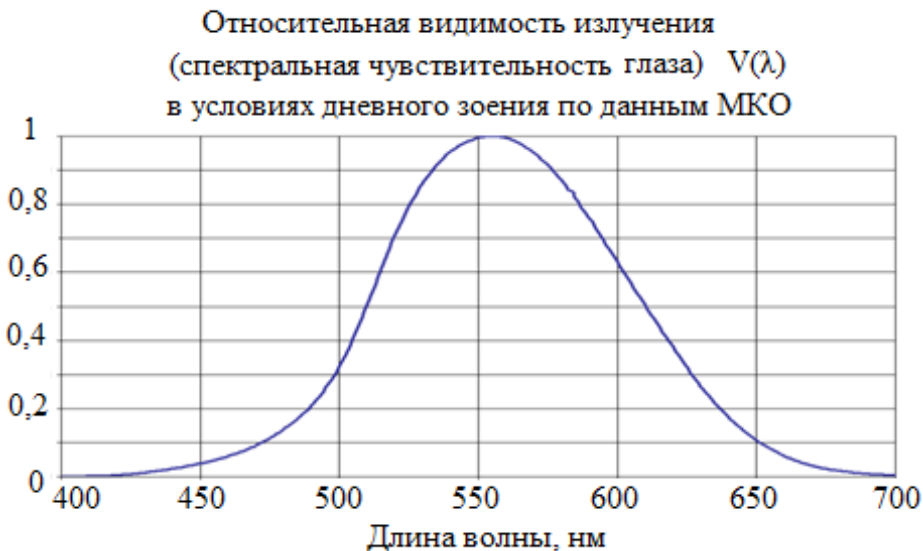


*Рис. 2.1. Схема строения глаза человека:  
 а — роговая оболочка; б — хрусталик; в — мышцы хрусталика;  
 г — радужная оболочка; д — сосудистая оболочка; е — сетчатая оболочка; ж — центральная ямка сетчатки; з — слепое пятно; и — зрительный нерв. [16]*



*Рис. 2.2. Светочувствительные клетки сетчатки глаза человека*



*Рис. 2.3. Относительные чувствительности палочек определяют спектральную чувствительность глаза при ночном зрении. Эта кривая на рисунке не приведена — она подобна по форме, но ее максимум смещен в коротковолновую область (~510 нм)*

Спектральные характеристики приемников  
глаза среднего стандартного наблюдателя  
Яркостные коэффициенты  $L_k : L_z : L_c = 1 : 0,655 : 0,03$

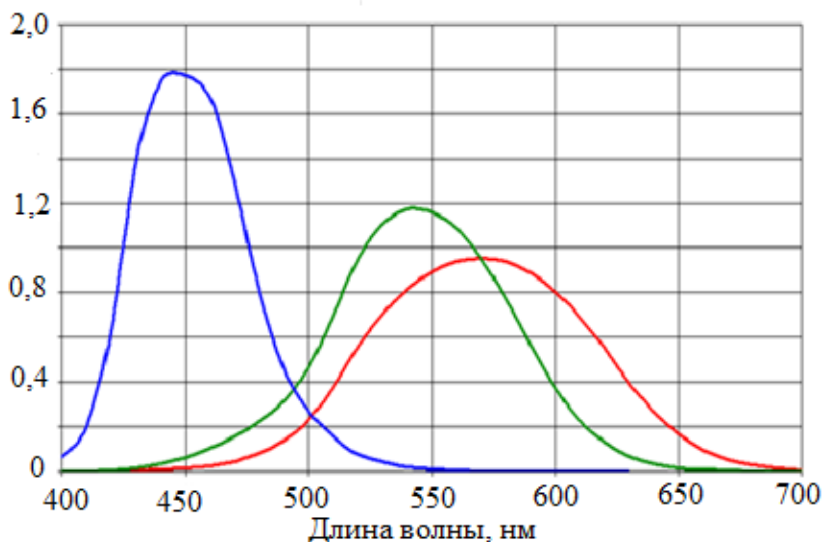
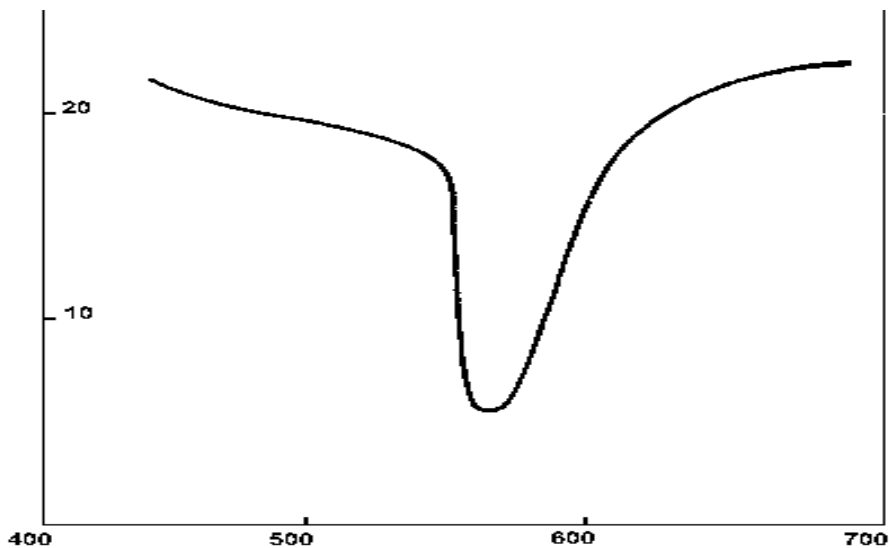
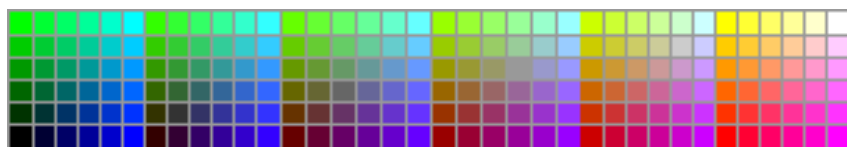


Рис. 2.4. При действии света преимущественно на колбочки одного типа возникает ощущение определенного цвета; соответственно, **красного, зеленого и синего** цвета. Поэтому, для краткости, группы колбочек называют **КЗС-приемниками**, а кривые, представленные на рисунке выше, называют **кривыми основных возбуждений**



*Рис. 2.5. Число пороговых различий чистоты цвета (числа ступеней насыщенности между белым и чистым спектральным) в зависимости от цветового тона (длины волны).*



*Рис. 2.6. Пример цветковых эталонов [30].*

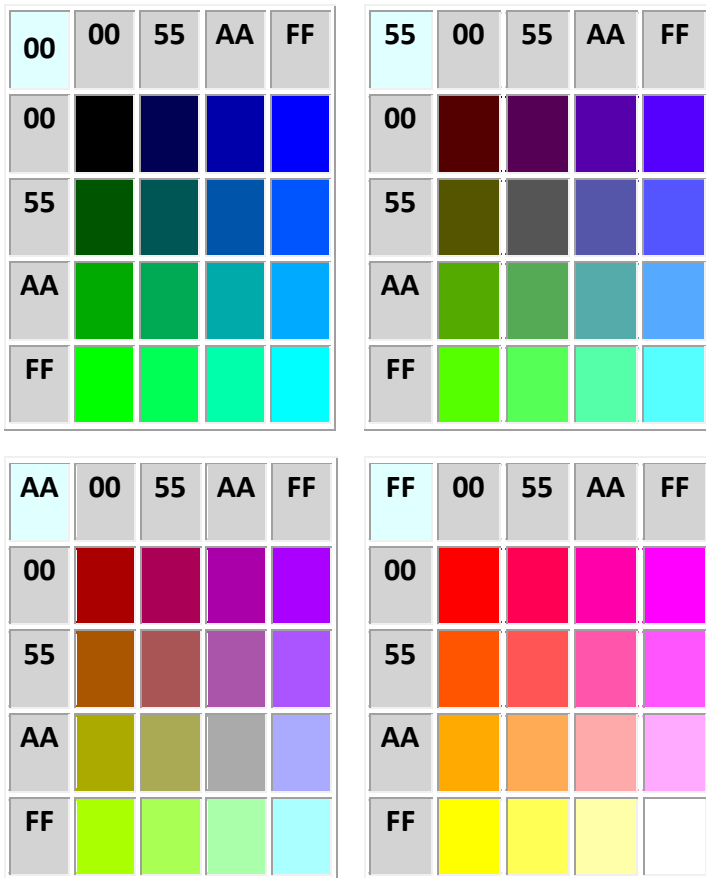


Рис. 2.7. Пример цветовой таблицы атласа [30]

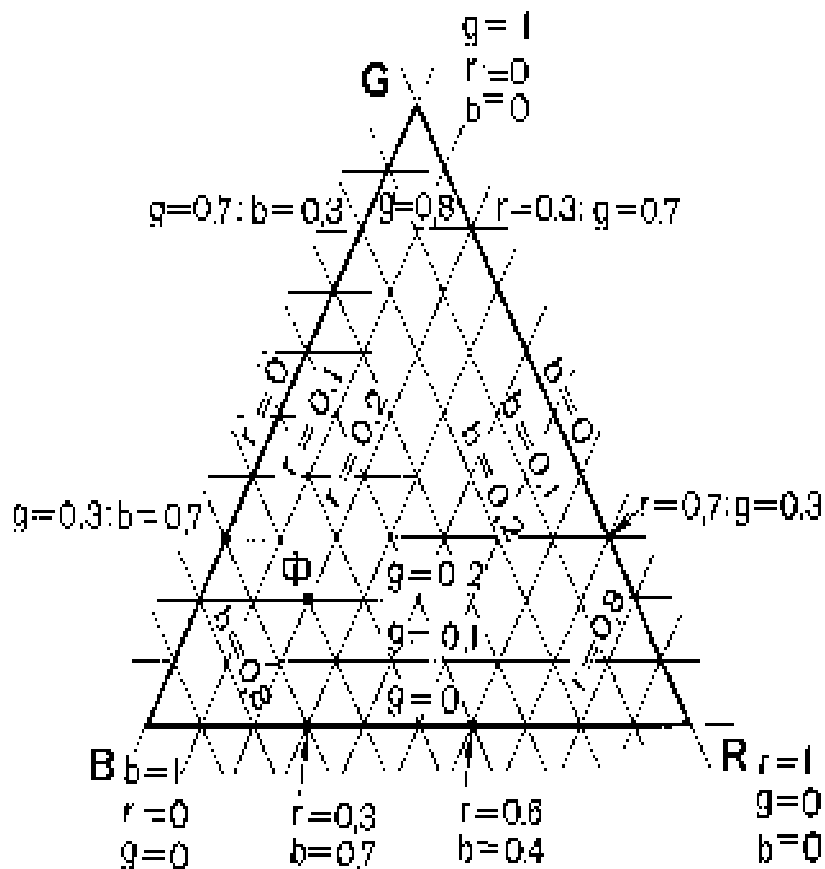


Рис. 2.8. Цветовой треугольник [14]

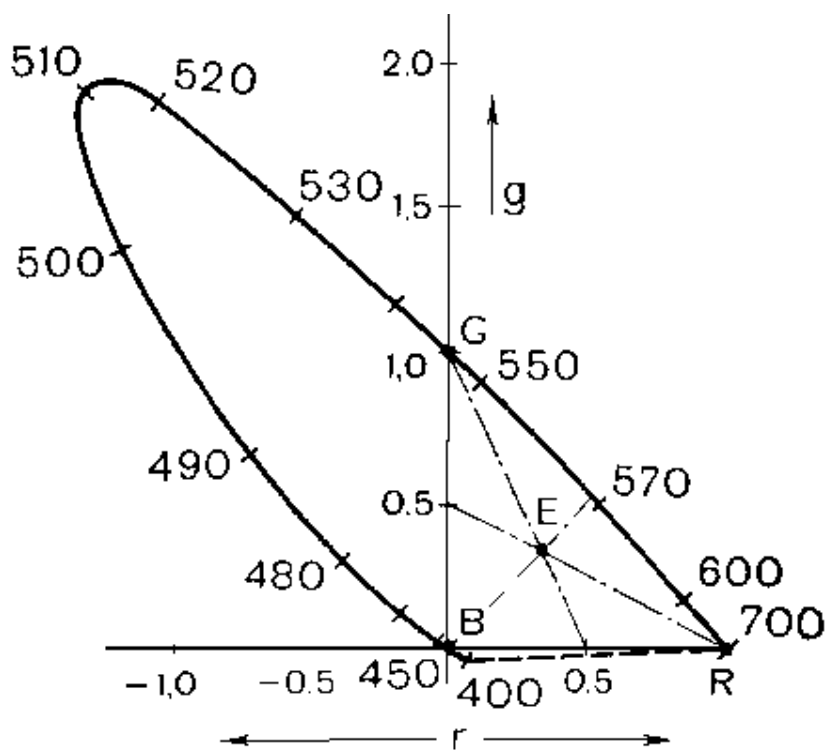


Рис. 2.9. Цветовой график

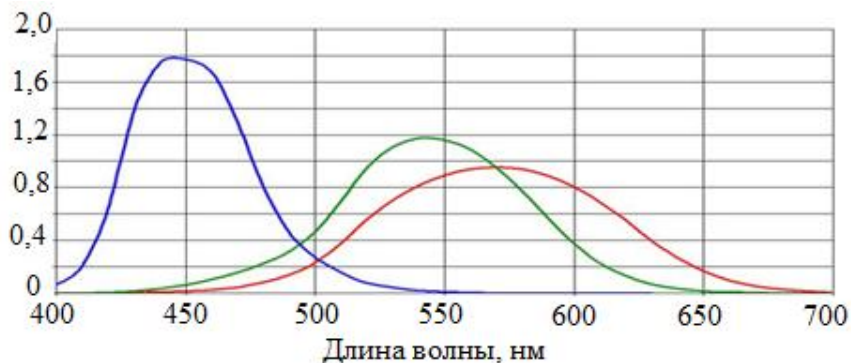


Рис. 2.10. Спектральные характеристики чувствительности приемников глаза стандартного наблюдателя. Яркостные коэффициенты  $L_K : L_3 : L_C = 1 : 0,655 : 0,003$

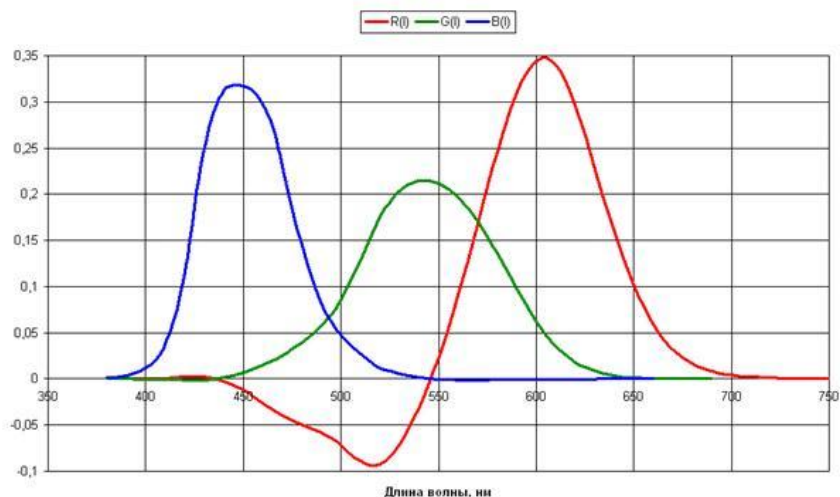


Рис. 2.11. Функции сложения цветов RGB, принятые Международной Комиссией по Освещению (МКО). Яркостные коэффициенты  $L_R : L_G : L_B = 1 : 4,5907 : 0,0601$  [16]



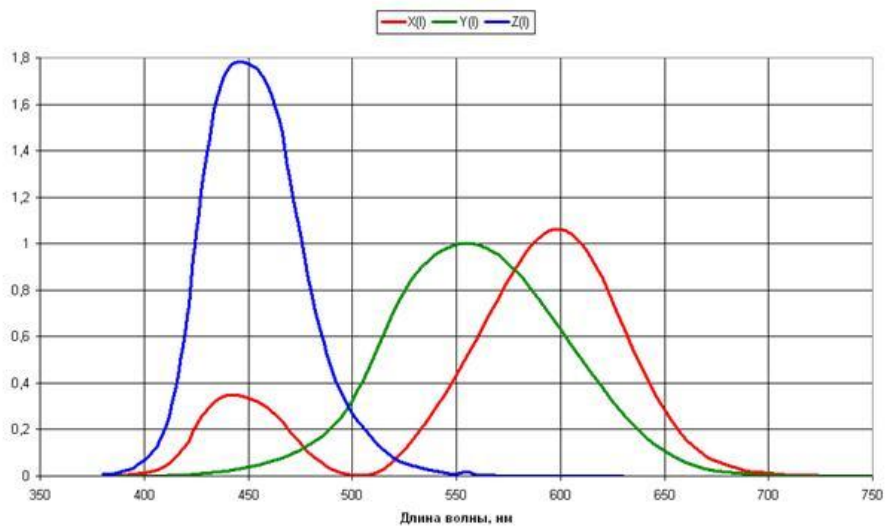


Рис. 2.12. Кривые сложения цветов в системе XYZ МКО при источнике E. Яркостные коэффициенты  $L_X : L_Y : L_Z = 0 : 1 : 0$

### **3. История развития науки измерения света и цвета**

Исключительно велика роль цвета в жизни и деятельности каждого отдельного человека и общества в целом: в промышленности, транспорте, искусстве, современной технике передачи информации и т.д. В быту и на производстве цвета и их сочетания интенсивно используются как символы, заменяющие целые понятия в правилах поведения. Так, сигнальные огни того или иного цвета на транспортных магистралях разрешают или запрещают движение, предупреждают, требуют внимания. В промышленности и др. коллективной деятельности цвета как символы применяются для маркировки трубопроводов с различными веществами или температурами, различных электропроводов, всевозможных жетонов, информационных карт, банковских документов, денежных знаков, спецодежды и др. В промышленности и быту цвет является одним из основных факторов производственного и бытового комфорта. Изучение психологического воздействия определенных сочетаний цветов - цветовых гармоний - составляет предмет эстетики цвета. Цветовые гармонии широко используются как в искусстве, так и при организации производственных процессов для создания психологических акцентов, обеспечивающих увеличение производительности труда и уменьшение утомляемости работников,

а также бытовой комфорт, способствующий активному и наиболее полноценному отдыху. Особо важное значение цвет имеет для повышения качества и стандартности промышленной продукции. Как показатель высокого качества продуктов цвет незаменим в случаях, когда другие объективные или субъективные методы по тем или иным причинам нельзя применить, либо когда их применение требует длительной и трудоёмкой работы или дорогостоящей аппаратуры. Поэтому широкое распространение получили компараторные методы идентификации цвета многих пищевых продуктов и веществ, используемых в химической, лёгкой и пищевой промышленности, а также в других областях народного хозяйства. Для практического применения этих методов выпускаются различные цветные таблицы, атласы, образцы красок, компараторы, колориметры, цветные фотометры и денситометры.

С 17-го по 19-е столетия многие известные ученые занимались развитием практической фотометрии. Среди них были математики, астрофизики, физики, теологи и философы. Основанием для этого было то, что оптические параметры уже использовались в оптике, спектроскопии, астрофизике, генерации света, измерениях цвета и физиологии, а светоизмерительная техника еще отсутствовала. Теоретической базой при этом служил трактат Ламберта по фотометрии (1760) [17,18].

Трудности в развитии практической фотометрии в то время, в частности, характеризует следующее. Еще отсутствовали оптические датчики, и для измерения светотехнических и цветовых параметров использовались лишь глаза. Не было и эталонных источников света (ИС). В про-

тивоположность тому, интенсивно развивалось производство приборов оптики и точной механики. Физики, и прежде всего Отто Люммер, смогли развить и распространить основы теории света на ИС и источники излучения. Были созданы основы осветительной техники, касавшиеся и соответствующей метрики. При этом в конце 19-го – начале 20-го столетий было много усилий по развитию фундаментальной фотометрии. В отсутствие физических приемников для измерения световых и лучистых параметров использовалась контрастная чувствительность человеческого глаза. Соответствующий вид фотометрии называется визуальной фотометрией. Известны попытки повышения воспроизводимости данных, получаемых с помощью визуальных фотометров. Так возник целый ряд визуальных фотометров, колориметров и спектрометров.

В начале 21-го века благодаря обстоятельному труду Сеана Ф. Джонстона [19] фотометрия испытала новый подъем. Весьма впечатляет, как индустриализация и военные нужды превратили ее в важное научное направление. В современной фотометрии (объективная фотометрия или физическая фотометрия), благодаря визуальной фотометрии, используется функция спектральной световой эффективности  $V(\lambda)$  [20]. При этом, в целом, практическая метрология многих светотехнических параметров еще значительно уступает возможностям визуальной фотометрии. Поэтому богатый опыт и знания визуальной фотометрии полезно использовать.

Отцы фотометрии – астроном Пьер Бугер (рис. 3.1) и астроном, математик и философ Иоганн Генрих Ламберт (рис. 3.2). Многие используемые и сегодня формулы для

расчета значений световых и лучистых величин следуют из работ Ламберта. В своем труде «Фотометрия» [18] Ламберт отмечает отсутствие научных основ фотометрии и построения фотометрических приборов: «Представляется, что большая часть человеческих знаний не используется нами. Замечательный пример – теория света. В исследованиях сути и реальности столь много важных непреодолимых трудностей, что наши знания – в темной оболочке, так что над светом господствует тьма». Ламберт знал о письмах Исаака Ньютона и Эйлера, в которых излагалась теория света, но она не была пригодна для построения метрики света: «Здесь отсутствуют, как это видно, полностью (или, по крайней мере, главные) пункты, необходимые для исследования свойств величин. Отсутствует физическая теория света, которая могла бы строго доказывать и быть завершающей. Отсутствуют инструменты для измерения света. Наконец, отсутствуют начальные принципы, на которых можно было бы работать дальше».

Ламберт особенно сожалел об отсутствии подходящих для фотометрии датчиков света. Он знал, что человек исходно должен мерить визуально [18]: «Потому что, если найти различные фотометрические инструменты, сначала нужно с их помощью менять светлоту и цвет по отношению к глазу. Следовательно, фотометрия сталкивается с трудностями, как при открытии термометра с его точными измерениями температуры... Я точно знаю, что много раз проводились эксперименты, чтобы показать, что движение света можно наблюдать относительно зонда или стальной пластины в фокусе выпуклой линзы, или зеркала, и что солнечный свет находится в движении. Что

представляет собой солнечный свет, можно представить увеличением или уменьшением тепла пропорционально плотности луча, и это позволяет заменить фотометр термометром».

В качестве средства для световых измерений Ламберт предлагает теневой фотометр, в котором уравниваются «плотности света» двух теневых картин (рис.3.3, а). Бугер предложил еще один вариант – с соседними фотометрическими полями (рис. 3.3, б). Позже Бунзен усовершенствовал известный фотометр жирного пятна (рис. 3.3, в). После большого числа экспериментов Ламберт указал свойства и сложности визуальной фотометрии. При этом он отметил также проблему, которая возникает при фотометрировании ИС разных цветов. Бенджамин Томпсон (рис. 3.4) и Каунт Румфорт (1753–1814) в 1794 г. построили первые фотометры для промышленных измерений, которые позволяли определять светотехнические параметры тогдашних «ламп» и горящего масла. В начале 19-го века многие известные ученые занимались вопросами света, что требовалось для астрофизики, спектроскопии, физиологической оптики, цветовых измерений (колориметрии), оптического измерения температуры (пирометрии) и развития ламп и световых приборов.

Отто Люммер (рис. 3.5) до Макса Планка описал законы изучения черного тела и создал основу для будущих светотехнических норм. Вместе с Ойгеном Бродуном (1860–1938) он определил развитие фотометрии более чем на 40 лет вперед. Это явилось основой для создания серии промышленных фотометров – техничных и точных. Математик, химик и физик Аугуст Беер (1825–1863) создал ос-

новы описания поглощения света и ввел стандарты в теорию света («Введение в высокую оптику»). Так как приемником в визуальной фотометрии служит глаз, для нее требовалось создать физиологические основы зрения. Пионеры здесь – Гельмгольц, Кис, Шредингер [21], Херинг, Вебер, Фехнер, Кёниг [22, 23], Кольрауш, Дрессир, Бехштайн, Нагель [24] и др. Особые заслуги в этом имеют Артур Кёниг (рис. 3.6) и Конрад Дитерич, открывшие наличие функции спектральной чувствительности человеческого глаза. Эта кривая явилась отправным пунктом в численном описании световых и цветовых величин. Кёниг был учеником Гельмгольца, которому и посвятил свои основополагающие работы по метрике цвета.

С устройством для смешения цветов, которое применял еще Гельмгольц, он исследовал чувствительность датчиков, о чем писал: «Восприятие в виде функции освещения большого числа элементов необходимо редуцировать из бесконечного числа восприятий цвета в возможно малое число элементарных ощущений». Удивительно, что Гельмгольц без соответствующих измерений в то время смог гипотетически описать кривую спектральной чувствительности глаза. В биографиях вышеназванных ученых не отмечено, что прорывные достижения их пришлось на 30-летний возраст, что говорит об универсальности образования и способе работы этих ученых. С 1920 г. арсенал средств физической (объективной) фотометрии укрепляется «физическими изобретениями». В качестве классических датчиков сначала были предложены фотокамеры – с их малыми временными выдержками и хорошей линей-

ностью. Полупроводниковые датчики в виде селеновых фотоэлементов и фотосопротивлений были внедрены позже, так как технология их изготовления еще не обеспечивала постоянства параметров. С устранением технологических трудностей полупроводниковые датчики стали производиться, что исполнило мечту Ламберта о фотометре, способном измерять температуру подобно термометру. Соответствующие аналоговые или цифровые измерительные приборы по удобству измерений и воспроизводимости оказались существенно лучше визуальных, однако, точность измерений существенно не улучшалась. Ведь следовало учитывать, что функция физического датчика связана с визуальной фотометрией. Для развития объективной фотометрии, важной во многих случаях, необходимо было обратиться к опыту и вопросам дальнейшего развития визуальной фотометрии.

Хотя абсолютную освещенность оценивать глаз и не может, он в состоянии устанавливать равенства светлот и цветов, и потому всегда следует сравнивать результаты объективных измерений и параллельных зрительных оценок. Это означает, например, что светлоты двух сравниваемых ИС должны соотноситься с параметрами используемых средств оптического ослабления.

Поэтому для обеспечения визуальных измерений, необходимо создание:

световых эталонов;

методов направленного и неселективного оптического ослабления; оптимальных условий для визуального сравнения (фотометрическое поле).