

УДК 612.843.311

## АНАЛИЗ КОНЦЕПЦИИ А. Л. ЯРБУСА О РОЛИ СЛЕПОЙ СЕТЧАТКИ В ЦВЕТОВОСПРИЯТИИ

© 2017 г. П. П. Николаев, Г. И. Рожкова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт проблем передачи информации им А. А. Харкевича РАН  
127051 Москва, Б. Каретный пер., 19, стр. 1  
E-mail: nikol@iitp.ru

Поступила в редакцию 01.12.2016 г.

В последней серии статей, опубликованных в 1975–1980 гг., А. Ярбус сделал попытку сформулировать общие концептуальные утверждения, касающиеся основных принципов обработки сетчаточных изображений в зрительной системе человека. Концентрируясь в первую очередь на проблемах цветного зрения, А. Ярбус намеревался разработать всеобъемлющую модель, имитирующую переработку информации человеком с нормальным трихроматическим цветовосприятием. Ключевая идея состояла в объяснении всего множества воспринимаемых цветовых ощущений и константности цветовосприятия за счёт использования сигналов от так называемой слепой сетчатки – крайней сетчаточной периферии, на которой предположительно не могут формироваться изображения и которая стимулируется только рассеянным светом. Настоящая статья посвящена обсуждению наиболее важных экспериментальных парадигм, открытий, утверждений и заключений А. Ярбуса в свете классических теорий цветовосприятия и, в частности, фундаментальных положений школы Н. Ньюберга. Перцептуальная модель А. Ярбуса осталась незавершенной. Проведенный ретроспективный анализ выявил в ней некоторые внутренние противоречия и ограничения, не позволяющие довести её до уровня универсальной модели. Однако, в целом, экспериментальные достижения и общие идеи А. Ярбуса представляются принципиально интересными и заслуживают более тщательной оценки и дальнейшего исследования.

*Ключевые слова:* теории цветового зрения, слепая сетчатка, константность цветовосприятия, моделирование зрения человека.

### ВВЕДЕНИЕ

В концептуальных представлениях А. Ярбуса о работе зрительной системы человека, изложенных в его знаменитой монографии (Ярбус, 1965) и в последней серии его статей (Ярбус, 1975 а, б; 1976 а, б, в; 1977 а, б, в; 1979; 1980), объединенных заголовком “О работе зрительной системы человека” и написанных уже после публикации его книги, одним из принципиальных моментов является признание ключевой роли слепой крайней периферии сетчатки в “вычислении” видимого цвета и, в частности, в обеспечении константности цветовосприятия. Согласно гипотезе А. Ярбуса, оптика глаза не может формировать изображения внешних объектов на крайней кольцевой зоне сетчатки, куда попадает лишь диффузный свет, рассеиваемый

внутри глазного яблока или проникающий снаружи через склеру. По этой причине в теории А. Ярбуса крайней периферии сетчатки приписывается роль зоны, производящей оценку усредненных параметров освещения, но не способной вызывать видимые образы, т.е. психофизиологически слепой. В модельных построениях А. Ярбуса предложен и соответствующий механизм учёта характеристик освещения видимой сцены при вычислении цветовых параметров воспринимаемых образов: реакции слепой крайней периферии на рассеянный свет определяют так называемый “нулевой цвет”, а сама эта зона рассматривается как начало отсчёта при вычислении видимого цвета в любой точке сетчатки посредством некоторой “эстафетной” процедуры суммации изменений на пути от периферии к данной точке. Следует заме-

титель, что даже в то время, когда А. Ярбус разрабатывал свою концепцию, уже имелись публикации по слепой сетчатке и по моделированию цветовосприятия, которые не были им учтены, а за прошедшие с тех пор десятилетия появилось множество работ, не просто уточняющих и дополняющих прежние представления, но даже заставляющих менять постановку вопросов. В частности, из нашего недавнего обзора морфологических и физиологических исследований слепой зоны сетчатки (Рожкова и др., 2016) следует, что все имеющиеся свидетельства существования такой зоны были получены только для темпоральной половины сетчатки, причём уверенности в *абсолютной* слепоте исследованной зоны пока нет. В своих рекогносцировочных экспериментах по изучению слепой периферии А. Ярбус также воздействовал только на темпоральные участки сетчатки, так что его рассуждения о слепом периферическом *кольце* не имеют полноценного экспериментального подтверждения. Таким образом, характеристики слепой периферической зоны требуют дополнительного исследования. Хотя это и кажется парадоксальным, не исключено, что гипотетическая слепая периферия А. Ярбуса – это кольцо повышенной плотности колбочек (КППК), имеющее ширину 1–1.5 мм и действительно проходящее по всему зубчатому краю сетчатки (*ora serrata*) в области её контакта с цилиарной мышцей. Однако засвечивая темпоральную сетчатку через склеру точечными световыми стимулами (диаметром не более 1 мм), А. Ярбус проходил к центру сетчатки существенно дальше и не отмечал признаков изменения зрительных впечатлений при переходе от КППК к сетчатке с обычной структурой. По отчётам автора, включение стимулов не сопровождалось появлением видимого светлого пятна на протяжении нескольких миллиметров, а после пересечения некоторой границы наблюдались зрительные образы, обычные для диасклеральной стимуляции любой зоны зрячей сетчатки.

Цель настоящего аналитического обзора – обсудить концептуальные идеи А. Ярбуса в свете разнообразной релевантной информации, имеющейся на сегодняшний день, начав с краткого изложения проблематики и ключевых открытий в исследовании цветовосприятия. Необходимость этого связана с тем, что сам А. Ярбус практически не проводил сопоставления своей концепции с параллельными идеями других авторов и не добивался строгого изложения своих модельных представлений, позволяющего проводить количественную проверку предсказаний. Будучи уверенным в существовании одного общего закона, определяющего формирование видимых образов, и огра-

ничиваясь в своих экспериментах упрощенными плоскими стимульными паттернами, А. Ярбус недооценивал степень усложнения зрительных задач при переходе к реалистичным трехмерным сценам.

## КЛЮЧЕВЫЕ ЭТАПЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЦВЕТОВОСПРИЯТИЯ

К началу работ А. Ярбуса в области цветовосприятия, с одной стороны, уже были открыты некоторые фундаментальные законы, а с другой – получены свидетельства чрезвычайно сложной гетерархической организации общей системы цветового зрения. Однако эти достижения не были учтены А. Ярбусом, так как он подошел к проблемам цветовосприятия не традиционным путём, а через исследования роли движений глаз в процессе зрения, что мешало ему видеть всю глубину и сложность цветовой проблематики и обеспечивать корректность постановки экспериментов.

Для специалистов, работавших над проблемами цветовосприятия и цветовоспроизведения на протяжении XX в., постепенно становилось всё более очевидным, что весь процесс анализа рассматриваемой физической сцены и синтеза её видимого образа следует подразделить хотя бы на три этапа, или уровня, – сенсорный, перцептивный и когнитивный. Эти уровни радикально различаются по принципам обработки сигналов, так что имеет смысл отдельно изучать механизмы, работающие в пределах каждого уровня, и правила взаимодействия между разными механизмами. Соответственно, постановка любого “цветового” эксперимента требует строгой формулировки вопроса с адресацией к определенному уровню обработки сигнала, чёткого представления о форме ответа и об условиях, обеспечивающих его адекватность. Некоторое общее представление о специфике выделяемых уровней даёт приводимая таблица, в которой дана краткая характеристика трех принципиально различных уровней обработки сетчаточных изображений в процессе формирования видимого образа и решения различных зрительных задач, относящихся к восприятию цвета.

**Сенсорный уровень** – это уровень первичных сигналов, возбуждаемых в сетчатке при проецировании на неё зрительных стимулов различного спектрального состава. Такими сигналами являются реакции нескольких типов светочувствительных элементов – фоторецепторов, имеющих различные спектральные характеристики. Некоторые закономерности цветовосприятия человека удаётся объяснить, учитывая только свойства его фоторецепторов – палочек с максимумом чувствительности в области 500 нм, функционирующих

**Таблица.** Характеристика трех принципиально различных уровней обработки сетчаточных изображений в процессе формирования видимого образа и решения различных зрительных задач, относящихся к восприятию цвета

Уровни	Нейрофизиологическая основа	Решаемые задачи	Феномены, законы
Сенсорный уровень	Реакции фоторецепторов с различными кривыми спектральной чувствительности	Формирование колориметрических карт сетчаточных проекций	Законы Г. Грассмана: метамеризм излучений
Перцептивный уровень	Текущая суперпозиция альтернативных трансформаций нейронного сетчаточного изображения в мозговых проекционных зонах, получающих сигналы не только из глаза, но и от незрительных структур, отражающих условия наблюдения и состояние наблюдателя (глазных мышц, проприоцептивной системы и др.)	Изучение влияния интегральных и локальных факторов на воспринимаемые цвета тристимулов и акты “голосования” гипотез по ключам цветоconstантности	Латеральные и динамические адаптационные эффекты (эффект Трокслера, цветовая адаптация); цветовые иллюзии; формирование карт цветовой сегментации сетчаточных проекций и их синтез в 3D “сеть границ”
Когнитивный уровень	Мультимодальное когнитивное согласование всей информации о сцене и выбор наиболее вероятного решения с учётом объективных закономерностей и предшествующего опыта	Оценка характеристик отражения наблюдаемых поверхностей и освещения сцены	Распознавание и константное восприятие отражательных свойств объектов и цветности освещения в контексте всей наблюдаемой сцены

при слабой освещенности, преимущественно ночью и в сумерках, и трех типов колбочек со спектральными максимумами 430, 530 и 560 нм, ответственных за дневное зрение. В частности, сенсорного уровня анализа достаточно для вывода законов Грассмана для дневного зрения, объяснения метамеризма излучений и предсказания результатов колориметрических экспериментов.

**Перцептивный уровень** – это уровень действия автоматических механизмов обработки сигналов (латеральное торможение, саккадическое подавление, заполнение окружением, иррадиация, усиление контраста) и появления промежуточных нейрофизиологических продуктов-полуфабрикатов для создания гипотез об общей структуре видимой сцены и формирования карты цветовых ощущений. Данный уровень включает несколько параллельных и принципиально различающихся путей анализа сетчаточных изображений (монокулярных и бинокулярных, образованных нейронами разного типа, охватывающих разные отделы зрительной системы). Для этого уровня характерно использование незрительной информации об условиях наблюдения и состоянии наблюдателя-субъекта, поступающей от глазных мышц, проприоцепторов и других структур. Учёт незрительной информации обеспечивает выбор наиболее подходящих полу-

фабрикатов для построения видимого образа на следующем уровне.

**Когнитивный уровень** – это уровень формирования финального видимого образа наблюдаемой сцены с адекватным описанием объёмных форм, пространственных соотношений и отражательных свойств поверхностей объектов в рамках соблюдения объективных закономерностей и законов пространственной и цветовой константности. Отличительная черта данного уровня – использование логических построений и накопленного зрительного опыта.

Выдвигая свои идеи относительно механизмов восприятия цвета и обеспечения константности цветовосприятия, А. Ярбус не конкретизировал их ни в отношении реальных входных сигналов, порождаемых естественными рассматриваемыми сценами, ни в отношении уровня обработки в зрительной системе. В связи с этим напомним, что заведовавший лабораторией зрения ИППИ РАН в 1951–1967 гг. Н. Нюберг был первым, кто обратил внимание на источники данных для решения задачи *цветовой константности*. Он сделал это на основе анализа “цветового тела”, математическая концепция которого была им дана еще в 1928 г. (Nyberg, 1928). Полвека спустя Д. Форзит (Forsyth, 1990) эту идею (сильно упрощенную) претворил в алгоритме Gamut. Н. Нюберг дал строгие опре-

деления цветовым понятиям и условиям цветовых экспериментов, предложил метод колориметрии замещения, реализованный коллегами (Бонгард, 1955). Позднее М. Бонгард инициировал проведение серии психофизических экспериментов (Нюберг и др., 1971 а), выявивших роль ахроматических объектов и складчатых поверхностей в процессе формирования “поправок на цвет освещения”, т.е. заметным образом расширил список “ключей цветовой константности”, предложенных первооткрывателем этого феномена — Г. Гельмгольцем (Helmholtz, 1867).

На заре компьютерного бума, когда в числе первоочередных задач были заявлены создание искусственного интеллекта (“ArtIntel” — AI) и науки “техническое зрение”, решение проблем зрительного распознавания требовало привлечения на помощь психологам нейрофизиологов, а психофизикам — физиков, что и происходило повсеместно, как в западных научных центрах, так и в отечественных, в том числе — в ИППИ РАН. Итогом такой консолидации сил стали, в частности:

- модели типа Retinex, производящие оценку картины освещения для обеспечения константности восприятия цвета наблюдаемых объектов (Land, McCann, 1971; Land, 1977, 1986) на основе предположения о гладкости функции изменения освещения на площади изображения;

- математическая модель константной оценки светлоты для *мондрианов* (стимульных паттернов типа лоскутного одеяла из равномерно окрашенных кусочков) с неоднородным освещением (Horn, 1974), для которой Д. Марр нашел параллели в нейронных сетях сетчатки обезьян (Marr, 1974);

- модель “Аппликация” (Нюберг и др., 1971 б) — трехзональная модель цветовой константности;

- идеи обеспечения константности на основе электрофизиологических свойств цветоопponentных клеток, развитые молодыми коллегами А. Ярбуса в модели, где основным функциональным узлом процедуры формирующейся константной оценки было построение годографа цветовых векторов: на проекции сцены суммировались различия в величине стимулов по обе стороны границы между объектами разной окраски (Максимов, Николаев, 1974).

Примечательно, что при замене терминов последняя процедура обнаруживает операциональное сходство с процедурой “эстафетной суммации скачков цветового стимула на границах образцов разной окраски”, фигурирующей в работах А. Ярбуса. (В случае хроматического освещения объектов — аналогично стимульной ситуации в модели А. Ярбуса, где объектное узнавание, как *целевая когнитивная задача* зрительной системы, явным

образом не заявляется, — термины “цвет” и “окраска” фигурируют произвольно в роли синонимов.) Забегая вперед, заметим, что в приводимых А. Ярбусом примерах топология границ обычно очень проста, и его теория не дает рецепта вычисления “карты цветовых ощущений наблюдателя” уже для сцены типа *мондриан*. В то же время у А. Ярбуса механизм “вычисления скачка” на границе объектов и эстафетного влияния “периферической зоны” на “центральную область” предполагается радикально зависящим от “степени стабилизации” той или иной границы, чего “не учитывала” цветоопponentная модель В. Максимова. Её целью было заявлено воспроизведение *когнитивного акта* с отсылкой к данным электрофизиологии, что не похоже на задачу описания *перцептивного механизма*, исследуемого методами психофизиологии.

Однако рассмотрение таких деталей выходит за рамки данного раздела, так как суть различий в авторских подходах станет понятной только после содержательного изложения всей концепции А. Ярбуса, относящейся к восприятию цвета (этому посвящён специальный раздел). В отличие от взглядов на роль движений глаз, систематизированно представленных А. Ярбусом в его монографии (Ярбус, 1965), данная концепция не стала достоянием мировой научной общественности в виде завершённой целостной работы, поэтому она требует некоторых разъяснений.

Очевидно, что обсуждение постулатов, составляющих *концепцию* А. Ярбуса, имеет смысл вести с учётом истории развития представлений о восприятии цвета и сформулированных в итоге положений несомненно фундаментальной природы, образующих допустимые рамки для любых предлагаемых *теорий*. В эти рамки должна укладываться и система “нетрадиционных” представлений А. Ярбуса. Как было отмечено выше, в процессе зрения естественным образом выделяются три качественно различных уровня переработки информации — сенсорный, перцептивный и когнитивный, на каждом из которых действуют свои структурно детерминированные механизмы и для каждого из которых характерны свои специфические законы. Наиболее строгие закономерности удалось установить для сенсорного (входного) и когнитивного (выходного) уровней, которые будут рассмотрены в первую очередь. Перцептивный уровень отличается большей неопределённостью в смысле описания входных и выходных сигналов и включает разнообразные механизмы, имеющие входы не только со стороны зрительной системы. На этом уровне порождаются промежуточные продукты-полуфабрикаты, из которых формируются

видимые образы, сознательно воспринимаемые на когнитивном уровне.

Мы не будем здесь анализировать развитие технических моделей цветовосприятия, поскольку условия работы, решаемые задачи и “параметрические” ограничения в технических и живых системах очень сильно различаются. Однако имеет смысл отметить, что к настоящему времени технические системы достигли достаточно высокой степени совершенства, и в специальных условиях превосходят возможности человеческого зрения в отношении анализа и реконструкции пространственно-временных и спектральных характеристик рассматриваемых сцен по их плоским изображениям. Интересующимся эволюцией технических систем читателям можно рекомендовать обзоры (Funt, Drew, 1993; Kimmel et al., 2003; Morel et al., 2009).

**Положения сенсорного уровня в психофизике цветовосприятия.** В середине XIX века Г. Грассман (Grassmann, 1854) положил начало науке о цвете, экспериментально выявив алгебраические линейные законы сложения для сенсорно регистрируемых смесей излучений разного (произвольного) спектрального состава. Это стало осуществимым процедурно благодаря разработанной Г. Грассманом методике *колориметрического* эксперимента, где в точно оговоренных условиях “зрящий мозг” испытуемого функционирует исключительно в роли нуль-прибора, фиксирующего факт неразличимости двух излучений – измеряемого и базисного (как линейной смеси “цветных лучей” от набора трех эталонных осветителей). Законы Г. Грассмана задают аффинное цветовое пространство (*дневного* зрения трихромата), позволяя по данным измерения цвета для “лучей-слагаемых” “точно предсказать” результат измерения для “суммарного луча” (т.е. линейной смеси исходных излучений), не производя измерения для смеси. Напомним краткие формулировки этих законов.

Первый закон – закон трёхмерности – гласит, что любой цвет однозначно выражается тремя излучениями, если они линейно независимы. Второй закон – закон непрерывности – утверждает, что при непрерывном изменении параметров излучения цвет также меняется непрерывно, поэтому не существует такого цвета, к которому невозможно было бы подобрать бесконечно близкий. Согласно третьему закону – закону аддитивности – цвет смеси излучений зависит только от цветов слагаемых, но не от их спектрального состава.

В начале XX века были достигнуты дальнейшие успехи:

- определено само базовое понятие *цвет*;

- оценены погрешности колориметрических измерений (около 1%);

- определена форма аффинного *цветового конуса* в пространстве *физиологических цветов*;

- досконально изучены особенности распределения центральной проекции цветовых векторов на плоскость *цветности* (названной “цветовым треугольником”).

Что касается первого пункта, то благодаря данному Э. Шрёдингером (Schrödinger, 1920) изящному *спектральному* определению, не включающему качественных категорий, относящихся к субъективным ощущениям наблюдателя, понятие *цвет* оказалось непреложно закреплено как однозначно трактуемый в рамках *науки о цвете* термин, и вопреки любым бытовым разночтениям повсеместного использования – никакой ревизии впредь не подлежит! По Э. Шрёдингеру, цвет – это общее свойство излучений разного спектрального состава, неразличимых для человека. Многообразие *цветовых ощущений*, возникающих у человека в различных состояниях адаптации и в различных реальных условиях освещения при наблюдении объектов разного размера, проецирующихся на разные участки сетчатки и имеющих разное окружение, намного богаче колориметрического цветового многообразия, что сильно осложняет теоретический анализ и затрудняет трактовку результатов эксперимента. Именно поэтому для работ психофизиологического направления особую ценность имеет выдерживание однозначности терминологии: потеря возможности *однозначной* трактовки понятий и операций над ними часто есть “беда с размерностью”, когда финальный продукт исследования помещается его автором в некое “пространство цветовых ощущений”, неадекватное числу независимых компонент оно. Это приводит к краху теории либо к отсутствию интереса к ней – по причине утраты доверия к ее заявленным выводам.

В этом плане характерны предпринимаемые в течение четверти века бесплодные попытки построить сеть изолиний контраста для координат “тон/насыщенность” в плоскости цветового треугольника и теоретически обосновать содержательность предлагаемых для нее версий. Чтобы понять абсурдность такой затеи, достаточно осознания двух тривиальных фактов:

- аффинное цветовое пространство – *по определению* – не может иметь фиксированного положения ахроматической оси, поскольку колориметрия не детерминирует множество “ахроматических излучений”;

- колориметрия не задает “спектральных характеристик луча” в виде аналогов перцептивной

диаде “тон/насыщенность”, гарантируя лишь линейный закон поведения для локальной компоненты “яркость” и исключая такую возможность ее метризации, которая могла бы детерминировать форму *изоярковой* поверхности.

Возвращаясь к циклу работ А. Ярбуса, пока в качестве предварительного замечания, упомянем о трудностях предстоящего анализа. Ни разу не отсылая читателя к дисциплине *колориметрия*, но уже в первой статье обсуждаемого цикла “*Адекватный зрительный стимул*” (Ярбус, 1975 а) именно ее формализму следуя, автор придает далее термину *цвет* новое (не колориметрическое) содержание, беря за основу “действие света *a* на все три типа приемников глаза” (красно-, зелёно- и синечувствительные) в данной точке сетчатки и на крайней периферии. Утверждается, что видимый цвет однозначно определяется тремя числами  $\ln(a_{ji}/a_{j0})$ , где индекс *i* – относится к координатам рассматриваемой точки (причём цифрой 0 обозначается периферия, все точки которой считаются засвеченными одинаково), а индекс *j* (где *j* = 1, 2, 3) означает тип приёмника. Авторские пояснения по поводу *размерности* предложенного многомерного пространства цветов с такими компонентами в каждом *j*-м цветовом канале отсутствуют.

Заметим, что попытки доопределить пространство физиологических цветов, используя исходное колориметрическое 3D пространство, но “специальным образом дополняя его” для объяснения феноменов контраста, “иррадиации цвета”, латерального торможения и других явлений (Бецольда-Брюкке, Эбнея и других), предпринимались психофизиологами различных школ и приверженцами различных концептуальных парадигм на протяжении всего XX в. Полезность их была лишь в том, что с каждым неубедительным примером “синтеза” (и параллельно возраставшим возможностям численного модельного эксперимента – во второй половине минувшего века) в “физматической диаспоре социума психологов” укреплялось осознание принципиальной несводимости *сенсорных* функций к *когнитивным* процессам: они эксплицированы в разных пространствах – и по требуемой размерности описания (представления), да и по решаемой задаче. Успехи *когнитивного* подхода в технических системах утвердили этот вывод и для проблем автоматических систем AI.

**Положения когнитивного уровня в психофизике цветовосприятия.** При обсуждении механизмов анализа, характерных для когнитивного уровня цветовосприятия, удобно исходить из доктрин школы Н. Ньюберга, являющихся в своей совокупности прямым развитием взглядов Г. Гельмгольца на объективно физическую природу задачи распозна-

вания, которую успешно решает наблюдатель, наделенный аппаратом цветоразличения. Иными словами, обратимся к обстоятельствам *объективной* природы, являющимся предпосылками успешного “решения в ощущениях” задачи опознания в деталях феномена “color constancy”. Первейшим и необходимым условием адекватной трактовки сигналов зрительно воспринимаемого мира 3D объектов в ходе протекающего в “зрящем мозгу” (Gregory, 1970) *интерпретационного* процесса, совершаемого над входными паттернами ретиальной активности, является (по Н. Ньюбергу) адекватность топологического членения зрительного поля на области, принадлежащие проекциям *первичных* источников  $S_i$  освещения сцены (например, солнца и небосвода для сцен “на пленэре”), излучения которых попадают в глаз в их первозданном виде, и проекциям *тел* разнообразной окраски, в формировании которых принимают участие прямые и многократно отраженные излучения *первичных* источников освещения сцены, измененные в результате взаимодействия с поверхностями тел. Спектры эмиссии источников  $S_i$  и отраженного телами света обычно весьма сложны, причём спектральная функция светового сигнала, попадающего в глаз после отражения поверхностью тела, может включать несколько независимых компонент, определяемых разными источниками попадающего на тело света и угловыми соотношениями между падающими лучами и зрительной осью. На любом языке вырожденного описания, формируемого при переходе из пространства спектральных функций к малоразмерной векторной их аппроксимации, производимой в живых или технических сенсорных системах, цветовые характеристики тел не обязаны соответствовать особенностям  $S_i$  ни в мощностном, ни в цветностном выражении. Их характеристики – *независимые*.

Проведение описанной выше операции дихотомии входного паттерна исключает возможность ошибочного смешения терминов при протоколировании результатов эксперимента. Процедура членения зрительного поля является частным следствием универсального требования *дихотомии* перцептивных ансамблей на те, что относятся к *излучению* (и только в этом статусе они имеют право быть описанными языком колориметрии) и те, что доносят информацию об отражательных свойствах окрашенной *поверхности*, которая трансформировала спектральные характеристики осветившего ее луча. Даже в ситуации успешного разрешения разработчиком цветоконстантной теории трудностей, связанных с допустимостью единого формализма в диаде цветности *тон/насыщенность* при описании “лучей” и “тел”, идея отождествления

качеств “яркость” и “светлота” остается физически абсурдной. Подчеркнём, что *яркость* — это мощностная характеристика излучения, имеющая физическую размерность, а *светлота* — безразмерный параметр, выражаемый в относительных единицах. В физике светлота (под именем “альbedo”) корректно вводится лишь для *ахроматических* объектов, где свойство матовости является идеализацией (с возможностью оценки погрешности этого приближения), т.е. ахроматичность объекта — свойство, спектрально *детерминированное*.

Хотя авторитетные психологи, начиная с И. Гёте, продолжая Г. Герингом и завершая Э. Лэндом (McCann et al., 1977) сделали немало утверждений, затуманивающих эту вроде бы прозрачную картину, очевидно, что никакая специально предпринятая попытка предложить единый словарь и общую грамматику метаязыка для разнородных доктрин цветовосприятия, не изменят для физики и математики немислимой ситуации: мирного соседства *взаимоисключающих* теорий.

Уже Г. Гельмгольцем в тезисе “о двойственности восприятия цвета тел” были выражены сомнения в достаточности трех измерений для описания “телесных цветов”. Сам факт существования реалистической живописи свидетельствует о том, что художник, преуспевший в достоверной передаче различных цветов излучений, идущих “из разных точек однородно окрашенных предметов изображаемой им сцены”, наделен “умением выключить имманентный ему механизм цветоconstантности” и воспроизводить на плоскости холста колориметрическую картину распределения лучей в сюжете. Творческая задача художника-реалиста — воспроизвести *аконстантную* проекцию 3D мира, переадресовав задачу константного восприятия зрителю. При этом, например, для изображения двух идентичных *желтых* предметов, находящихся в солнечной и теневой (освещенной только *голубыми* лучами неба) областях сцены, художнику придется употребить разные краски: *желтую* для предмета на солнечной стороне и *зеленую* — для предмета в тени.

В обсуждаемых работах А. Ярбуса нет чёткого разграничения константных и аконстантных задач. Часто при описании очередной серии опытов оговариваются некоторые условия наблюдения и стимуляции, а итогом объявляется получение от испытуемого ответов, заключающихся либо в обозначении “собственного цвета образца” (на языке перцепции — *окраски*), а в физической транскрипции — отражательных свойств поверхности, что с точки зрения интерпретации объекта характеризует ситуацию *константного* восприятия), либо в констатации изменений, “вызванных воздейст-

вием”, которое трансформирует цветовую (а иногда — “только яркостную”) оценку, делая её не связанной с “собственным цветом” (т.е. условия оказываются в этом случае *аконстантными*). В связи с этим имеет смысл привести определения Н. Ньюберга (Ньюберг и др., 1971 а, б), классифицирующие эту дихотомию итогов распознавания на языке особенностей сцены. По Н. Ньюбергу, восприятие может оказаться:

- объектно адекватным, т.е. константно отображающим неизменные характеристики отражающих поверхностей объектов;

- “почти колориметрическим”;

- не соответствующим ни первому, ни второму определению, будучи “регулярным искажением первой ситуации”. В несколько упрощенном виде классификация выглядит так: “В константных условиях наблюдения одинаковыми (в цветовом отношении) выглядят объекты тождественной *окраски*; в аконстантно колориметрических условиях видимое сходство порождается одинаковыми *цветами излучений*, отражаемых объектами; при дефиците признаков цветности источника освещения возникают условия *ложной* константности, обуславливающие систематический цветовой сдвиг оценок окраски объектов”. Слова “признаки цветности источника”, как уже наверняка понятно читателю, знакомому с проблемой, появились в определениях не случайно, ибо *локально* задача константности неразрешима в принципе: стимул, порожденный точкой *P* сцены, где *неизвестная* окраска тела трансформировала луч освещения *неизвестной* цветности и мощности, не удастся использовать для решения обратной задачи (оценки окраски объекта в *P*), если не сформировать верную гипотезу о цветности (доминирующего) освещения. Эта гипотеза основывается на стимулах из *окрестности P* (малой либо включающей все поле зрения) и должна учитывать *геометрическую 3D модель* сцены, необходимую для воссоздания картины *светорассеяния*. И “магическую мантру” великого Дж. Максвелла “всякое зрение есть зрение цветное” следует понимать именно в таком смысле: в цветоconstантный процесс обязательным компонентом входит формирование картины светорассеяния, с чем обязан справиться даже офтальмологически цветнослепой монохромат, решающий эту задачу в доступных ему операциях соотнесения уровней ахроматической светлоты в 3D мире “темных и светлых тел”. Завершим данный раздел “утверждением о размерности” когнитивного (т.е. цветоconstантного) сигнала в *трихроматических* системах зрения: она обязательно не меньше четырех, но и не больше девяти измерений. Ограничение размерности снизу определя-

ется минимальным не подлежащим сокращению набором составляющих 4D вектора “объектного цвета”: “тон”, “насыщенность”, “светлота тела”, “яркость луча”. Ограничение сверху даёт теорема А. Петрова (Петров, 1984), имеющая отношение к задаче цветоconstантности в *техническом* зрении и являющаяся мажорантной при произвольной спектральной неоднородности в распределении освещения по сферическим углам визуализации. Во избежание ложного истолкования “несопоставимости” тезисов о 3D и 4D перцепции, уточним, что 4-мерность “когнитивного” продукта означает лишь возможность перехода (переключения, которым управляют “когнитивные центры” уровня *интеграции*) от одного 3D механизма интерпретации к другому 3D механизму. Согласно догадке Г. Гельмгольца система цветового зрения может функционировать, блокируя по необходимости работу механизмов constантности цветовосприятия, так что *одномоментной* и *глобальной* реализации акта опознавания, привлекающего *пространство* репрезентации размерности 4 D, не требуется.

Перейдем к рассмотрению самого неопределённого (промежуточного) уровня обработки сигналов, относящегося к случаям дефицита данных о цвете освещения, когда “перцептивно формируются” закономерности хотя *уже и не колориметрического*, но всё же *ещё и не константного* трихроматического зрения.

**Положения перцептивного уровня в психофизиологии цветовосприятия.** Видимые образы, формируемые зрительной системой, всегда интерпретируются как некоторые сущности, находящиеся во внешнем мире – твердые предметы разной окраски, потоки света, перемещающиеся скопления жидких и газообразных субстанций. Если поступающей информации достаточно, то эти сущности могут адекватно и однозначно интерпретироваться на когнитивном уровне с участием механизмов constантности восприятия. Однако если этой информации недостаточно для формирования адекватных образов, зрительное восприятие попадает в обширную область ложно константных зрительных впечатлений. Именно эта область наиболее широко представлена в работах психофизиологов, и анализу именно её механизмов посвящены экспериментальные и теоретические исследования А. Ярбуса. Условно эту область можно отнести к *перцептивному* уровню зрительного восприятия, подразумевая при этом, что видимые образы – перцепты – могут существенно отличаться от соответствующих объектов во внешней среде (точнее – от тех образов, которые были бы сформированы в идеале). Обозреть работы, относящиеся к этой области, даже в концептуальном аспекте не пред-

ставляется реальным. Как следует из анализа содержания всего цикла обсуждаемых статей, целью автора было – приоткрыть завесу над процессами автоматической (не зависящей от *воли* испытуемого) работы зрительной системы и найти их законы в виде строго детерминированных механизмов, не выходящих за пределы зрительной сенсорной модальности и не обращающихся к долговременной памяти.

В предшествующем разделе уже говорилось, что в *ложно константных* условиях наблюдения “при наилучшем исходе акта опознавания” связь с когнитивной задачей выражается в *систематическом* искажении производимых оценок отражательных свойств объектов. Соответственно, стимульная организация сцен должна предполагать возможность выявления таких искажений по реакциям испытуемых. (В большинстве опытов А. Ярбуса регистрация результата идёт на “качественном” уровне: “гипотезу автора испытуемые подтвердили” либо “результат оказался неожиданным, но его можно трактовать так-то”.) Обычно используется та “максимальная простота” организации зрительного поля, которая характерна для изучения цветовых иллюзий (с целью выявления частных независимых механизмов интерпретации сцены) или же многочисленных (пространственных и временных) разновидностей контраста. В этих случаях чаще всего достаточно пары точек в цветовом пространстве описания поля эксперимента (т.е. в колориметрическом смысле сцену репрезентируют только два набора векторов *цвета*), чтобы ожидаемый эффект отчетливо себя проявил (например, латеральное влияние или заполнение окружением). Общую суть экспериментальных задач для этого уровня можно выразить таким образом: простая организация поля зрения с минимальным ее усложнением в сравнении с обстановкой колориметрического эксперимента позволяет выявить отдельные “автоматизмы” прекогнитивного уровня.

Для исследования “запаянных” прекогнитивных механизмов экспериментаторы осознанно (либо интуитивно, посредством проб) упрощают антураж психофизического опыта, чтобы в результате проведенной серии испытаний “на таком сложнейшем структурном материале, каким является психика испытуемого”, выявить однозначную схему преобразования поля стимулов, т.е. получить однозначное описание вычлняемого частного механизма обработки сенсорных сигналов. Однако при этом никогда не удаётся доказать, что найдены универсальные закономерности, справедливые во всех ситуациях, – вероятность получения предсказуемых результатов критическим образом зависит от организации и параметров тестового поля.

В ситуациях реального 3D распознавания, с существенно более сложной организацией поля зрения в отношении формы, окраски и взаимного расположения объектов, разнообразные “полуфабрикаты решений”, производимые частными автоматически функционирующими механизмами преобразования входного сигнала, поставляются на уровень когнитивного выбора финального решения, каковое приобретает чувственно ясные черты “актуального зрительного поля” со всеми его “ложными” или “истинными” проявлениями константного распознавания в различных локусах. Иными словами, в общем случае из рассматриваемой сцены удастся выделить лишь отдельные сегменты, в которых успешно работают разные автоматизмы. В этом отношении методики исследования прекогнитивных механизмов принципиально отличаются от *методики колориметрического эксперимента*, которая замечательна тем, что не дает информационного повода для работы *когнитивной* системы с ее мощным и структурно весьма сложным аппаратом интерпретации сетчаточных изображений, порождающим максимально непротиворечивый финальный продукт. Это и “позволило” Г. Грассману итогом его методически гениальной постановки экспериментальной процедуры получить “три именных закона”, столь же окончательно справедливых, как и законы Ньютона в физике.

**О процедурах нормализации и свойствах симметрии в цветовых системах и моделях.** В большинстве цветовых моделей, предлагаемых в качестве “универсальных”, основной задачей “восприятия” объявляется не адекватная оценка окраски, а стабилизация цветового сигнала с учётом вариабельности доминирующего освещения. Решение этой задачи достигается путём введения *поканальной адаптации по фон Крису* в процедуру обработки входного сигнала (Kries, 1905), что не требует больших затрат при технической реализации, равно как и значительных сложностей в теоретических схемах биологического профиля (Helson, 1964). Подобный приём позволяет обеспечить высокую контрастную чувствительность системы для большого диапазона перепадов мощности освещения в среде наблюдения, что давно подмечено и в деталях конкретных его реализаций просчитано как разработчиками *hardware* схем трихроматических камер, так и теоретиками-биологами (Hurlbert, 1986).

“Попутное полезное” свойство подобной динамической адаптации состоит в изменении поля цветовых векторов “в среднем благоприятно для целей color constancy”. Благодаря механизму “перенастройки триады цветовых каналов”, функция

спектральной чувствительности каждого канала меняется пропорционально яркостной нагрузке со стороны оптического потока спектральных стимулов, трансформированных сенсорами в векторное поле тристимулов, что в плоскости цветового треугольника выражается в систематическом сдвиге точек карты цветности объектов – в сторону, противоположную цветности доминирующего освещения в сцене. Данное свойство давно было проанализировано и рядом авторитетных исследователей охарактеризовано как “удовлетворительное для реализации феноменов цветовой константности в психофизиологических моделях зрения” (Hurlbert, Wolf, 2004). Тем не менее найденное решение не всем кажется окончательным, и попытки создать более точные в отношении оценки окрасок тел модели прекогнитивного уровня, не привлекающие данных из зрительной памяти (на “форму и цвет тел”, ранее уже опознанных интеллектуальной системой ассоциативного визуального анализа) продолжают (Brill, 1978; Shafer, 1985; Brill, West, 1986; Petrov, Kontsevich, 1994; Nikolayev, 2007; Morel et al., 2009; Barghout, 2014).

В частности, распространены приемы обработки изображений, чаще всего именуемые в технических цветоконстантных моделях *нормализацией*. Эти приёмы состоят в своеобразной оценке двух параметров цветности объекта, производимой посредством перехода к безразмерным (скалярным) величинам компонент окраски и имеющей вид отношения одномерных величин, выражающих мощность луча, отраженного точкой  $i$  объекта (в направлении сенсора) к “гипотетической силе освещения” этой точки  $P_i$ . (Имеются в виду тела однородной окраски; у трихромата аналоги этой пары заданы диадой *тон/насыщенность*.) В *спектрально-розовых* моделях цветовой константности типа *апликация*, первые версии которых разрабатывались еще при жизни Н. Ньюберга, фигурируют отношения вида  $a_{ji}/a_{j0}$ , где  $a_{j0}$  имеет смысл зональной  $j$ -й компоненты освещения  $P_i$ , а  $a_{ji}$  –  $j$ -й компоненты рассеяния (Ньюберг и др., 1971 б; Nikolaev, Nikolayev, 2004, 2007). В *гауссовской* модели, где спектральные характеристики освещения  $S(\lambda)$ , отражения  $\Phi_i(\lambda)$  и чувствительности сенсора  $\chi_j(\lambda)$  представлены кривыми *нормального распределения* (Николаев, 1985; Weinberg, 1976), оценка цветности производится чуть более сложной операцией, но с той же целью получения “безразмерного отношения мощности рассеяния и освещения”.

Модель А. Ярбуса может быть причислена к ряду таких моделей как более эмпирический (физиологический) вариант. Фигурирующая там формула  $\ln(a_{ji}/a_{j0})$  для компонент цвета (Ярбус, 1975 б) даёт повод к сопоставлению этой модели

с обсуждаемыми приёмами нормализации в технических цветоинвариантных моделях. В рамках этой аналогии величина  $a_{j0}$  у А. Ярбуса является неким выразителем  $j$ -ой компоненты “гипотезы об освещении  $S(\lambda)$ ”. Экспериментально исследуя влияние рассеянного света, действующего на периферические зоны сетчатки, А. Ярбус пришел к выводу, что периферический “засвет” (включающий рассеиваемую глазами средами часть света, проходящего через зрачок, и свет, проникший в глаз через склеру) имеет кольцевую *равномерность* в каждом канале  $j$ , а его влияние  $a_{j0}$  играет роль *дополнительного* фактора стимуляции, который будучи членом формулы в *знаменателе* под логарифмом, имеет характер латерального торможения; является своеобразным нормировочным членом (“определяет величину *единичной*  $j$ -компоненты вектора цвета” и формирует вектор в виде безразмерной триады *численных* параметров); выполняет функцию “адекватного носителя для усредненного освещения сцены”. (Общий анализ модели А. Ярбуса приведен в заключительном разделе данной статьи после изложения всех его концептуальных идей.)

#### ОСНОВОПОЛАГАЮЩИЕ ПОСТУЛАТЫ КОНЦЕПЦИИ А. ЯРБУСА

В трудах А. Ярбуса его общая концепция фактически представлена в двух формах описания – в виде изложения результатов психофизических экспериментов и в виде тезисов теории, причём каждое из описаний не является законченным. В обсуждаемых далее статьях теоретические положения либо предваряют описание опыта, поставленного для целевой проверки той или иной гипотезы, структурирующей *концепцию*, либо апостериори трактуют итоги эксперимента как соответствующие развитой модели в специально подобранных *условиях наблюдения*. Основная цель настоящего аналитического обзора – кратко передать суть оригинальных идей А. Ярбуса о работе зрительной системы (человека-трихромата) и обсудить возможные пределы их приложения и место среди идей других авторов. При этом мы не будем останавливаться на деталях экспериментальных методик А. Ярбуса, которые заслуживают отдельного рассмотрения, но могли бы переключить внимание читателя на технические аспекты, поскольку в них много своих “маленьких открытий”. Данная статья частично включает результаты проведенного нами ранее анализа экспериментальных парадигм и теоретических построений А. Ярбуса, опубликованные на английском языке (Rozhkova, Nikolaev, 2015; Nikolaev, Rozhkova, 2015). В первой из этих работ основное внимание уделено рассмотрению

именно экспериментальных методик и обширного феноменологического материала, полученного А. Ярбусом и параллельно работавшими другими авторами в условиях стабилизации сетчаточных изображений – основного методического подхода, применяемого А. Ярбусом для изучения фундаментальных законов функционирования зрительной системы.

Первая статья цикла, специально посвященного А. Ярбусом последовательному изложению всей своей концепции, имеет подзаголовок “*Адекватный зрительный стимул*” (Ярбус, 1975 а). Этой статьёй автор вводит читателя в принципиально важную систему *динамических* представлений о работе зрения человека, развивающую концептуальные идеи его монографии (Ярбус, 1965) о феномене *пустого поля*, и формулирует условия возникновения зрительных ощущений, отличных от него. Приступая к изложению своей концепции, автор даёт определение понятию “совокупное действие света  $a$ ”, для составляющих которого он приводит обычные формулы, описывающие реакции трех колбочковых приёмников с функциями абсолютной спектральной чувствительности в данный момент  $R(\lambda)$ ,  $G(\lambda)$ ,  $B(\lambda)$  на свет, спектральный состав которого определяется функцией  $L(\lambda)$ :

$$\begin{aligned} a_r &= \int R(\lambda) L(\lambda) d\lambda; \\ a_g &= \int G(\lambda) L(\lambda) d\lambda; \\ a_b &= \int B(\lambda) L(\lambda) d\lambda, \end{aligned}$$

отмечая, что буквой  $a$  без индекса будет обозначаться “совокупное действие света на все приёмники глаза”.

В последующих статьях автор пытается развить целостную теорию восприятия цвета, однако практически все приводимые утверждения базируются на простых примерах, часто с концентрическим расположением однородных тестовых стимулов. В каждой статье обсуждаемого цикла есть теоретическая часть и экспериментальные данные. В целях удобства анализа сначала выделим основные теоретические положения А. Ярбуса, приведя соответствующие цитаты, и кратко их прокомментируем.

1. “Для работы зрительной системы недостаточно изменений во времени абсолютных световых различий...” “Адекватным стимулом  $S$ , в ответ на который появляются видимые во времени и пространстве цветовые различия, служит *изменение* пространственно-временных относительных различий света на сетчатке. Для данной точки на сетчатке (ее некоторой окрестности)  $S$  записывается так:  $S = \partial/\partial t((\text{grad } a)/a)$ , где  $t$  – время,  $a$  – действие света” (Ярбус, 1975 а).

2. “Величина цветового различия ( $\Delta E$ ) между двумя пространственно-временными точками должна определяться двойным интегрированием (по времени и пространству) выражения  $S = \partial/\partial t((\text{grad } a)/a)$ . Интегрирование можно вести по любому пути между выбранными точками, так как результат не зависит от пути. ... В результате интегрирования получим  $\Delta E = k \ln(a_2/a_1)$ , где  $k$  – коэффициент пропорциональности, имеющий размерность ощущения;  $a_1$  и  $a_2$  – действия света, соответствующие двум выбранным точкам” (Ярбус, 1975 б). «Величина  $\Delta E$  – некая “висящая в воздухе” величина, с которой реальный наблюдатель в своем восприятии никогда не встречается. В естественных условиях все видимые величины цветовых различий суть величины различий между конкретными образцами, каждому из которых присущ определённый видимый цвет. Такая определённая может появиться только в том случае, если зрительная система будет пользоваться в своей работе какой-то системой отсчёта и единицей измерения» (Ярбус, 1975 б).

3. “Началом отсчета в зрительной системе человека служит крайняя периферия сетчатки, которая в обычных условиях засвечивается рассеянным светом, усредненным по всему полю зрения; действие света на этой части сетчатки играет роль единицы измерения” (Ярбус, 1975 б). «Засветка рассеянным светом крайней периферии сетчатки считается сетчаточным изображением “самого большого образца”. Этот образец обладает той особенностью, что ему в любых условиях восприятия оказывается присущим нулевой цвет; его внешняя граница совпадает с границей самой сетчатки, и по этой причине она всегда стабилизирована и вне этой границы нет “ничего” (нет сетчатки и не может быть никакого действия света). Фантазируя, можно думать, что “ничему” зрительная система придаёт нулевой цвет и этим цветом заполняет самый большой образец. Поскольку обычные сетчаточные изображения не касаются границ сетчатки, любой образец (в том числе и образец, охватывающий все поле зрения) всегда находится внутри самого большого образца» (Ярбус, 1975 б).

4. “Стабилизация сетчаточного изображения любого образца всегда приводит к тому, что образец принимает цвет своего равномерного окружения; если между внешними границами сетчаточного изображения образца и периферией сетчатки нет никаких границ, то видимый цвет образца всегда становится нулевым” (Ярбус, 1975 б). Соответственно, когда все границы между образцами в поле зрения испытываемого успешно стабилизируются, его видимая “хроматичность” должна утрачиваться и оно должно приобретать *нулевой цвет*.

По-видимому, это понятие означает то же самое, что и введенная ранее категория *пустое поле* (Ярбус, 1965).

5. “Для наглядности представления множества видимых цветов (и соответствующих операций с ними) удобно пользоваться обычным трехмерным пространством, в котором цвету будут соответствовать координаты  $\ln(a_{ri}/a_{r0})$ ;  $\ln(a_{gi}/a_{g0})$ ;  $\ln(a_{bi}/a_{b0})$ . Условимся называть это пространство пространством цветовых ощущений. Поскольку указанные координаты могут принимать положительные и отрицательные значения, то, очевидно, в данном пространстве можно указать место любому цвету (цветам излучений и любым цветам окрасок)” (Ярбус, 1976 а).

6. “В работе зрительной системы, наряду с цветовыми различиями, используются и различия, обратные цветовым”. “Различия, обратные цветовым, понимаются в том смысле, что сумма любого цветового различия ( $\Delta E$ ) и различия, ему обратного ( $-\Delta E$ ), дает нулевое различие (исчезновение цветового различия)”. “На фоне нулевого цвета обратное цветовое различие становится равным антицвету... Увидеть антицвет без искажений можно только в условиях постоянства  $a_0$ ” (Ярбус, 1976 б).

Переходя к пояснению и анализу этих положений, прежде всего подчеркнём, что статьи цикла не содержат каких-либо сведений о параметрах и константах для операций формирования частных производных, равно как и для вводимых в статье (Ярбус, 1975 б) операций “двойного интегрирования сигнала (по времени и пространству)”. Нет в этих статьях и описания измерительных процедур, позволяющих количественно оценить соответствие или расхождение предсказаний теории и результатов эксперимента, так что выводы автора приходится принимать на веру.

Термину “яркость” А. Ярбус придаёт в своей модели очень специфический смысл, не имеющий аналога в моделях других авторов. Как пишет А. Ярбус (1976 а), “в полном согласии с опытами”, в точке  $i$ , где действие света равно  $a_i$ , видимая яркость определяется величиной  $\ln(a_i/a_0)$ , и когда  $a_0$  становится больше  $a_i$ , яркость становится отрицательной и цвет  $E_i$  в этой точке кажется темнее нулевого цвета. Для подтверждения этого тезиса был поставлен опыт с использованием монохроматического красного света (680 нм), которым стимулировали и центр сетчатки, и периферию. Было обнаружено, что “когда  $a_i$  было больше  $a_0$ , то наблюдатель видел насыщенный красный цвет, а когда меньше, то видимый цвет казался наблюдателю насыщенным чёрно-сине-зеленым (черно-дополнительным)”.

Таким образом, в модели А. Ярбуса яркость может быть как положительной, так и отрицательной, причём изменение знака яркости автоматически приводит к замене воспринимаемого цветового тона на дополнительный. Появление дополнительного цвета — это совершенно беспрецедентный феномен для экспериментов, в которых используется только монохроматический свет. К сожалению, других опубликованных данных, подтверждающих такую возможность, нам обнаружить не удалось. Воспроизведение подобных экспериментов представляется весьма проблематичным, так как требует безупречного затемнения для исключения всех источников освещения, кроме выбранного монохроматического, а в полной темноте трудно обеспечить условия нормального фотопического зрения, для которых разрабатывалась теория.

Анализируя засветку крайней периферии сетчатки, А. Ярбус приходит к выводу, что в естественных условиях она освещается “рассеянным и в какой-то мере усредненным по всему полю зрения светом, проникающим на сетчатку через прозрачные среды глаза и через склеру, и светом, отраженным от глазного дна. При этом действие света на периферии будет существенно больше действия света на сетчаточных изображениях тёмных и чёрных объектов” (Ярбус, 1975 б). Последнее утверждение используется автором далее при создании собственного оригинального представления о *пространстве цветовых ощущений* (см. пункт 5). В статье с соответствующим подзаголовком даётся трактовка соответствия «множества черных, темных и “грязных” цветов, которым нет аналогов среди цветов излучений», стимулам с “отрицательными значениями  $\ln(a_i/a_0)$  по трем, двум или одному приемнику”, т.е. случаям, когда периферический сигнал больше, чем в исследуемой точке (Ярбус, 1976 а).

Поскольку изложенная концепция базируется скорее на наблюдениях, чем на полноценных экспериментальных данных, анализировать её в деталях неправомерно, и единственно возможным конструктивным вариантом комментария представляется рассмотрение аналогов с ясным определением свойств и физического смысла, которое можно провести на примере *колориметрического цветового пространства* и *аффинного цветового тела* Н. Ньюберга. Для облегчения сопоставления на рис. 1 схематически представлены колориметрическое цветовое пространство по Э. Шрёдингеру (а), предложенное Н. Ньюбергом *цветовое тело* (б) и пространство цветовых ощущений А. Ярбуса (в). Очевидно, что эти схемы относятся к трём разным уровням зрительной системы.

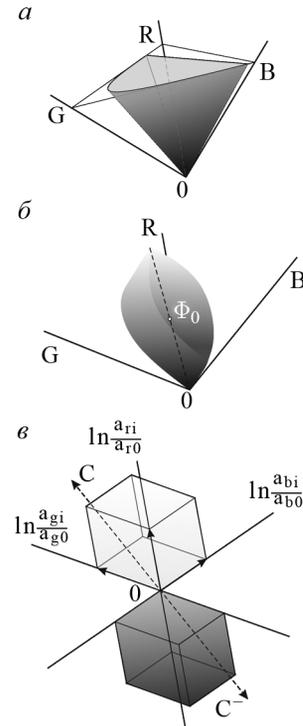


Рис. 1. Цветовой конус спектральных лучей в аффинном пространстве физиологических цветов (по Э. Шрёдингеру) (а); предложенное Н. Ньюбергом цветовое тело в аффинном пространстве окрасок (б) и предложенное А. Ярбусом пространство цветовых ощущений (в).

Схема Э. Шрёдингера (рис. 1, а) относится к сенсорному уровню. Цвета излучений представлены в ней как векторы, исходящие из нулевой точки, внутри телесного угла, образуемого векторами базовых излучений ( $R, G$  и  $B$ ). Чем больше вектор, тем больше яркость. Из-за перекрытия кривых спектральной чувствительности приёмников физиологические спектральные цвета лежат внутри меньшего телесного угла, определяющего треугольники смешения цветов на разных уровнях яркости.

Схема Н. Ньюберга (рис. 1, б) относится к когнитивному уровню. Она систематизирует окраски предметов. Цветовое тело вводится как 3D линейное множество цветов, порождаемое трихроматической системой с *фиксированным* набором кривых  $\chi_j(\lambda)$  спектральной чувствительности сенсора ( $j = 1, 2, 3$ ), при *заданной* кривой  $L(\lambda)$  эмиссии единого источника дающих тристимулы реакции на всё “спектрально мыслимое” множество окрасок  $\Phi_i(\lambda)$ . Показано, что гладкая поверхность тела (по форме похожего на чечевицу) порождена “идеально насыщенными” окрасками. Они названы автором *оптимальными* и имеют значения коэффициента отражения 0 либо 1 (с одним либо двумя вертикальными фронтами кривой отражательной

способности  $\Phi(\lambda)$  в видимом диапазоне системы, т.е. на интервале надпороговой чувствительности сенсора).

Данное цветовое тело обладает свойством *центральной симметрии* относительно точки цветового пространства, обозначающей реакции системы на 50% *ахроматический* образец  $\Phi_0$ , у которого  $\Phi_0(\lambda) = \text{const} = 1/2$ .  $\Phi_0(\lambda)$  является уникальным пигментом объекта с цветом окраски, дополнительным самому себе. Симметрию тела организуют цвета стимулов, порожденных парами так называемых *дополнительных* окрасок  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , кривые отражения которых удовлетворяют условию  $\Phi_1(\lambda) + \Phi_2(\lambda) = 1$ . Чёрный цвет и “грязные” цвета – коричневый, болотный, сизый – соответствуют окраскам, которые возбуждают реакции меньшей величины, чем окраска  $\Phi_0(\lambda)$ , в одном, двух или всех трёх цветовых каналах.

Схема А. Ярбуса (рис. 1, в) относится к промежуточному – перцептивному – уровню, она претендует на систематизацию цветов прекогнитивных перцептов – ощущений. Другими словами, эти цвета не обязательно однозначно трактуются как свойства опознанных сущностей (объектов или излучений) внешнего мира. Как указано в пункте 5, цветовое пространство ощущений заявляется А. Ярбусом как трехмерное пространство, в котором данному цвету соответствуют координаты  $\ln(a_{ri}/a_{r0}); \ln(a_{gi}/a_{g0}); \ln(a_{bi}/a_{b0})$ .

Определяемое этими формулами множество цветов “богаче” каждого из двух описанных выше множеств: благодаря наличию знаменателей, оно включает цвета с различными знаками координат по всем осям, тогда как в схемах Э. Шрёдингера (рис. 1, а) и Н. Ньюберга (рис. 1, б) допускались только положительные координаты. Благодаря использованию логарифмических функций и знаменателей А. Ярбус расширил область возможных цветов, распространив их на все октанты цветового 3D пространства. Начало координат в этом пространстве соответствует нулевому цвету, для которого  $\ln(a_{ri}/a_{r0}) = \ln(a_{gi}/a_{g0}) = \ln(a_{bi}/a_{b0}) = 0$  (когда  $a_{ri}/a_{r0} = a_{gi}/a_{g0} = a_{bi}/a_{b0} = 1$ ). Выделенные на схеме октанты с положительными (отрицательными) значениями по всем координатам содержат спектральные цвета с положительными (отрицательными) яркостями; остальные октанты соответствуют различным “грязным” цветам. Изображённые на рис. 1, в векторы С и С<sup>-</sup> иллюстрируют смысл вводимой автором диады “цвет/антицвет”. Фигурирующие в векторной модели А. Ярбуса понятия “цвет” и “антицвет” означают комплементарные (взаимно дополнительные) цвета, равно как и пара “(цветовые различия)/(обратные цветовые различия)” (Ярбус, 1975 b, 1976 b). Для пояснения смысла

этих понятий приведем несколько равнозначных определений, употребляемых А. Ярбусом:

– “*антицвет* дополнителен *цвету* по всем его характеристикам”, “каждая координата антицвета имеет знак, противоположный знаку цвета”; “сумма цвета и антицвета равна нулю”;

– “*обратные цветовые различия* компенсируют *цветовые различия*”, “цветовые различия и *обратные цветовые различия* в сумме дают нуль” (Ярбус, 1976 bc, 1977 ab).

Описываемые А. Ярбусом в нетрадиционных терминах особенности цветовосприятия, которые в его экспериментальных условиях обычно выражались в оцениваемых “на глаз” изменениях цветовых ощущений при изменении действующих стимулов, однако, имеют и иные толкования, например, в моделях одновременного контраста (Brill, West, 1986) и в представлениях Н. Ньюберга о феноменах и механизмах цветовой константности (Ньюберг, 1960). Существенным преимуществом этих моделей является то, что авторы не производят ревизии классических понятий и чётко прописывают измерительные процедуры для проверки предсказаний теории. В рамках модели Н. Ньюберга свойства “цвета” и “антицвета” строго физически выражаются на языке колориметрических координат. Это дополнительные окраски  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , для которых даются конкретные примеры оппонентных пар: “черного/белого”, “желтого/синего”, “зеленого/пурпурного” и так далее – образцов, порождающих трестимулы, векторная сумма которых равна реакции на *ахроматический* образец, – аналог “серого *нулевого* цвета” у А. Ярбуса. На этом же традиционном и корректном языке можно обрисовать суть “концептуальной нагрузки” вводимых А. Ярбусом “прямых и обратных цветовых различий” (векторной диады *дифференциального* рода): это “скачки” (перепады цвета либо в некой точке – по времени, либо одномоментно – на границе двух образцов), у которых разности пар векторов цвета различаются лишь знаком.

Из других работ по физиологическим аспектам проблемы цветовой константности следует отметить монографию коллеги А. Ярбуса – В. Максимова (Максимов, 1984). Он подробно рассмотрел вариант анализа *дихроматического* цветового тела с возможными биологическими примерами привлечения одной из теорем Н. Ньюберга для организации у ряда млекопитающих цветоконстантных моделей зрения.

Анализ экспериментальной основы концепции А. Ярбуса затрудняется двумя обстоятельствами: отсутствием возможности прямых измерений рассеянного света на крайней периферии сетчатки из-за проблем доступа к ней и отсутствием в тру-

дах А. Ярбуса описания процедур количественной оценки цветовых ощущений. В связи с этим в данной аналитической статье целесообразно ограничиться лишь иллюстрацией того, какого рода результаты экспериментов рассматривались как однозначно трактуемые и подтверждающие предсказания теории автора. Возьмём в качестве примера эксперимент из статьи (Ярбус, 1976 b). Схема установки была “типовой” (рис. 2): однородно окрашенный тестовый образец предъявляли на прозрачном экране из тонкого стекла, находящемся на присоске, фиксированной на глазу испытуемого, а фоновый образец другого цвета располагали на расстоянии 50–70 см от глаза. Фоновый образец, имеющий цвет  $E_1$ , рассматривался испытуемым через тубус присоски. Границы фонового образца попадали в поле зрения полностью, и поскольку они не были стабилизированными, воспринимаемый цвет фона  $E_1$  на протяжении эксперимента оставался неизменным. Тестовый образец, имеющий цвет  $E_2$ , помещали на экран, двигали и снимали при помощи тонкой кисточки, смоченной водой – образец держался на стекле за счёт сил поверхностного натяжения. Ход эксперимента описан следующим образом. После прикрепления тестового образца  $E_2$  к экрану и прекращения его движения, т.е. при стабилизации границ образца в поле зрения, он “заполнялся окружением” и приобретал цвет фона  $E_1$ . Когда процесс заполнения завершался, экспериментатор “резко менял” цвет образца, делая его равным цвету фона (в реальности образец с окраской  $E_2$  просто удалялся с экрана и на его месте теперь просматривался фоновый образец с окраской  $E_1$ ). Испытуемый должен был сообщить при этом об изменившемся цветовом впечатлении от участка поля зрения, где ранее располагался тестовый образец.

Для разъяснений механизма трансформаций цвета применительно к этой экспериментальной ситуации автор привлекал понятие *антицвет*, кроме того, использовал термин *аннигиляция* – для обозначения итога сложения “цвета и антицвета” или “цветовых различий и обратных цветовых различий”. В описании эксперимента результат предсказывался на языке векторной модели – в виде цвета “ $2E_1 - E_2$ ”. Формулу для описания “возникающего нового цвета образца” А. Ярбус получал из соотношения  $(E_1 - E_2) + E_1$ , как “суммы обратного цветового различия и цвета экрана”. Испытуемый давал отчет о соответствии своего ощущения цвету “ $2E_1 - E_2$ ” через субъективные оценки – *по памяти* об исходных цветах образца и экрана. К сожалению, во всех работах А. Ярбуса по исследованию цветовосприятия при описании соответствия опыта его теории прослеживается бесперспективная

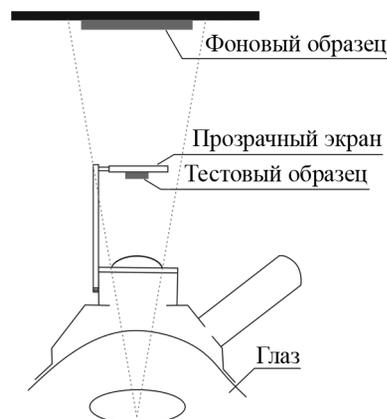


Рис. 2. Схема типичного эксперимента Ярбуса с использованием присоски, фиксированной на глазу испытуемого.

тенденция: на языке *качеств*, соотносимых с “нативным опытом”, автор пытается ввести *метрику* цвета, формальными свойствами модели не подержанную.

Следует заметить, что объяснение реально наблюдаемых в рассмотренных опытах изменений возможно в рамках классических представлений и не нуждается в привлечении новых концептов. К примеру, когда экран оставался все время красным, а изменялся только цвет образца, были получены следующие результаты. “Если образец имел белый цвет, яркость которого мало отличалась от яркости экрана, то в момент перехода от белого к красному (замене белого образца на красный) цвет образца казался темно-насыщенно-красным, гораздо насыщеннее красного цвета экрана”. Встаёт вопрос: а чего еще можно было ожидать при учете того, что на участках сетчатки, куда проецировался красный фон, имела место более сильная адаптация к красному, чем на месте белого образца (при равной яркости/светлоте белого и красного стимулов белый стимул должен содержать меньше красного излучения). Естественно, что действие красного света от “нового” образца (напомним, что фактически имело место удаление белого образца с экрана) на менее адаптированную к красному излучению область сетчатки порождало ощущение большей насыщенности красного цвета, а удаление остальных компонентов (зеленого и синего) приводило к ощущению потемнения. Аналогичным образом, для объяснения эффектов, имевших место при других цветовых сочетаниях фона и образца, тоже хватает учета адаптации, тем более что никаких количественных оценок в опытах не производилось.

В своей третьей экспериментальной серии автор впервые коснулся вопросов, связанных с из-

менением абсолютной спектральной чувствительности  $\chi_j(\lambda)$  в  $j$ -ом канале, сделав попытку включить в развиваемую векторную модель процессы динамической цветовой адаптации: уменьшения чувствительности рецепторов, тем большего, “чем ярче действующий свет и, в определенных пределах, чем продолжительнее его непрерывное действие” (Ярбус, 1977 а). При этом отсутствуют какие-либо ссылки на модель фон Криса (Kries, 1905) и на актуальные работы психологов, обсуждавших “адаптационные варианты” схем в моделях цветовой константности. Описания результатов опытов в этой серии сводятся к априори предсказуемым эффектам. Например, в опыте с продолжительной адаптацией к красному стабилизированному образцу и регулярными кратковременными “добавками” неяркого белого света наблюдалось постепенное снижение воспринимаемой яркости добавки и смещение её цвета в сине-зеленую область. Попутно был сделан вывод, что “искажения цветовых различий и различий, им обратных, возникающие при изменении чувствительности рецепторов, противоположны друг другу и в определенных условиях приводят к появлению отрицательных и положительных последовательных образов”. Никак нельзя согласиться с мнением автора, что по итогам опытов “с последовательными образами” ему удалось включить и эти феномены в свою векторную цветовую модель (даже способом ее “надстройки”). Уже тогда было ясно, что последовательные образы критическим образом зависят от размеров, структурированности и длительности порождающих их стимулов, условий эксперимента и состояния испытуемого, что, в частности, было очень наглядно продемонстрировано коллегами А. Ярбуса Г. Зенкиным и А. Петровым в экспериментах по исследованию константности пространственного восприятия (Петров, Зенкин 1976; Zenkin, Petrov, 2015). Вследствие этого уверенность А. Ярбуса в том, что ему удалось одной простой моделью описать всё многообразие последовательных образов, представляется, явным заблуждением.

Потенции развитого им подхода А. Ярбус резюмирует в статье с подзаголовком “Описание операций с цветами средствами векторной алгебры” (Ярбус, 1977 с). Фактическим содержанием статьи является новый виток авторских рассуждений о природе и свойствах цветовых векторов в 3D пространстве с “фиксированной ахроматической осью  $W$ , являющейся осью положительных и отрицательных яркостей”, и с перпендикулярно к ней расположенной плоскостью, условно названной “плоскостью нулевых яркостей”. При этом аргументы в защиту ортогонализации отсутствуют,

тогда как в *аффинном* пространстве “перпендикулярность” и “ось  $W$ ” не определены, о чем мы уже писали выше. Иными словами, перед читателем выстраивается картина *частично метризованного* векторного пространства, а новизна многогранного описания векторных операций заключается в том, что *цветовые различия*, ранее задававшиеся в символическом виде  $\Delta E$ , как величины перепадов (скачков) цветов на границе образцов, теперь предлагается трактовать в виде вектора, имеющего “точку приложения” (“начало”), длину  $\Delta E$  (“модуль вектора”) и “конец”. По существу это эквивалентное описание, доказательств возросшей строгости рассуждений нет. Операции с векторами (иллюстрирующими пять экспериментальных серий) автор завершает следующим выводом: “Тот факт, что в пространстве цветовых ощущений цвету соответствует вектор, а не точка, приводит нас к новому представлению о цвете — как о цветовом различии. При этом любому цветовому различию  $\Delta E(i, i + 1)$  соответствует цвет. В свою очередь любой цвет  $\Delta E(0, i)$  есть тоже цветовое различие, поскольку в пространстве цветовых ощущений началу координат соответствует нулевой цвет”. Последняя формула (5) статьи (Ярбус, 1977 с) завершает описание векторной теории восприятия цвета введением *базиса*  $\{(0, 1), (0, 2), (0, 3)\}$  выстроенного автором евклидова пространства цветовых ощущений:

$$\Delta E(0, i) = x\Delta E(0, 1) + y\Delta E(0, 2) + z\Delta E(0, 3),$$

где  $\Delta E(0, 1)$ ,  $\Delta E(0, 2)$  и  $\Delta E(0, 3)$  — цвета, соответствующие базисным векторам. Подчеркивается, что цвета могут иметь и положительные, и отрицательные яркости, а коэффициенты  $x$ ,  $y$ ,  $z$  — и положительные, и отрицательные значения. Применить эту формулу к реальному количественному анализу каких-либо экспериментов автора не представляется возможным.

**Общая оценка цветовой теории А. Ярбуса и актуальности использования её результатов.** Рассмотренная здесь теория, которую правильнее было бы именовать *концепция*, предлагая свои варианты ответов на некоторые узловые вопросы из числа неразрешенных проблем нейро- и психофизиологии цветовосприятия, рождает не меньшее количество вопросов, остающихся без ответа. Более того, некоторые выводы являются логически взаимно исключаящимися — согласно альтернативам интерпретации, формально не устранимым моделью и, чаще всего, даже не заявляемым автором в качестве аспекта ее *неоднозначности*.

Теория относится к анализу простейших случаев зрительной стимуляции с предъявлением во фронтальнопараллельной плоскости равномерно

окрашенных цветных образцов. Существенно, что в большинстве экспериментов организация тестового поля была концентрической. Это облегчало автору задачу описания работы постулируемых им эстафетных механизмов вычисления цвета, начиная с крайней периферии сетчатки. Каким образом эти эстафетные механизмы будут работать в случае пересекающихся или не полностью выявленных границ, автор не рассматривает. Очевидно, что модель не может претендовать на применимость в случае сетчаточных проекций реальных трехмерных сцен с наличием нескольких источников освещения. Возможно, она может быть полезной для пояснения работы некоторых частных автоматических промежуточных механизмов перцептивного уровня.

Наиболее уязвимы лежащие в фундаменте модели положения о существовании *отрицательных яркостей*, для измерения которых не предложено никаких процедур, и об *антицвете*, который получил определение через “свойство своей полной дополнительной *цвету* по всем качествам”. При этом *качествами цвета* объявлена триада *яркость/тон/насыщенность*, определения которым – в терминах модели – отсутствуют. Самостоятельно ещё можно домыслить, что означает у автора дополнительность по тону, но доопределить, каким же правилам должен формально удовлетворять параметр “дополнительной насыщенности”, минуя “внефизичность” в аксиоматике, проблематично. Что касается тона, то при аксиоматическом введении фиксированной ахроматической оси тон  $h_2$  некоторой точки  $C_2$  цветового 3D пространства можно признать *дополнительным* тону  $h_1$ , присущему точке  $C_1$ , при условии, что  $C_1$  и  $C_2$  принадлежат плоскости, проходящей через ахроматическую ось, и лежат по разные стороны от нее. В колориметрии фиксированной *ахроматической* оси нет, а, значит, “детерминизм позиции белой точки на плоскости цветности” необходимо как-то аргументировать, – либо ссылаясь на данные эксперимента, либо заявлять *аксиомой* и “не забывать об этом” – при формулировке выводов.

В качестве иллюстрации возможности безупречного построения симметричной цветовой пары можно привести работу Н. Ньюберга (Nyberg, 1928). Насколько проще, яснее и при этом физически корректно (и выразимо в координатах цветового пространства) задачу построением симметричной пары “с дополнительными цветовыми свойствами у  $\Phi(\lambda)$ ” для цветового тела автор решает введением категории *дополнительных окрасок*! (см. разд. *О процедурах нормализации...*). Единственным выходом из обсуждаемого “тупика теории” видится нам (если “взяться править конфигу-

рацию модели без согласия автора”) отказ от “неудачного” определения антицвета через свойства *дополнительности* и принятие для него в качестве достаточного – свойства симметрии у пары *цвет/антицвет* относительно точки *нулевого цвета*.

После этой “редакционной правки модели” остается сформулировать дополнительные условия, при которых симметрию в пространстве с осями  $(\ln(a_{r_i}/a_{r_0}), \ln(a_{g_i}/a_{g_0}), \ln(a_{b_i}/a_{b_0}))$  (см. пункт 6 теоретических положений) можно “по праву” считать реализующейся не в 8D (каким оно “видится нативно”), а в 3D пространстве *цветов А. Ярбуса*. Действительно, простой численный пример тождественности сигналов в канале  $j$ :  $0.5a_j/a_{j_0} \equiv a_j/2a_{j_0}$  – для столь разных (по своему генезису) ситуаций, когда случай двойного ослабления центрального стимула ( $0.5a_j$ ) оказывается перцептивно *неотличимым* от реализации двойного усиления периферического засвета ( $2a_{j_0}$ ), – при формально получаемых восьми комбинациях компонент (для полной комбинаторики *независимых* трехкомпонентных вариантов) с “усилениями/ослаблениями” – для рассматриваемого вектора “*цвета*” – ставит нас перед дилеммой:

– либо пространство объявлено *трихроматическим* неправомерно (механизм для предварительных оценок в задаче цветовой константности не эксплицируем в 3D пространстве, если не привлекать процедур адаптации в виде “перенастройки  $\chi_j(\lambda)$  по фон Крису”), и разнообразные 3D конструкции для  $\Delta E$  теряют тогда содержательность даже в качестве “иллюстраций к опыту”,

– либо, если найдутся аргументы в защиту сложившейся ситуации, допускается приемлемым столь многомерный *метамеризм* сигнала, что его наличие следовало бы показать или же опровергнуть в серии специальным образом подготовленных психофизических экспериментов.

Отметим, что *метамеризм* сигнала это даже не *метамеризм окрасок*, поскольку способ разграничения “лучей” и “окрасок”, а точнее *яркости* и *светлоты*, модель А. Ярбуса не включала, и на этом закончим её рассмотрение. На данном этапе наша цель состояла в анализе системы представлений А. Ярбуса в её первоизданном виде, мы не предполагали подробно обсуждать возможные шаги её эволюции. С учетом всего ранее высказанного, сформулируем компромиссный вывод. Довести свою модель до корректного вида А. Ярбус не успел. Однако это не мешает, жертвуя издержками теоретического плана, провести акцентацию на трех безусловно интересных механизмах ранней цветовой обработки монокулярного сигнала у трихроматов, исследованных А. Ярбусом. (Под ранней понимается обработка на начальных уров-

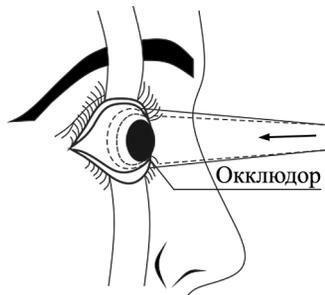


Рис. 3. Схема эксперимента А. Ярбуса с кольцевым засветом области, прилегающей к роговице, для создания равномерной диффузной стимуляции сетчатки через склеру; прямая световая стимуляция через зрачок предотвращалась при помощи окклюдора, прикрывающего роговицу.

нях в иерархии структур, восходящих к финальному когнитивному образу, в котором и воплощена актуальная модель воспринимаемого мира, с ее взаимно обусловленными механизмами константности цвета, формы, видимого положения и зрительного направления (Логвиненко, 1981).

- Эксперименты по изменению мощности и/или цветового тона освещения, создаваемого исключительно для рассеивающих сред глаза, при неизменной его стимуляции через хрусталик (в том числе и в ситуациях без стабилизации границ в зрительном поле испытуемого) показали, что крайняя периферия сетчатки, реагируя на рассеянный свет, оказывает в каждом цветовом канале  $j = 1, 2, 3$  независимое тормозное воздействие  $a_{j0}$ , доходящее до центральной ее зоны.

- Спектральный стимул, трансформированный колбочковым аппаратом в сетчаточный паттерн тристимулов, может быть “воспринятым” (превращается в зрительное ощущение, отличное от впечатления, называемого нулевым цветом) лишь при выполнении условий дифференциальной (по полю сетчатки и динамически – по  $t$ ) природы:  $S = \partial/\partial t((\text{grad } a)/a) \neq 0$  (см. п. 2 в разд. *Основополагающие постулаты...*).

- При наличии в поле зрения испытуемого ряда стабилизированных границ, созданных на сетчаточной проекции сцены в любой ее области, тормозное влияние “сигнала  $a_{j0}$  с периферии” обеспечивается работой независимого механизма “эстафетного” (в направлении от периферии к центру) *выравнивания* перепадов  $\Delta a_j$  “центрального” сигнала  $a_j$  на каждой стабилизированной границе, именуемое как феномен “заполнения области со стабилизированной границей цветом своего окружения”. В монографии (Ярбус, 1965) этот механизм был впервые описан для “простейших реализаций”, а в рамках обсуждаемого цикла работ он детализирован применительно к случаям

с более сложными конфигурациями односвязных границ.

Отметим сразу, что феномены, давшие А. Ярбусу основания говорить об указанных механизмах, наблюдались лишь в определенных условиях, которые обычно подбирались не только при подготовке, но и в ходе эксперимента, так как “нужный эффект” не сразу удавалось получить. Таким образом, в целом приведенные выше положения не могут рассматриваться как универсальные законы даже на перцептивном уровне, а по поводу каждого из утверждений можно сделать более конкретные замечания.

Прежде всего, положение А. Ярбуса об особой роли рассеянного света, попадающего на периферию сетчатки, было высказано им в четкой форме лишь в статье (Ярбус, 1975 а) с подзаголовком “Адекватный зрительный стимул”. При этом экспериментальная иллюстрация особенностей работы периферийной зоны в данной статье выглядит следующим образом (рис. 3).

“Достаточно равномерную засветку всей сетчатки удалось получить, освещая склеру глаза узким световым кольцом. Световое кольцо посылали на ту область склеры, под которой нет светочувствительной сетчатки... Опыты показали, что изменения во времени интенсивности и спектрального состава света, действующего на сетчатку, никак не воспринимаются наблюдателем, если вся поверхность сетчатки засвечивается равномерно. ...наблюдатель видит только нулевой цвет, остающийся неизменным даже в моменты включения и выключения засветки”. Однако в опубликованной ранее книге А. Ярбуса (Ярбус, 1965) на с. 73 читаем: “В одном из опытов с присоской ПЗ полностью закрывалась роговица, и свет мог проникать в глаз только через склеру и на склеру посылался яркий мелькающий свет. В этих условиях при частоте мельканий обычно от 6 до 15 периодов в секунду испытуемый видел яркие мозаики, переливающиеся всеми цветами радуги. Мозаики имели очень насыщенные цвета; они были мелкими в области фовеа и крупнее на периферии сетчатки...”.

Каким образом можно согласовать явное расхождение в результатах этих двух серий опытов, автор не объясняет и даже не упоминает раннюю серию экспериментов при описании более поздней.

Что касается предложенного математического определения адекватного стимула  $S = \partial/\partial t((\text{grad } a)/a)$ , то его анализ требует уточнения, по крайней мере, двух обстоятельств, касающихся условий наблюдения и описания результатов. Во-первых, нами было показано (Рожкова и др., 1982; Rozhkova et al., 1982), что качественное описание динамики  $S$  при стабилизации сетчаточных изображений

(снижение до нуля в течение нескольких секунд) утрачивает справедливость при переходе от *монокулярных* условий наблюдения к *бинокулярным*. Так, при бинокулярном восприятии стабилизированного однородного поля возникающий зрительный образ заполненного светом пространства, охватывающего голову испытуемого, мог сохранять яркость и хроматичность в течение нескольких минут (до конца эксперимента, продолжительность которого доходила до получаса), демонстрируя лишь медленное потемнение и снижение насыщенности. Никаких секундных процессов угасания образов при типичных для повседневности фотопических уровнях яркости в бинокулярных экспериментах и в помине не было. Таким образом, к *бинокулярному дневному* восприятию законы А. Ярбуса отношения не имеют. Означает ли это, что они определяются монокулярными механизмами, а в бинокулярных каналах обработки информации законы другие?

Во-вторых, даже если отвлечься от того, что механизмы природы “исключительно монокулярной” фактически остаются “*недоказуемой* вещью в себе”, и объявить их адекватной моделью работы перцептивной системы, то и в границах самой *монокулярной* концепции А. Ярбуса процессы контрастирования границ и цветовой адаптации оказываются корректно не эксплицируемыми в векторный аппарат модели. При получении “свидетельств правоты гипотез” из данных своих экспериментов автор вводит (Ярбус, 1977 а б; 1980) в модель “дополнительные” члены, включение которых окончательно разрывает связь (в математическом смысле, вне “ресурсов в пластике вербализации”) между “обобщающей” формулой для  $S$  и совокупностью феноменов, подлежащих описанию (накопленных дисциплиной и обнаруженных А. Ярбусом).

Перейдем теперь к обстоятельствам, связанным уже не с внутренней согласованностью “операторов” выстраиваемого формализма, а к аспектам содержательности математического описания преобразований сигнала в нейрофизиологии и “трансформаций образа” в психофизиологии, обеспечивающей *прогностику* эффектов в ходе экспериментального исследования механизмов *сложной* организации (в сравнении, например, с механизмом преобразования спектрального стимула в тристимул на сетчатке). Далеко не часто “дифференцирование” нейросигнала (фигурирующее в многочисленных вариациях привлечения *производных*) протекает в живом вычислителе согласно рекомендациям схемы Ньютона, а “классическое логарифмирование раздражений по Фехнеру” — выражается в буквальном соответствии со

свойствами функций  $\log$  или  $\ln$ . Наконец, в плане *целесообразности* — для парадигмы “фильтра дифференциальной природы” как *основы* тезиса об “адекватном стимуле  $S$ ” — остается вопрос “о вычислительных и информационных выгодах фильтрации постоянной составляющей сигнала” на *перцептивном* этапе его обработки, в соотношении с проблемой: а финальный уровень формирования “когнитивного образа мира” предполагает ли “восстановление” этой отсеченной компоненты? Как это ни парадоксально, коллеги А. Ярбуса, увлеченные его идеями, при математическом и электронном моделировании ставили своей целью именно восстановление *полнояркостного* изображения сцены, предположительно утрачиваемого из-за угасания сетчаточных сигналов, на основе производных, возникновение которых обеспечивают микродвижения глаз (Бонгард, Голубцов, 1970; Лосев, Шура-Бура, 1981).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Особенности экспериментальных методик А. Ярбуса, нацеленных преимущественно на выяснение роли движений глаз в зрительном восприятии посредством использования стимулов, фиксированных на присосках, существенно ограничивали возможности создания сложных сетчаточных изображений, сопоставимых с естественными проекциями реальных сцен. Большая часть теоретических рассуждений А. Ярбуса и его заключений относительно эстафетного механизма вычисления видимого цвета в каждой точке сетчатки (поля зрения) базируется на результатах экспериментов с предъявлением простых плоских картин, содержащих несколько однородно окрашенных участков (кусочков цветной бумаги), часто располагающихся концентрически для удобства демонстрации работы эстафетного механизма. Такая организация стимульного поля автоматически обеспечивала равенство скачков спектральных сигналов вдоль всей границы между соседними участками, чего практически не бывает в естественных сценах (рис. 4).

Заметим, однако, что даже в простых стимулах А. Ярбуса далеко не всегда обеспечивалось реальное равенство скачков на всём протяжении границ между объектами, если анализировать не предъявляемый физический стимул (рис. 4, а), а его сетчаточное изображение, в котором отсутствуют фрагменты, вырезаемые сетью кровеносных сосудов и диском зрительного нерва (рис. 4, б). Уже по этой причине следует с осторожностью относиться как к трактовке результатов “цветовых” экспериментов А. Ярбуса, так и к его попытке создания общей

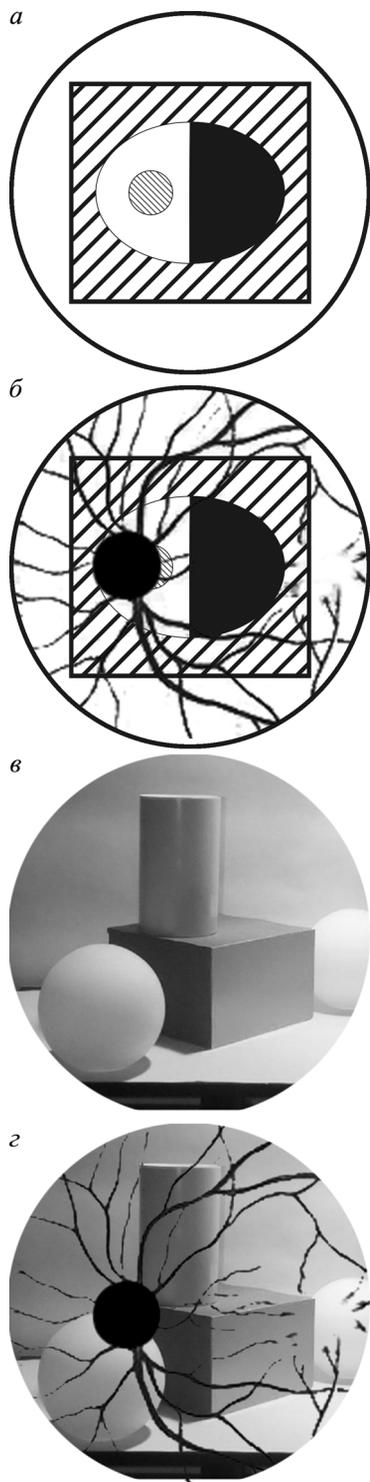


Рис. 4. Схема типичной организации тестового поля в экспериментах А. Ярбуса (а) и вид этого поля при проецировании на сетчатку глаза (б) с учётом наличия сети кровеносных сосудов и слепого пятна; типичное изображение, используемое для тестирования систем искусственного зрения (в) и вид этого изображения на сетчатке при наблюдении испытуемым (з).

теории цветовосприятия. Попутно отметим, что при тестировании технических систем искусственного зрения обычно используют более сложные изображения – композиции из объёмных фигур, при освещении которых создаются плавные градиенты отражаемого света и тени (рис. 4, в), однако в этих тестовых изображениях отсутствуют дефекты “сетчаточного типа”. Очевидно, что разрабатываемые модели зрения человека должны предусматривать возможность анализа тестовых стимулов, имитирующих как свойства реальных трехмерных сцен, так и “дефектность” сетчатки, т.е. изображений типа (рис. 4, з).

Оценивая продуктивность идей А. Ярбуса относительно роли “периферического засвета”, являющегося неким аналогом “гипотезы о доминирующем источнике освещения  $S(\lambda)$ ”, напомним, что в технических реализациях задачи цветовой константности соответствующие оценки давно проведены. Такая гипотеза применяется в качестве “ключа цветовой константности” (КЦК) в модели Grey World (Buchsbaum, 1980). В ней для получения КЦК постулируется идея (“странная, если претендовать на универсальность ее применения”), состоящая в том, что так называемые “богатые цветовым разнообразием  $\Phi_i(\lambda)$  сцены” дают шанс на вычисление приемлемой оценки цветности доминирующего источника через *среднее* по всем стимулам в поле зрения. Данная модель ныне фигурирует как “нуль отсчета” в рейтинге предлагаемых схем с разнообразными КЦК (Guth et al., 1980; Klinker et al., 1990; D’Zmura, Iverson, 1993; Tominaga, Wandell, 1996; Finlayson, Schaefer, 2001; Barnard et al., 2002), поскольку имеет наихудшие статистические показатели.

Чтобы у читателя не возникло сомнений в отношении продекларированной нами невысокой эффективности биологических и психофизиологических моделей цветовой константности в сравнении с показателями инженерных разработок в цветоразличении, подчеркнем, что современные технические модели цветового зрения “вышли на когнитивный рубеж систем AI”. Цель их однозначно связывается ныне с формированием оценок отражательных свойств тел в *реально сложных* условиях 3D сцен, а модели, демонстрирующие лишь качественное соответствие эффекта цветовой трансформации поля тристимулов ожидаемому по теории сдвигу, как это принимается “достаточно” для чисто цветовых перцептивных схем, давно считаются неприемлемыми. По причинам неудовлетворительной точности распознавания окраски объектов фактически на сегодняшний день в области технического зрения отвергнуты вычислительные подходы, использующие и лате-

рально регулируемый (через эффективный диаметр его рецептивного поля влияния) механизм цветовой адаптации, и модель GreyWorld, и “даже” алгоритм Gamut (в связи с трудностями его применения в сценах с *двумя* источниками освещения, что повсеместно встречается в пленэрных ситуациях “с солнцем и синим небом”).

Важнейшая роль в “векторной” модели А. Ярбуса отводится формальным законам, в соответствии с которыми “цветовой 3D сигнал” *детерминированно* трансформируется на *границе* областей “разного цвета”. При этом *типизация* самой границы, являющаяся чуть ли не решающим обстоятельством для адекватного распознавания 3D сцен, не входит “по Ярбусу” в число описываемых задач и процедур, каковые ограничиваются “формулами для поперечного скачка сигнала на границе”. Цветоконстантное восприятие (как составная часть *объектного* распознавания сцены наблюдателем-трихроматом) с необходимостью включает адекватный анализ границ разного генезиса (и, соответственно, особой их роли для процедур визуальной интерпретации объектов по “цвету” и “форме”): областей *блика* на глянцевых поверхностях, границе *тени, ребра* на объекте однотонной окраски и прочая.

В качестве примера, демонстрирующего принципиальную непригодность декларируемых А. Ярбусом операций привлечения “*поперечных* скачков сигнала на границе двух цветов” для требуемого (в когнитивном цветоконстантном акте) учета закономерностей изменения сигнала “*вдоль* границы”, укажем на детекцию границы окклюзии (когда *контур объекта* заслоняет часть сцены, расположенную за ним, т.е. имеет место “скачок по глубине”), автоматически производимую наблюдателем, в том числе и в условиях монокулярной статики – в результате “перцептивного обнаружения” факта полной *некоррелированности* цветовых компонент сигнала с каждой стороны границы. В то же время на границах типа *ребро* цветовые компоненты сигнала ведут себя “предсказуемо согласованно”, что позволяет на этапе *цветовой сегментации* объединить “границы разного цвета, разделяемые ребром”, – в объект *единой окраски* (Nikolaev, Nikolayev, 2004).

Кратко коснемся и вопросов, связанных с ролью бликов в восприятии (“цвета и формы” 3D объектов сцены), анализ которых требует *нелокальных* операций обработки сигнала, нереализуемых в модели А. Ярбуса. При малоапертурном доминирующем источнике освещения глянцевых диэлектрических поверхностей видимые блики на них несут довольно точную информацию о *цветности* источника (т.е. фигурируют для трихромата в ка-

честве *ключа* цветовой константности, что с 80-х годов XX в. заявлено целесообразным для трихроматических систем цветоконстантного технического зрения). Однако этап оценки компонент цветности связан с обязательной нормировкой по яркости (поскольку мощность блика многократно превышает средние яркости областей поля зрения с “незеркальным” отражением лучей в направлении сенсора-наблюдателя). В силу означенных причин, на когнитивном уровне “зрящий мозг” должен оперативно (“on line”) и безошибочно решить три задачи: детектировать видимые блики, произвести адекватную компенсацию их яркости и оценить по ним цветность источника. Успешной детекции блика способствуют два обстоятельства: сам факт значительного скачка яркости на его границе и различие в пространственной локализации блика на породившем его фрагменте поверхности в сцене при наблюдении левым и правым глазом (стерео-признак). Понятно, что ни *стерео-признак* блика, ни поведение скачка сигнала в его ареале не могут быть формально описаны и функционально воспроизведены в рамках обсуждаемой нами векторной модели.

Завершая рассмотрение задач целенаправленного анализа границ, актуально производимого трихроматом в ходе объектного восприятия 3D сцен, упомянем и проблему операциональных ограничений эффективности механизма цветовой константности. Обязательность акта классификации границ косвенным образом – через наличие пределов возможного для механизмов константности человека – подчеркивает известный феномен “цветных теней Гёте”. Этот феномен проявляется при наблюдении сцены с парой существенно различных по тону малоапертурных источников освещения, порождающих тени. При этом человек констатирует серьезные затруднения в попытке связать цветовые характеристики двух наборов теней с цветностью *источников*, а не с “иллюзорной окрашенностью” поверхности (объективно *белой*), на которую эти тени легли. В то же время трихроматические технические системы такие задачи решают: привлечение линейной модели формирования спектрального стимула (Nikolaev, Nikolayev, 2004) дает правильную типизацию границ тени (именно с ней человек не справляется) и обеспечивает возможность *адекватных* цветовых оценок.

В контексте стоявшей перед нами задачи главный итог проведенного анализа можно выразить следующим образом: незавершенность и нестрогость работ А. Ярбуса по построению перцептивной модели механизмов трихроматического зрения ни в коей мере не умаляют значения *феноменологических* аспектов исследований А. Ярбуса. Все те

выявленные методами психофизики механизмы, которые представляются имплементарными для обеспечения феномена цветовой константности, т.е. функционально целесообразными и имеющими дополнительно нейрофизиологическое правдоподобие, достойны пристальнейшего экспериментального изучения, включая численное моделирование теоретических схем и алгоритмов параллельного действия, их уточнение и доработку через формально количественную детализацию процедур обработки сенсорного паттерна в трихроматических системах.

Авторы выражают благодарность Е. К. Крутцовой и М. А. Грачевой за техническую помощь.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 16-04-01421\_a).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бонгард М. М.* Колориметрия на животных // ДАН СССР. 1955. Т. 103. (N2). С. 239–242 (*Bongard M. M. Colorimetry on animals // Dokl. Ac. Sci. USSR. 1955. V. 103 (N2). P. 239–242 [in Russian]*).
- Бонгард М. М., Голубцов К. В.* О типах горизонтального взаимодействия, обеспечивающих нормальное видение перемещающихся по сетчатке изображений (моделирование некоторых функций зрения человека) спектральной // Биофизика. 1970. Т. 15. (N2). С. 361–373 (*Bongard M. M., Golubtsov K. V. On some types of horizontal interactions providing normal vision of images moving along the retina (modeling of some human visual functions) // Biofizika. 1970. V. 15. (N2). P. 361–373 [in Russian]*).
- Логвиненко А. Д.* Зрительное восприятие пространства. М.: Изд-во МГУ, 1981. 224 с. (*Logvinenko A. D. Visual perception of space. Moscow: MSU Press, 1981. 224 p. [in Russian]*).
- Лосев И. С., Шура-Бура Т. М.* Модель восприятия движущихся и неподвижных объектов // Биофизика. 1981. Т. 26 (V 5). С. 854–859. (*Losev I. S., Shura-Bura T. M. The model of perception of moving and stationary objects // Biofizika. 1981. V. 26. (N5). P. 854–859 [in Russian]*).
- Максимов В. В.* Трансформации цвета при изменении освещения. М.: Наука, 1984. (*Maximov V. V. Color transformation with changing illumination. Moscow: Nauka, 1984 [in Russian]*).
- Максимов В. В., Николаев П. П.* Цветовая оппонентность и константность цветовосприятия // Биофизика. 1974. Т. 19. N1. С. 151–157 (*Maximov V. V., Nikolaev P. P. Color opponency and constancy of color perception // Biofizika. 1974. V. 19. (N1). P. 151–157 [in Russian]*).
- Николаев П. П.* Модель цветовой константности для случая непрерывных спектральных функций // Биофизика. 1985. Т. 30. (N1). С. 112–117 (*Nikolayev P. P. Model of colour constancy for the case of continuous spectral functions // Biofizika. 1985. V. 30. (N1). P. 112–117 [in Russian]*).
- Нюберг Н. Д.* Парадоксы цветового зрения // Природа. 1960. № 8. С. 53–59 (*Nyberg, N. D. Paradoxes of color vision // Priroda. 1960. No 8. P. 53–59 [in Russian]*).
- Нюберг Н. Д., Бонгард М. М., Николаев П. П.* 1. О константности восприятия окраски // Биофизика. 1971а. Т. 16. N2. С. 285–293 (*Nyberg, N. D., Bongard, M. M., Nikolayev P. P. 1. About constancy in perception of coloration // Biofizika. 1971a. V. 16 (2). P. 285–293 [in Russian]*).
- Нюберг Н. Д., Николаев П. П., Бонгард М. М.* 2. О константности восприятия окраски // Биофизика. 1971б. Т. 16. N6. С. 1052–1063 (*Nyberg, N. D., Nikolayev P. P., Bongard M. M. 2. About constancy in perception of coloration // Biofizika. 1971b. V. 16 (N6). P. 1052–1063 [in Russian]*).
- Петров А. П.* О структуре многообразия цвета. Препр. N4050/15. М.: Ин-т атом. энергии им. И. М. Курчатова, 1984. 19 с. (*Petrov A. P. Structure of the set of perceived colors. Moscow: Kurchatov Atomic Energy Institute, Preprint IAE No. 4050/15. 1984 [in Russian]*).
- Петров А. П., Зенкин Г. М.* Сетчаточные изображения как источники информации о позициях глаз в орбитах и бинокулярных механизмах формирования видимого пространства // Физиология человека. 1976. Т. 2 (N6). С. 932–939 (*Petrov A. P., Zenkin G. M. The retinal images as sources of information about the eye positions in the orbits and binocular mechanisms of the visual space formation // Human Physiology. 1976. V. 2 (N6). P. 932–939 [in Russian]*).
- Рожкова Г. И., Николаев П. П., Щадрин В. Е.* О факторах, определяющих особенности восприятия стабилизированных изображений // Физиология человека. 1982. Т. 8 (N4). С. 564–571 (*Rozhkova G. I., Nikolayev P. P., Shchadrin V. E. On the factors that determine the peculiarities of stabilized retinal image perception // Human Physiology. 1982. V. 8 (N4). P. 564–571 [in Russian]*).
- Рожкова Г. И., Белокопытов А. В., Грачева М. А.* Загадки слепой зоны и кольца повышенной плотности колбочек на крайней периферии сетчатки // Сенсорные системы. 2016. Т. 30 N4. С. 263–281 (*Rozhkova G. I., Belokopytov A. V., Gracheva M. A. Mysteries of the cone-enriched rim and blind zone at the periphery of the human retina // Sensory systems. 2016. V. 30 (N4). P. 263–281 [in Russian]*).
- Ярбус А. Л.* Роль движений глаз в процессе зрения. М.: Наука, 1965. 166 с. (*Yarbus A. L. Eye movements and vision. NY: Plenum Press, 1967. 217 p. [Translated from Russian]*).
- Ярбус А. Л.* О работе зрительной системы человека. I. Адекватный зрительный стимул // Биофизика. 1975а. Т. 20. N5. С. 916–919 (*Yarbus A. L. Human visual system. I. Adequate visual stimulus // Biofizika. 1975a. V. 20 (N5). P. 916–919 [in Russian]*).

- Ярбус А.Л.* О работе зрительной системы человека. II. Цвет // *Биофизика* 1975. Т. 20. №6. С. 1099–1104. (*Yarbus A. L.* Human visual system. II. The perceived colour. *Biofizika*. 1975b. V. 20 (N6). P. 1099–1104 [in Russian]).
- Ярбус А.Л.* О работе зрительной системы человека. III. Пространство цветовых ощущений // *Биофизика*. 1976а. Т. 21. № 1. С. 150–152 (*Yarbus A. L.* Human visual system. III. The space of colour sensations // *Biofizika*. 1976a. V. 21 (N1). P. 150–152 [in Russian]).
- Ярбус А.Л.* О работе зрительной системы человека. IV. Обратное цветовое различие и антицвет // *Биофизика*. 1976б. Т. 21. № 4. С. 735–738 (*Yarbus A. L.* Human visual system. IV. Opposite color difference and anticolor. The first series of experiments // *Biofizika*. 1976b. V. 21 (N4). P. 735–738 [in Russian]).
- Ярбус А.Л.* О работе зрительной системы человека. V. Обратное цветовое различие и антицвет // *Биофизика*. 1976в. Т. 21. № 5. С. 913–916. (*Yarbus A. L.* Human visual system. V. Opposite color difference and anticolor. The second series of experiments // *Biofizika*. 1976в. V. 21 (N5). P. 913–916 [in Russian]).
- Ярбус А.Л.* О работе зрительной системы человека. VI. Обратное цветовое различие и антицвет // *Биофизика*. 1977а. Т. 22. № 1. С. 123–126 (*Yarbus A. L.* Human visual system. VI. Opposite colour difference and anticolor. Third series of experiments // *Biofizika*. 1977a. V. 22 (N1). P. 123–126 [in Russian]).
- Ярбус А.Л.* О работе зрительной системы человека. VII. Обратное цветовое различие и антицвет // *Биофизика*. 1977б. Т. 22. № 1. С. 123–126 (*Yarbus A. L.* Human visual system. VII. Opposite color difference and anticolor. Fourth series of experiments // *Biofizika*. 1977b. V. 22 (N2). P. 328–333 [in Russian]).
- Ярбус А.Л.* О работе зрительной системы человека. VIII. Описание операций с цветами средствами векторной алгебры // *Биофизика*. 1977в. Т. 22. № 6. С. 1087–1094 (*Yarbus A. L.* Human visual system. VIII. Description of colour transformations by means of vector algebra // *Biofizika*. 1977в. V. 22 (N6). P. 1087–1094 [in Russian]).
- Ярбус А.Л.* О работе зрительной системы человека. Одновременный и последовательный контраст // *Биофизика*. 1979. Т. 24. № 3. С. 524–527 (*Yarbus A. L.* On the work of human visual system. Simultaneous and successive contrast // *Biofizika*. 1979. V. 24 (N3). P. 524–527 [in Russian]).
- Ярбус А.Л.* О работе зрительной системы человека. Роль дрейфа сетчаточного изображения и быстрого изменения чувствительности сетчатки в восприятии цвета // *Биофизика*. 1980. Т. 25. № 3. С. 548–554 (*Yarbus A. L.* Human visual system. Combined role of drift and fast changes of retinal sensitivity // *Biofizika*. 1980. V. 25 (N3). P. 548–554 [in Russian]).
- Barghout L.* Visual taxometric approach to image segmentation using fuzzy-spatial taxon cut yields contextually relevant regions. *Information processing and management of uncertainty in knowledge-based systems // Springer international publishing*, 2014. P. 163–173.
- Barnard K., Martin L., Coath A., Funt B.* A comparison of colour constancy algorithms. Part two. Experiments with image data // *IEEE Trans. Image Processing*. 2002. V.11 (N9). P. 985–996.
- Brill M. H.* A device performing illuminant-invariant assessment of chromatic relations // *J. Theor. Biol.* 1978. V. 71. P. 473–478.
- Brill M. H., West G.* Chromatic Adaptation and Color Constancy: A Possible Dichotomy // *Color Res. Applicat.* 1986. V. 11 (3). P. 196–204.
- Buchsbaum G.* A spatial processor model for object-colour perception // *J. Franklin Inst.* 1980. V. 310. P. 1–26.
- D'Zmura M, Iverson G.* Colour constancy. I. Basic theory of two-stage linear recovery of spectral description for lights and surfaces // *J. Opt. Soc. Amer. A*. 1993. V. 10. P. 2148–2165.
- Finlayson G. D., Schaefer G.* Solving for colour constancy using a constrained dichromatic reflection model // *Int. J. Computer Vision*. 2001. V. 42 (3). P. 127–144.
- Forsyth D.* A novel approach to color constancy // *Intern. J. Computer Vision*. 1990. V. 18(1). P. 5–36.
- Funt B. V., Drew M. S.* Color space analysis of mutual illumination // *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 1993. V. 15(12). P. 1319–1326.
- Grassmann H.* On the theory of compound colors // *Phil. Mag.* 1854. V. 7. P. 254–264.
- Gregory R. L.* The intelligent eye. London: Weidenfeld & Nicolson. 1970.
- Guth S. L., Massof R. W., Benzschawel T.* Vector model for normal and dichromatic color vision // *J. Opt. Soc. Amer.* 1980. V. 70. No 2. P. 197–212.
- Helmholtz H. von.* Treatise on Physiological Optics. V. 3. Dover publications, 1867.
- Hurlbert A. C.* Formal connections between lightness algorithms // *J. Opt. Soc. A*. 1986. V. 3. P. 1684–1693.
- Hurlbert A., Wolf K.* Color contrast: a contributory mechanism to color constancy // *Prog. Brain Res.* 2004. V. 144. P. 147–160.
- Helson H.* Adaptation-level theory. N.Y.: Harper and Row. 1964.
- Horn B. K. P.* Determining lightness from an image // *Computer Graphics and Image Processing*. 1974. V. 3(1). P. 277–299.
- Kimmel R., Elad M., Shaked D., Keshet R, Sobel I.* A variational framework for Retinex // *Int. J. Computer Vision*. 2003. V. 52 (1). P. 7–23.
- Klinker G. J., Shafer S. A., Kanade T. A.* Physical Approach to Color Image Understanding // *Int. J. Computer Vision*. 1990. V. 4. P. 7–38.
- Kries von J.* Influence of Adaptation on the Effects Produced by “Luminous Stimuli”. // *Handbuch der Physiologie des Menschen*, Vieweg, Braunschweig. 1905. V. 3. P. 109–282.

- Land E. H., McCann J. J.* Lightness and Retinex Theory // *J. Opt. Soc. Am.* 1971. V. 61(1). P. 1–11.
- Land E. H.* The Retinex theory of color vision // *Sci. Amer.*, 1977. V. 237, P. 108–128.
- Land E. H.* An alternative technique for the computation of the designator in the Retinex theory of color vision // *Proc. Nat. Acad. Sci. USA.* 1986. V. 83. P. 3078–3080.
- Marr D.* The Computation of lightness by the primate retina // *Vision Research.* 1974. V. 14. P. 1377–1388.
- McCann J. J., Hall J. A., Land E. H.* Color mondrian experiments: The study of average spectral distribution // *J. Opt. Soc. Amer.* 1977. V. 67 (10). 1380 p.
- Morel J. M., Petro A. B., Sbert C.* Fast implementation of color constancy algorithms // *IS&T/SPIE Electronic Imaging. International Society for Optics and Photonics,* 2009. P. 106–110.
- Nikolaev D. P., Nikolayev P. P.* Linear color segmentation and its implementation // *Color Vision and Image Understanding,* 2004. V. 94. P. 115–139.
- Nikolaev D. P., Nikolayev P. P.* On Spectral Models and Colour Constancy Clues // *21<sup>st</sup> Europ. Conf. Model. Simulat. ECMS. Prague, Czech Republic.* 2007. P. 318–323.
- Nikolaev P. P., Rozhkova G. I.* Yarbus's conceptions on the general mechanisms of color perception // *Perception.* 2015. V. 44 (8–9). P. 952–972.
- Nyberg N.* Zum Aufbau des Farbenkörpers im Raume aller Lichtempfindungen // *Zeitschrift für Physik.* 1928. V. 52(5). P. 406–419.
- Petrov A. P., Kontsevich L. L.* Properties of color images of surfaces under multiple illuminants // *J. Opt. Soc. Am., A.* 1994. V. 11(10). P. 2745–2749.
- Rozhkova G. I., Nikolaev P. P.* Visual percepts in the cases of binocular and monocular viewing stabilized test objects, ganzfeld stimuli, and prolonged afterimages // *Perception.* 2015. V. 44 (8–9). P. 934–951.
- Rozhkova G. I., Nikolayev P. P., Shchadrin V. E.* Perception of stabilized retinal stimuli in dichoptic viewing conditions // *Vision Research.* 1982. V. 22. P. 293–302.
- Schrödinger E.* Grundlinien einer Theorie der Farbenmetrik im Tagessehen // *Annalen der Physik.* 1920. V. 368 (63). P. 397–426.
- Shafer S. A.* Using color to separate reflection components // *Color Res. Appl.* 1985. V. 10. P. 210–218.
- Tominaga S., Wandell B. A.* Standart surface-reflectance model and Illuminant estimation // *J. Opt. Soc. Am. A.* 1996. V. 6 (4). P. 576–584.
- Weinberg J. W.* The geometry of colors // *Gen. Relativ. Gravity.* 1976. V. 7. P. 135–169.
- Zenkin G. M., Petrov A. P.* Transformation of the visual afterimage under subject's eye and body movements and the visual field constancy mechanisms // *Perception.* 2015. V. 44 (8–9). P. 971–985.

## ANALYSIS OF THE YARBUS'S CONCEPTIONS ON THE ROLE OF THE BLIND RETINA IN COLOR PERCEPTION

P. P. Nikolaev, G. I. Rozhkova

*Institute for Information Transmission Problems  
(Kharkevich Institute), RAS 127051 Moscow, B. Karetny per., 19*

In the last series of his papers published during 1975–1980 A. Yarbus tried to formulate general conceptions concerning the basic principles of retinal image processing in the human visual system. Focusing primarily on the problems of color vision, A. Yarbus intended to elaborate a comprehensive model imitating information processing in human with normal 3-chromatic color perception. The key idea of A. Yarbus concerned explanation the whole variety of color sensations and the phenomena of color constancy due to the usage of the signals from the so-called blind retina – the extreme retinal periphery where the formation of images is supposedly impossible and only diffused light is present. In this paper, the most important of Yarbus's experimental paradigms, findings, statements, and conclusions are discussed in relation to the classical theories of color perception and, in particular, to the fundamental theses of the Nyberg's school. The perceptual model developed by A. Yarbus remained incomplete. Our retrospective analysis of this model revealed some intrinsic contradictions and restrictions that make it insufficient regarding elaboration of a universal comprehensive model. However, as a whole, the experimental achievements and general ideas of A. Yarbus are principally interesting and deserve more thorough appreciation and further investigation.

*Key words:* color vision theory, blind retina, color constancy, human vision modeling.