веществ находятся, видимо, в очень сложной зависимости от их структуры. При всем желании едва ли возможно было бы даже нарочно подобрать хотя бы четыре различных вещества, кривые чувствительности которых находились бы в простой линейной зависимости, как это требуется для кривых сложения. Легче себе представить существование, скажем, четвертого приемника, содержащего в себе смесь тех же веществ, из которых состоят первые три. В таком случае соотношение в кривых чувствительности при некоторых условиях может быть понято, но в таком случае число различных светочувствительных веществ остается равным только трем, которые и являются настоящими первичными приемниками. Таким образом, мы можем с полной уверенностью утверждать, что число первичных, самостоятельных приемников не только не меньше трех, но и не превышает этого числа. Если бы кто-либо захотел подвергнуть этот вывод сомнению, ему следовало бы экспериментально обнаружить такие условия, в которых многообразие цветов не укладывается в три измерения. Это единственно, что могло бы доказать существование большего числа приемников. Любые другие наблюдения всегда можно будет свести к работе всего только трех приемников.

5. В дополнение к изложенному, стоит отдельно рассмотреть вопрос о «желтом приемнике». В разных вариантах приемники с таким названием часто встречаются в теоретических построениях разных авторов. Такие приемники появляются либо в виде одного из трех, либо в качестве добавочного сверх трех обычных. Первым делом следует остановиться на том, что, собственно, означает указание «цвета приемника». Как уже говорилось, задача нахождения из числа кривых сложения кривых чувствительности приемников может быть сведена к задаче указания трех цветов, соответствующих возбуждению только одного из трех приемников; эти приемники и вошло в привычку называть по соответствующему цвету. Таково настоящее определение того, что понимается, когда называют приемники по соответствующим основным цветам.

Однако имеется одно обстоятельство, которое многих, по-видимому, вводит в заблуждение. Кривые чувствительности приемников, указываемые обычно, таковы, что к р и в а ч у в - с т в и т е л ь н о с т и «синего» п р и е м н и к а напоминает к р и в у ю п р о п у с к а - н и я синего вещества; аналогично и с другими двумя приемниками. Отсюда, видимо, рождается неоднократно воспроизводимая разными авторами идея, что если взять приемник, кривая чувствительности которого имеет максимум в желтой части спектра, то соответствующий приемнику «основной цвет» будет «желтым». (см., напр., [3]). Эти соображения основаны исключительно на плохом знании связи, которая существует между выбором основных цветов и формой кривой чувствительности соответствующих приемников. Не имея возможности здесь приводить доказательства, укажу на эти взаимоотношения догматически, предлагая желающим проверить хотя бы на нескольких примерах правильность нижеследующих утверждений. Стро-

гое математическое их доказательство есть непосредственное следствие формул преобразования координат векторного пространства.

Первым долгом следует сказать, что форма кривой спектральной чувствительности какого-либо приемника зависит совершенно не от того, как выбран тот основной цвет, по которому назван приемник, а исключительно от того, как выбраны два других основных цвета (точнее, от положения в плоскости цветового треугольника прямой, соединяющей точки двух других основных цветов).

Так, например, предположим, что в обычной трехцветной системе, например, той, какую указывает Кёниг [11], мы заменим «основной красный» на желтый спектральный, который считается «первичным желтым» (Urgelb). Кривые чувствительности приемников при этом будут следующие: кривой «желтого» приемника будет, без всяких изменений, та самая кривая, которая в прежней системе была кривой чувствительности красного приемника, кривая синего приемника останется без изменения (так как выбранный желтый лежит в треугольнике на той же прямой, что зеленый и красный), и кривая чувствительности зеленого приемника изменится чрезвычайно резко, причем для всей красно-оранжевой части спектра эта кривая будет иметь довольно большие отрицательные значения. Если бы мы заменили на тот же желтый основной зеленый, оставив синий и красный, как у Кёнига (т. е. взяли бы систему: синий, желтый, красный), то кривой желтого приемника сделалась бы та кривая, которая в системе Кёнига является «зеленой», а кривая чувствительности красного приемника оказалась бы новой, имеющей отрицательные значения для всех длин волн более коротких, чем длина волны выбранного желтого.

Если бы мы в системе кривых чувствительности Кёнига заменили кривую «красного» приемника другой с максимумом чувствительности в желтой части спектра — такую кривую очень часто считают якобы кривой «желтого приемника», — а две другие кривые оставили те же, что у Кёнига, то «основные» цвета, соответствующие таким кривым, будут таковы: основной синий и основной красный останутся те же, что у Кёнига, а основной зеленый изменится, но не в сторону желтого, а в прямо противоположную сторону. Никакого «основного желтого» в этой системе не будет. Введение «желтого приемника» в качестве четвертого, как это было уже доказано, либо должно было повести к четырехмерному цветовому многообразию, либо работа этого приемника ничего не прибавляла бы к обычному трехмерному зрению.

В дополнение к этому укажем на обстоятельство, показывающее, что желтый спектральный, который обычно указывают как «первичный желтый» (Urgelb), не сомненно соответствует одновременному возбуждению по меньшей мере двух первичных приемников. Как известно, как раз в желтой части спектра можно получить цвет, не отличающийся от желтого монохроматического, путем смешения двух длин волн, расположенных по обе стороны от данного, как, например, в уравнении Релея, когда мы получаем желтый путем одновременного действия зеленого и красного спектральных. То же можно получить смешением зеленого с оранжевым или оранжевого с желто-зеленым. Смешиваемые излучения во всяком случае возбуждают различные приемники, а потому, так как приемники аддитивны, смесь излучений, дающая желтый цвет, наверно возбуждает по меньшей мере два приемника, те, которые возбуждаются складываемыми излучениями. Таким образом, факт существования уравнения Релея является безусловным доказательством, что желтый спектральный цвет соответствует сложному возбуждению.

6. Рассмотрим теперь в свете изложенного различные теоретические высказывания о механизме цветного зрения, встречающиеся в литературе. В основном это будут высказывания, группирующиеся вокруг идей Геринга, а также те, которые были в последнее время порождены работами шведского физиолога Рагнара Гранита [3...6]. Эти высказывания близко стоят к теме настоящей работы тем, что их содержание целиком относится к работе первичного воспринимающего аппарата, где под действием света протекает чисто физический процесс превращения энергии. Наоборот, теория зон, выдвинутая Крисом, нами не рассматривается, так как она принимает для периферических приемников все положения трехцветной теории, а выдвигает дополнительные гипотезы только в отношении центрального аппарата.

Первым долгом необходимо подчеркнуть, что упомянутые выше теоретические высказывания обычно не дают полной картины работы приемников под действием света, в особенности, когда этот свет обладает сложным спектральным составом; между тем, монохроматический свет мы можем видеть только в специальных приборах, в жизни же всегда имеем дело только со светом сложного состава. В то же время, первой и самой важной задачей всякой теории зрения является установление связи между объективным, вне нас происходящим явлением, и вызываемым

им физиологическим процессом. Трехцветная теория, независимо от того, верна она или нет, позволяет для любого излучения ответить на вопрос, каковы будут вызываемые им возбуждения приемников, и обратно, если назвать возбуждения приемников, то можно совершенно точно указать, а если нужно, то и показать в точности тот цветовой оттенок, который соответствует таким возбуждениям. Если же взять, например, высказывания Хартриджа [10], который на основании работ Гранита высказался в пользу не менее чем семи приемников, то в них вообще не содержится ничего, что позволило бы составить себе представление, как же должны быть возбуждены приемники, когда мы видим тот или иной вполне определенный цветовой оттенок. В частности, остается неясным, каким образом могло случиться, что при семи независимых приемниках многообразие видимых нами цветов оказалось трехмерным.

Теория Геринга в том виде, в каком она была высказана им самим, вообще не содержит никаких определенных количественных данных, а только некоторые замечания общего характера. Первым делом следует заметить, что, хотя теория Геринга и называется «четырёхцветной», в ее основе лежит представление о трех приемниках, как и в случае трехцветной теории. Эти приемники: черно-белый, красно-зеленый и сине-желтый. В соответствии с этим число основных цветов этой системы равно, собственно говоря, шести, а не четырем. Мы уже говорили, что существование фотохимических реакций ассимиляции и диссимиляции, могущих компенсировать друг друга, представляется невозможным с энергетической точки зрения. Таких фотохимических реакций не существует и, по-видимому, не может существовать.

В работах самого Геринга отсутствуют количественные данные, и потому естественно ставится вопрос о подведении под эту теорию количественной базы. Возможность этого как будто доказывается существованием интерпретации теории Геринга, слегка намеченной в одной из работ Шредингера [12]. С математической точки зрения идея Шредингера безупречна, но в ней очень мало осталось от теории Геринга. То, что предлагает Шредингер, есть трехцветная система, отличающаяся от обычной только выбором основных цветов. Этих основных цветов также только три, из которых один белый. Что касается двух других основных цветов, то они должны быть выбраны по одному из двух геринговских пар: красный—зеленый и синий—желтый. Таким образом, в этой системе, если в качестве основного будет выбран желтый, то синий уже не будет основным; если красный — основным, то зеленый основным не будет, и обратно. В частности, желтый и синий цвета, или красный и зеленый в интерпретации Шредингера, вовсе не будут получаться при протекании в одном веществе процесса в разные стороны, а один из цветов каждой из пар будет результатом одновременного возбуждения по меньшей мере двух приемников. Интерпретация Шредингера влечет за собой еще целый ряд следствий, которые едва ли согласился бы принять Геринг или его последователи. Так, например, если в качестве основного взять желтый, бело-черный приемник будет чувствителен, главным образом, к синим лучам. Если же принять за кривую бело-черного приемника кривую видности, то желтый вообще не может быть в числе 70 основных цветов. Особенно же следует подчеркнуть, что в интерпретации Шредингера во всех ее вариантах черному цвету соответствует отсутствие возбуждения приемников, а отнюдь не процесс диссимиляции бело-черного приемника.

Другая попытка подведения количественной базы под теорию Геринга была сделана Брюкнером [2]. Брюкнер исходил из так называемых «Urfarben», находимых путем чисто субъективных оценок, но почему-то обязательно среди монохроматических цветов. Это очень существенно, так как, если бы в качестве Urfarben были взяты не монохроматические цвета, количественные результаты были бы совершенно иными. Между тем получается, что при нахождении Urfarben их насыщенность взята по чисто физической характеристике света (монохроматичность), а цветовой тон из чисто субъективной установки. Едва ли в этом есть какая-либо логика. Еще хуже обстоит с самими экспериментами. Производя попарные смешения монохроматических излучений с одним из «первичных», он находит соотношение, при котором эта смесь будет равна другому «первичному» только по цветовому тону. Таким образом, Брюкнер строит две спектральные кривые, которые почему-то считает кривыми спектральной чувствительности приемников. К этому нет решительно никаких оснований. Как уже указывалось, понятие спектральной чувствительности неразрывно связано с аддитивностью. В соответствии с этим для нахождения кривых сложения, которые могут быть кривыми спектральной чувствительности, используются опыты с установками на полное равенство, для которых аддитивность имеет место, что специально доказано экспериментально. Используемые же Брюкнером установки на равенство по цветовому тону заведомо не аддитивны. В самом деле, прибавляя к какому-либо цвету цвета, одинаковые только по цветовому тону (но различной яркости и насыщенности), мы не будем получать цвета, равные по цветовому тону. Таким образом, аддитивность цветовых тонов не только не доказана, но и за-

ведомо нарушается самым решительным образом. Поэтому найденные Брюкнером кривые нет основания считать кривыми чувствительности приемников.

Следует отметить и то, что Брюкнер находит таким путем только две кривые, что недостаточно для объяснения цветного зрения, которое трехмерно. Если взять для третьего бело-черного приемника кривую видности, как это, по-видимому, склонен делать автор, то, как легко видеть, желтый монохроматический, помимо желто-синего приемника, будет очень сильно возбуждать белый приемник, т. е. желтый спектральный является не основным, а смесью желтого и белого, что прямо противоречит тем предположениям, на которых основана вся работа.

7. Теперь обратимся к работам Р. Гранита, которые произвели в последние годы большое впечатление и в самом деле являются замечательными во многих отношениях. Эти работы основаны на совершенно виртуозной, насколько могу судить, хирургической технике. Гранит, как известно, облучал монохроматическим светом разных длин волн сетчатку различных животных и регистрировал при помощи введенного в зрительный нерв микроэлектрода возникающие в отдельных волокнах электрические импульсы. Значение подобных работ, конечно, очень велико. Оно заключается в том, что все те данные, о которых говорилось до сих пор, хотя и позволяют с большой степенью достоверности установить чисто физические характеристики первичных приемников, но совершенно не в состоянии вскрыть физиологическую природу зрительного процесса. Работы, подобные проведенным Хартлейном [8] или Гранитом, вскрывают как раз эту сторону вопроса.

Однако Гранит, а за ним и другие, как, например, Хартридж [9,10], не ограничиваются этим, а склонны вывести из этих опытов заключения, касающиеся, в первую очередь, чисто физических характеристик светочувствительных приемников, которыми обусловлено цветное зрение человека. В первую очередь это касается вопроса о числе различных приемников и их кривых спектральной чувствительности. Именно в этой части мы хотим подвергнуть эти работы критике.

Первым делом рассмотрим, чего вообще можно достигнуть анатомическим путем. Допустим, что полученные анатомически данные приводят с полной необходимостью к приемникам иным, чем те, о которых говорилось выше, причем расхождения заведомо не могут быть сведены к ошибкам опыта. Тогда единственный вывод, какой можно было бы из этого сделать, был бы тот, что зрение исследованных животных отличается от зрения человека или что обнаруженные анатомическим путем приемники не те, которыми обусловлено цветное зрение. Приведу грубый пример. Допустим, анатомические исследования обнаружили приемники, чувствительные к тем лучам спектра, которые, как показывает непосредственное наблюдение, глаз вообще не видит, и, наоборот, не чувствительные в видимой части спектра. Ведь нельзя же было бы на этом основании пересмотреть вопрос о том, какие длины волн способен видеть наш глаз!

То же самое и с формой кривых чувствительности. По найденной кривой чувствительности всегда легко рассчитать, как будет действовать на глаз свет любого сложного спектрального состава. Если кривые спектральной чувствительности приемника не принадлежат к числу кривых сложения, то, как уже говорилось, можно найти бесчисленное множество таких спектральных составов, которые будут одинаковы по цвету, но оказывать на такие приемники различное действие, и обратно. Совершенно очевидно, что такие приемники не могут быть приемниками, обуславливающими цветное зрение человека, если только расхождения превышают точность, с какой мы производим визуальные установки на равенство. Эти соображения показывают, что анатомические исследования, как бы они ни были тщательны, могут, может быть, помочь выбрать среди кривых сложения истинные кривые чувствительности приемников, но принципиально не могут привести к отказу от них.

Теперь обратимся к работам Гранита и выводам из них. В первых своих статьях он пришел к заключению, что его исследования полностью подтверждают трехцветную теорию. Однако впоследствии он, видимо, изменяет свою точку зрения. Так, например, он пишет: «Несмотря на значительный опыт в регистрации отдельных волокон, я никогда не видел трех «кривых основных возбуждений», но только доминаторы и узкие модуляторы, расположенные в трех преимущественных областях» [5]. Или «...Модуляторы... представляют собой более тонкий механизм, чем он представляется трехцветной теорией... Природа использует большее число первичных, по крайней мере шесть или семь модуляторов» (там же, стр. 713). На основании работ Гранита Хартридж также высказывается в пользу по крайней мере семи приемников, кривые чувствительности которых явно чрезвычайно далеки от кривых сложения.

Поистине поразительно, что эти построения совершенно игнорируют работу человеческого глаза. Если бы приемники были таковы, как говорит Гранит или Хартридж, то многообразие

видимых нами цветов было бы по меньшей мере семи измерений. И несмотря на обилие приемников, так как их кривые в действительности резко отличаются от кривых сложения, можно подобрать излучения такого спектрального состава, которые будут одинаково возбуждать все эти семь приемников и будут заметно отличаться по цвету. Таким образом, каковы бы ни были эксперименты, выводы из них безусловно не верны.

Однако и те количественные данные, из которых сделаны эти выводы, вызывают очень серьезные сомнения. Они получены из опытов, направленных на решение довольно обычной с физической точки зрения задачи, а именно задачи определения спектральной чувствительности приемников, каковыми были в данном случае сетчатка с отходящими от нее нервными волокнами. К сожалению, техника этих, по существу чисто физических, измерений по своему низкому уровню стоит в самом трагическом противоречии с хирургической виртуозностью. По видимому, Гранит не только не был сам знаком с подобного рода физическими измерениями, но и не пользовался достаточно квалифицированной консультацией.

Первым долгом следует иметь в виду, что производилось определение абсолютной спектральной чувствительности, т. е. работа велась путем непосредственной регистрации реакции приемника, а не путем нуль-установки. Такого рода спектрофотометрические измерения, как известно, особенно трудны и таят в себе много источников всевозможных ошибок, которые неискушенному исследователю трудно предусмотреть. О том, какая применялась аппаратура, и как проводились самые измерения в тех работах, с которыми нам пришлось познакомиться, говорится крайне глухо.

Однако более всего возражений вызывает измерение спектральной чувствительности по порогу. Даже при определении кривых чувствительности приемников, гораздо менее подверженных посторонним влияниям, как, например, фотопластинка или фотоэлемент, определение абсолютной спектральной чувствительности по порогу не может дать сколько-нибудь надежных данных. Причин этому много. Как бы тщательно ни был поставлен опыт, посторонние воздействия, искажающие результаты, всегда возможны. Поэтому всегда стараются при определении спектральной чувствительности работать с возможно более сильными воздействиями, на которых всякие помехи сказываются мало. Вести измерения по порогам означает проводить их в самых невыгодных условиях, какие только можно придумать.

Кроме того, как бы хорошо для приемника ни соблюдалась аддитивность там, где он фактически уже перестает работать, всегда возможны относительно (по отношению к измеряемой величине) довольно значительные нарушения аддитивности, а при этих условиях понятие спектральной чувствительности теряет смысл, и форма найденной кривой будет зависеть от интенсивности действующего света. Поэтому найденная по порогам кривая может сильно отличаться от той, которая характеризует приемник при нормальных условиях его работы, а не на пределе его чувствительности.⁴

Для такого приемника, как орган зрения, определение спектральной чувствительности по порогу особенно сомнительно. Понятие спектральной чувствительности связано с аддитивностью и выражается реакциями приемника на монохроматический свет при условии, что эти реакции выражены в единицах, пропорциональных интенсивности. Установки на равенство, при помощи которых определяются кривые сложения, и единицы, в которых мы их выражаем, удовлетворяют этим условиям,— это специально доказывается экспериментально. Того же совершенно нельзя сказать про пороги. Если же те пороги, которые регистрировались, стоят в какой-то связи с визуальными порогами, то это тем более вызывает сомнения, так как пороги визуального различения стоят в весьма сложной связи с интенсивностью и цветом излучений.

Всё сказанное усугубляется своеобразным характером реакций исследуемых приемников. Регистрируемые в качестве реакции приемника периодические электрические импульсы в зависимости от интенсивности действующего света не изменяют своей интенсивности, а меняют только частоту. Правда, Хартлейн [8] описывает волокна трех родов. В одних действие света вызывает серию импульсов, повторяющихся всё время, пока действует свет. В других наблюдается группа импульсов только вслед за включением или выключением света. Гранит специально оговаривает, что волокна последнего рода он не рассматривает. В волокнах первого рода с интенсивностью изменяется частота, так что импульсы при очень слабом освещении стано-

⁴ В прениях по сделанному мной докладу один из присутствующих — т. Друккер — сделал одно важное замечание. Он указал, что вообще пороговое возбуждение никогда не может считаться характерным для рецептора, так как оно относится не к тем возбуждениям, при которых протекает нормальная работа рецептора, а к тем, где рецептор уже начинает отказывать в работе.

вятся все более и более редкими. Совершенно непонятно, что же в таком случае следует считать порогом. Гранит этого не поясняет. Так как в волокне иногда появляются импульсы, не связанные с освещением, как это видно из получаемых осциллограмм, то при очень слабых «пороговых» освещенностях такие «посторонние» импульсы не могут не исказить результатов очень сильно.

Гранита всё это мало, видимо, беспокоит, так как он рассчитывает исправить всё при помощи статистики. Количество проводимых им опытов грандиозно. Так, для определения одной только кривой, и притом по весьма малому числу точек, он производит промеры тысячами. Затем из них выводятся средние, и это должно обеспечить исключение всех посторонних влияний. Это, конечно, весьма превратное представление о возможностях статистических методов. Если при проведении опыта не были приняты меры для устранения влияния побочных факторов, правильных результатов нельзя достигнуть одной статистикой. Дело в том, что, помимо так называемых «случайных» колебаний, посторонние причины могут вызывать систематические ошибки, которые статистика устранить не может и даже усугубляет. Если бы дело обстояло иначе, не было бы нужды в сложных и дорогих установках, а достаточно было бы хотя бы самым несовершенным прибором произвести очень много опытов, чтобы получить сколь угодно точные результаты.

Конечно, критиковать легче, чем делать, и я вполне отдаю себе отчет в тех громадных трудностях, которые пришлось преодолеть, чтобы сделать возможными оцениваемые нами сейчас опыты. Но тем досаднее, что в них труды в очень сильной степени обесценены недочетами, которые было бы нетрудно устранить. Например, если бы измерения велись не по порогам, а по реакции на более сильное воздействие, измерения были бы и легче и неизмеримо точнее и такое грандиозное количество опытов было бы совершенно ненужным.

Рассмотрим теперь полученные результаты и то, в какой мере они оправдывают высказанные сомнения. К сожалению, получилось как раз то, что следовало ожидать. Мы, конечно, не знаем, насколько был велик разброс точек при отдельных измерениях, однако указание, что для определения одной кривой производились тысячи измерений, чрезвычайно выразительно. Такое количество опытов было бы явно бессмысленным, если бы отклонения отдельных отсчетов от среднего не были чрезвычайно часты и велики. Статистическая обработка не устраняет систематических отклонений, которые могли изменяться изо дня в день. Причиной таких отклонений могли быть, например, колебания температуры или влажности. Кроме того, широко известна способность живых тканей чрезвычайно резко реагировать на присутствие ничтожнейших следов тех или иных веществ и т. п.

Такие или другие посторонние факторы легко могли привести к тому, что при повторных промерах, делаемых в разные дни, получались несколько различные кривые чувствительности. Все кривые, которые Гранит считает различными модуляторами одной группы, например три «зеленых» модулятора, безусловно представляют собой просто результат расхождений при повторном промере кривой чувствительности того же самого приемника. Такого порядка расхождения не представляют собой ничего удивительного при определении абсолютной спектральной чувствительности по порогу возбуждения. Это тем более вероятно, что проверку воспроизводимости метода изо дня в день провести было невозможно, так как при вторичном введении микрозонда никогда нельзя быть уверенным, что он попал на волокно, идущее от того же самого приемника. Это позволяло Граниту каждый раз, когда он сталкивался с плохой воспроизводимостью результатов, вызванную неудовлетворительной методикой, решать, что это приемник (модулятор) нового типа. Характерно, что эти «различные» модуляторы не различаются четко, так как Гранит говорит об их числе довольно неуверенно: «по крайней мере, шесть-семь модуляторов».

В заключение остановимся на теоретических высказываниях Гранита. Он представляет себе дело так, что существуют доминаторы с кривой, совпадающей с кривой видности, и гораздо более редкие, но разнообразные по типам модуляторы. Относительно доминаторов он пишет: «...доминатор отвечает ощущению яркости, которое, таким образом, является нашим доминирующим ощущением, как и должно быть от доминирующего рецептора». Впрочем, в другом месте сказано: «Доминатор рассматривается как порождающий ощущение белого». Эти два определения роли доминаторов постоянно чередуются в той или иной форме. Я не знаю, есть ли надобность доказывать, что ощущение яркости и ощущение белого совсем не одно и то же. Кроме того, белый свет, как показывают кривые чувствительности модуляторов, возбуждает также и модуляторы. Между тем, про эти последние Гранит пишет: «Модуляция ощущения яркости в цвет представляется задачей гораздо более редких модуляторов». Всё это едва ли имеет какой-либо вполне определенный смысл. К сожалению, этими весьма неопределенными выска-

званиями дело и ограничивается. Остается совершенно неясным вопрос, какой цвет мы должны видеть при одновременном возбуждении нескольких различных модуляторов. Ответы на эти вопросы важны по той причине, что при первой попытке ответить на них становится очевидной несовместимость трехмерного многообразия цветов с наличием такого большого числа приемников, как указывает Гранит.

Любопытно, что «Гранит считает трехцветную теорию первым приближением к своей «более совершенной» теории, между тем его знакомство не только с трехцветной теорией, но и с фактами, на которых она основана, крайне поверхностно. Он пишет: «Трехцветная теория должна быть рассматриваема как подходящее первое приближение, выражающее спектральные области, покрытые тремя группами модуляторов в виде грубого усреднения. Существование семейств модуляторов, расположенных в трех преимущественных спектральных областях, создает необыкновенную способность глаза различать цвета». Не совсем ясно, известно ли Граниту, что многообразие цветов трехмерно, а потому для различения цветов не только в спектре, но и любых вообще цветов достаточно трех рецепторов, а большее их число создавало бы действительно необыкновенную способность различать такие качества излучения, которые человек визуально не различает. Интересно, однако, заметить, что, так как кривые модуляторов очень сильно отличаются от кривых сложения, можно подобрать излучения такого спектрального состава, что они будут совершенно одинаково возбуждать все семь или даже больше приемников Гранита, включая все модуляторы и доминатор, и все же будут весьма различны по цвету.

Идея «усовершенствования» трехцветной теории, по-видимому, связана со следующим недоразумением. Гранит, видимо, думает, что если заменить какой-либо приемник двумя или тремя такими, чтобы сумма их кривых чувствительности равнялась кривой чувствительности заменяемого, то от этого мало что изменится. Так, например, в одной из своих более ранних работ, где он, как сам считал, еще придерживался трехцветной теории, он, помимо доминатора, берет три кривые чувствительности примерно те, какие приводятся обычно, но предлагает одну из них — «красную» — разделить на две: одну «собственно красную» с максимумом чувствительности в длинноволновой части спектра, а другую с максимумом в желтой части спектра. Этот второй приемник Гранит называет «желтым». Мы уже указывали, что между положением максимума чувствительности приемника и соответствующим «основным цветом» нет абсолютно никакой связи. Несостоятельность подобных построений легко установить. В самом деле, если взять значения ординат кривых сложения для литиевой и таллиевой линий и сложить эти ординаты в той пропорции, в какой эти линии смешиваются в уравнении Релея, то мы получим числа, в точности соответствующие значениям кривых сложения для линии натрия, что служит объяснением возможности этого уравнения. Если же проделать ту же операцию, разделив «красную» кривую на две или взяв более позднюю систему Гранита с семью модуляторами, то нетрудно убедиться, что смесь литиевой и таллиевой линий возбуждает не те модуляторы, которые возбуждает линия натрия.

Аналогично тому, как в начале было сделано расщепление на две «красной» кривой чувствительности, Гранит впоследствии думал усовершенствовать трехцветную систему еще более, разделив и остальные кривые чувствительности. В дополнение к сказанному, укажу еще пример того, к чему это может привести. Как известно, кривая видности может быть представлена как сумма трех кривых чувствительности, однако один приемник с такой кривой позволил бы различать только яркость, а три приемника позволяют осуществлять цветное зрение. Одно явно неэквивалентно другому.

Мы считаем, что опыты Гранита, по-видимому, позволили правильно нащупать три спектральные области, соответствующие областям чувствительности трех приемников глаза. Это чрезвычайно важный результат. Что же касается формы кривых чувствительности этих приемников, опыты были явно недостаточно точны, а что касается доминаторов, то, возможно, эти измерения соответствуют волокнам, к которым присоединены первичные приемники целой группой; возможно, что они соответствуют тому случаю, когда микроэлектрод касался не одного, а сразу нескольких волокон. Сомнения вызывает особенно то обстоятельство, что подавляющее большинство измерений давало кривые доминаторов. Если бы приемники, определяющие цветное зрение, были столь редки, то зрительное поле не могло бы быть равномерным. Теоретические же претензии Гранита или опиравшегося на его работы Хартриджа на то, что они усовершенствовали трехцветную теорию, совершенно лишены оснований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н.Д. Нюберг. Измерение цвета и цветовые стандарты. Изд. Стандартизация, 1933.
2. A. Brückner. Zur Frage der Eichung von Farbensystemen. Zschr. Sinnesphysiologie, 58, № 6, 1927, стр. 322.
3. R. Granit. The retinal mechanism of color reception. Journ. Opt. Soc. Am. 31, № 9, 1941, стр. 570.
4. R. Granit. Physiological theory of colour reception. Nature 151, № 3818, 1943, стр. 11.
5. R. Granit. Isolation of the mammalian colour receptors with microelectrodes. Nature 166, № 3946, 1945, стр. 711.
6. R. Granit. The colour receptors of the mammalian retina. Journ. Neurophysiologie 8, № 3, 1945, стр. 195—210.
7. H. Grassmann. Zur Theorie der Farbenmischung. Gesam. Abhandl., Bd. II.
8. H. Hartline. Nerve messages in the fibers of the visual pathway. Journ. Opt. Soc. Am. 80, № 6, 1940, стр. 239.
9. H. Hartridge. Physiology of colour vision. Nature 151, № 3838, 1943, стр. 422.
10. H. Hartridge. Physiology of colour vision. Nature 162, 1943, стр. 190.
11. A. König. Die Grundempfindungen in normalen und anormalen Farbensystemen. Gesammelte Abhandlungen. Leipzig, 1903.
12. E. Schrödinger. Grundlinien einer Theorie der Farbenmetrik im Tagessehen. Ann. Phys. 63, 1920.