

*Бинокулярная диспаратность и стереопсис*

Диспаратность образов, проецируемых на сетчатки обоих глаз, лежит в основе уникального явления, связанного с особым восприятием глубины и объема и называемого стереоскопическим зрением, или стереопсисом (от греческого слов stereos — твердый, объемный, пространственный иopsis — зрение). Одним из наиболее впечатляющих примеров стереоскопического зрения является восприятие эффекта глубины при просмотре слайдов с помощью такого знакомого многим оптического прибора, как стереоскоп. Первый стереоскоп был создан в 1838 г. английским физиком Чарльзом Уитстоуном (Wheatstone), который доказал, что при предъявлении каждому глазу отличающихся друг от друга незначительными деталями плоскостных изображений одной и той же сцены, называемых стереограммами (стереопарами, или стереополями), возникает иллюзия объема.

Итак, стереограммы — это парные картины, на одной из которых изображено то, что видит левый глаз, а на другой то, что видит правый. Когда слегка диспаратные картины, объединенные в пары надлежащим образом, рассматриваются через стереоскоп, сцена приобретает стереоскопическую глубину, т.е. создается полное впечатление единого объемного изображения.

Принцип действия общеизвестного стереопроектора View-Master аналогичен принципу действия стереоскопа: с его помощью зрителю предъявляются два разных изображения одной и той же сцены, сделанных стереофотоаппаратом, т.е. фотоаппаратом, имеющим два объектива, расстояние между которыми равно расстоянию между глазами. Две фотографии, сделанные с помощью такого фотоаппарата, отличаются друг от друга настолько, насколько отличаются друг от друга левое и правое ретинальные изображения фотографируемой сцены. После того как эти фотографии проявлены и каждая из них предъявлена с помощью стереопроектора соответствующему глазу (левый глаз должен видеть только фотографию, сделанную левым объективом, а правый — только фотографию, сделанную правым объективом), изображения сливаются и возникает поразительный стереоскопический эффект.

В известных пределах впечатление объемности, или трехмерной глубины, зависит от диспаратности двух изображений, предъявленных с помощью стереоскопа или стереопроектора, и оно тем сильнее, чем больше диспаратность. Это позволяет высказать принципиальное соображение, касающееся зависимости стереоскопичности зрения от расстояния между объектом и наблюдателем, пользующимся бинокулярным зрением. Как правило, зрительное восприятие близлежащих объектов требует большей конвергенции обоих глаз и приводит к большей диспаратности. Следовательно, чем ближе к наблюдателю расположен объект, тем сильнее проявляется стереоскопический эффект глубины. Например, если поднести ладонь совсем близко к лицу и начать рассматривать ее, то впечатление объемности будет очень сильным. В подобной ситуации благодаря бинокулярному зрению округлость пальцев и то, что они вплотную примыкают друг к другу, а также все выпуклости и впадины ладони предстанут перед вами в виде объемного изображения (однако стоит лишь на мгновение прикрыть один глаз, и стереоскопический эффект исчезнет!). Напротив, на удаленном объекте глаза практически не конвергируют и изображения на двух сетчатках, практически идентичны, вследствие чего бинокулярная диспаратность либо вовсе отсутствует, либо выражена очень слабо. Следовательно, чем больше расстояние от наблюдателя до объекта, тем меньше бинокулярная диспаратность и тем менее объемными кажутся объекты.

Перцептивные эффекты бинокулярной диспаратности могут иметь важные практические последствия. Благодаря чрезвычайной чувствительности зрительной системы даже к незначительной информации о бинокулярной диспаратности стереоскопическое зрение позволяет нам обнаруживать мельчайшие отличия между изображениями, которые на

первый взгляд кажутся идентичными. Например, стереоскопическое зрение может быть использовано для выявления фальшивых купюр. Если каждый глаз видит настоящую купюру, между двумя ретинальными изображениями нет никакой диспаратности и происходит их слияние. Но если один глаз видит фальшивую купюру (пусть даже мастерски изготовленную), а второй — подлинную, диспаратность двух образов немедленно выявит и незначительное различие, поскольку полного совпадения визуальных элементов двух купюр не будет. Точно так же, стереоскопически, эксперты-баллистики изучают увеличенные фотографии разных пуль, когда им нужно определить, были ли произведены выстрелы из одного оружия (Bloomer, 1970). Если образы пуль на сетчатках идентичны (т.е. если отсутствует диспаратность), значит, обе пули были выпущены из одного и того же оружия.

### *Анаглифы.*

Вполне возможно, что самый знакомый (и удобный) способ испытать эффект стереоскопического зрения — воспользоваться стереоскопом или стереопроектором. Сильное стереоскопическое впечатление может быть также получено и с помощью анаглифа (от греческого *anaglyphos* — рельефный) стереограммы. Анаглиф представляет собой особую стереограмму, для получения которой одна картина из стереопары печатается поверх другой, причем эти картины окрашены в разные цвета, как правило, красный и зеленый. Если рассматривать анаглиф без соответствующего прибора, два цвета, из которых один нанесен поверх другого, сливаются и изображение выглядит размытым. Но если рассматривать его через специальные очки с цветными стеклами (стекла должны быть разного цвета, красного и зеленого), каждый глаз «отбирает» соответствующее ему единственное изображение (глаз с красным фильтром видит только зеленое изображение, а глаз с зеленым — только красное) и анаглиф воспринимается стереоскопически, как объемное изображение. Создание большинства 3-D-фильмов (стереофильмов) основано на методе цветных анаглифов, именно поэтому, чтобы почувствовать стереоскопический эффект, их нужно смотреть в красно-зеленых очках.

### *Бинокулярное соперничество*

Выше уже отмечалось, что слияние ретинальных изображений левого и правого глаз, происходит только тогда, когда эти образы практически идентичны. В результате эволюции мозг и зрительная система приобрели способность воспринимать и обрабатывать только такую визуальную информацию, которая приводит к образованию двух практически идентичных ретинальных изображений. В тех же случаях, когда эти изображения весьма значительно отличаются друг от друга, наблюдается необычное явление, называемое бинокулярным соперничеством. Общеизвестно, что бинокулярное соперничество — результат искусственно создаваемых условий видения, редко встречающихся за пределами исследовательских лабораторий. Однако понимание того, как зрительная система «справляется» с условиями, при которых возникает бинокулярное соперничество, может помочь понять фундаментальные перцептивные процессы, лежащие в основе восприятия зрительной системой визуально двойственных ситуаций. Более того, эта проблема имеет непосредственное отношение и к медицине: перцептивные эффекты бинокулярного соперничества тесно связаны с перцептивными эффектами некоторых расстройств зрения, таких, например, как амблиопия и страбизм (косоглазие) (о нем будет рассказано ниже, в главе 11), которые снижают эффективность бинокулярного зрения или полностью исключают его.

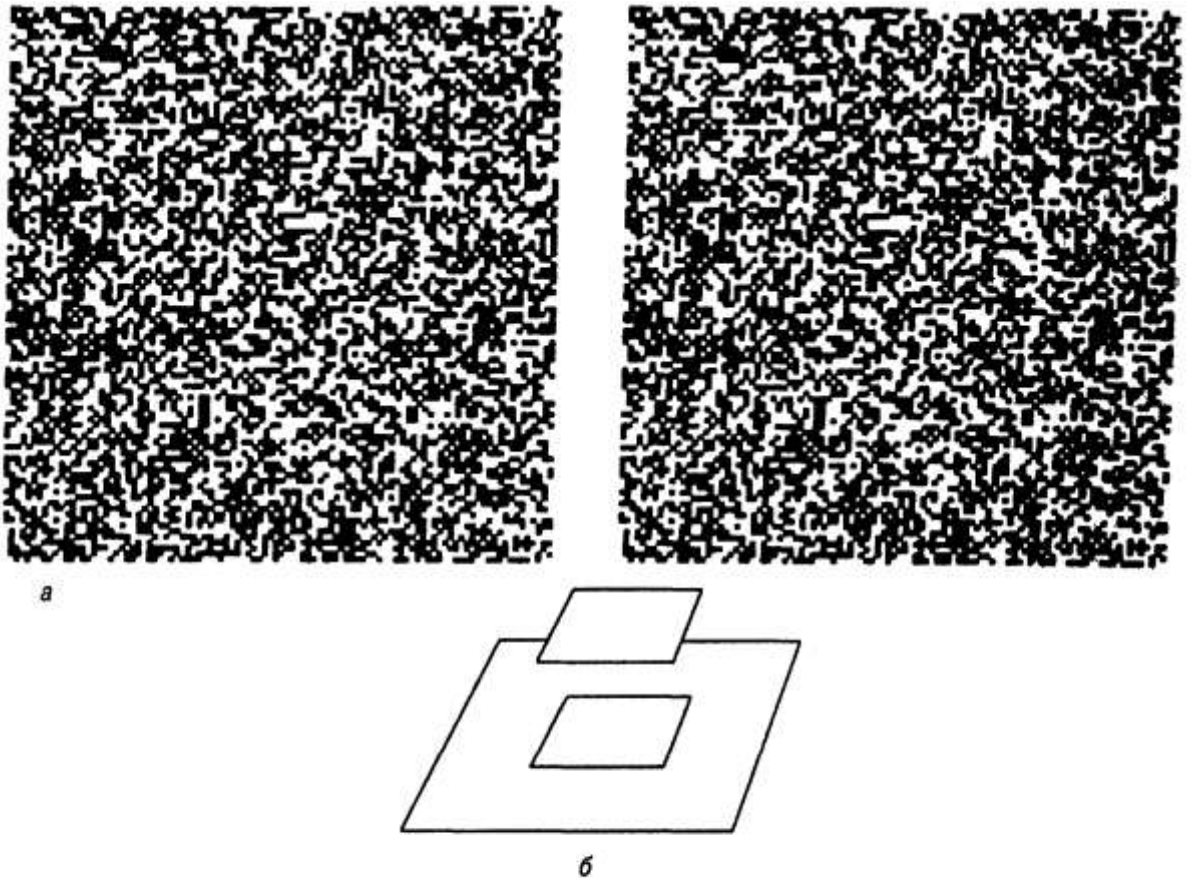
Перцептивные последствия бинокулярного соперничества, созданного определенными условиями видения, различны. Значительно отличающиеся друг от друга правое и левое ретинальные изображения могут либо слиться, образовав некий хрупкий и неустойчивый композитный образ, либо один образ может подавить другой, т.е. в какой-то момент может доминировать один из двух образов, а второй в это же самое время окажется подав-

ленным. Более того, доминирующий и подавленный образы могут спонтанно меняться местами, т.е. возможна флуктуация доминирования от одного глаза к другому. (Фундаментальный обзор литературы, посвященной бинокулярному соперничеству, представлен в O'Shea, 2000; анализ и оценка теорий бинокулярного соперничества — в Parathomas et al., 1999.)

Одним из дискуссионных вопросов бинокулярного соперничества является вопрос о том, какой отдел зрительной системы участвует в его возникновении и разрешении. Участвует ли в его возникновении периферия зрительной системы, т.е. является ли оно последствием подавления монокулярного образа на одной из сетчаток? Или кратковременное преобладание какого-либо одного восприятия является продуктом когнитивной обработки информации с участием центральных механизмов мозга, «пытающегося» разрешить проблему визуальной двойственности и создать осмысленное, единственное восприятие на основе конфликтующих монокулярных стимулов?

Не вдаваясь в детали нейронных процессов, лежащих в основе бинокулярного соперничества, скажем только, что есть доказательства изменений нейронной активности определенных участков коры головного мозга, которые точно соответствуют перцептивным изменениям, типичным для бинокулярного соперничества.

Составить представление о направлении современных исследований в этой области можно на основании двух репрезентативных публикаций. В первой из них (Lumer et al., 1998) изложены результаты изучения кортикальных процессов, лежащих в основе эффектов доминирования и подавления в бинокулярном соперничестве, с помощью ФМРТ. Авторы показали, что участки человеческого мозга, непосредственно участвующие в решении таких визуальных задач, которые требуют переключения внимания с одной точки пространства на другую и интерпретации стимула, а именно лобная и теменная доли, в ситуациях, связанных с бинокулярным соперничеством, одинаково важны. По данным второй работы (Tong et al, 1998), также полученным с помощью ФМРТ, нейронная активность определенных участков мозга непосредственно зависит от содержания стимулов, благодаря которым возникает бинокулярное соперничество. Авторы создавали условия для возникновения бинокулярного соперничества, одновременно предъявляя одному глазу испытуемого изображение лица, а второму — изображение дома таким образом, что каждый глаз попеременно видел то лицо, то дом, и промежуток времени между предъявлениями этих изображений не превышал нескольких секунд. Когда доминировало восприятие лица, исключительно активным был участок мозга, избирательно реагирующий именно на лица, а не на дома. Когда же доминировало восприятие дома, повышенную активность демонстрировал тот участок мозга, который избирательно реагирует на дома (но не на лица). Короче говоря, когда глазам предъявляются разные стимулы, об осознанном восприятии человеком одного из них свидетельствует повышенная активность тех участков мозга, которые связаны с обработкой информации от определенных видов конкурирующих стимулов. Следовательно, в каждой воспринятой наблюдателем смене доминанты, имеющей место в ходе бинокулярного соперничества, участвует специфический участок коры головного мозга. Эти данные свидетельствуют в пользу представлений о центральном происхождении механизма, лежащего в основе бинокулярного соперничества. Очевидно, что этот механизм более сложен, нежели простое подавление монокулярных образов (Lee & Blake, 1999).



**Рис. 9.25.** Стереогаммы, образованные случайными конфигурациями точек

*а* – при монокулярном просмотре эти изображения воспринимаются как лишенные глубины однородно скомпонованные случайные элементы. Но при стереоскопическом слиянии в центре виден квадрат, «парящий» над фоном, и создается вполне отчетливое впечатление глубины. *б* – аналогичная картина – «парящий» над фоном квадрат – наблюдается и при просмотре анаглифа этой стереогаммы в правильно подобранных по цвету очках. (Источник: В. Julesz. *Foundation of cyclopean perception*. Chicago: University of Chicago Press, 1971, p. 21)

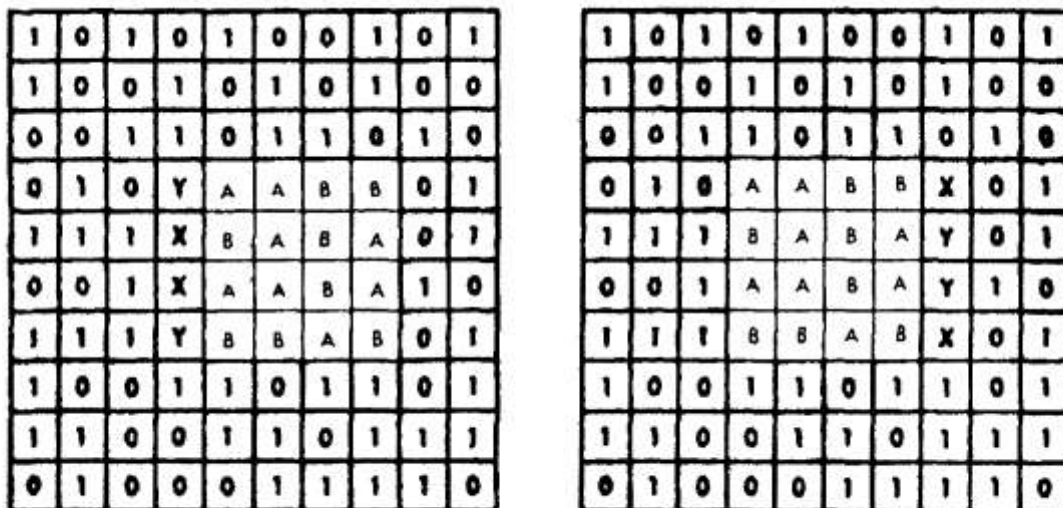
### *Циклопическое восприятие*

Термин циклопическое восприятие предложен Белой Юлешом для обозначения стереоэффекта, возникающего при просмотре созданных им стереогамм совершенно нового типа, образованных кажущимся случайным набором черных и белых элементов (рис. 9.25, а) Julesz, 1964,1965,1971,1978).

Происхождение названия «циклопическое восприятие» связано с тем, что стереоизображение определенного вида, проецируемое по отдельности на каждый глаз, само по себе кажется хаотичным набором различных элементов. Осмысленное восприятие глубины из этих стереогамм возможно только после того, как два изображения совмещаются в некой центральной зрительной зоне. Предоставим слово самому Джулезу: «Мифические циклопы воспринимали мир одним-единственным глазом, расположенным в центре лба. В известном смысле мы тоже воспринимаем мир единственным глазом, который находится в центре головы. Однако наш циклопический глаз «сидит» не во лбу, а на некотором расстоянии от него, в тех участках мозга, которые причастны к зрительному восприятию» (Julesz, 1971, p. xi).

Стереогаммы, с помощью которых Джулез в свое время демонстрировал циклопическое восприятие, действительно необычны (Кемп, 1998). Воспользовавшись компьютерной программой, он создал два практически одинаковых рисунка, представлявших собой случайные конфигурации точек (обычно такие стереогаммы называют случайно-

точечными стереограммами. Пара таких стереограмм представлена на рис. 9.25, а. Оба изображения имеют идентичную текстуру, образованную случайными конфигурациями точек, исключение составляют лишь небольшие центральные участки, которые тоже идентичны в обоих случаях, но смещены латерально в противоположных направлениях. При взгляде на любой из этих рисунков, образующих стереопару, невозможно увидеть каких-либо признаков глубины или формы, ибо в них нет никаких монокулярных признаков. Однако при стереоскопическом слиянии этих двух рисунков в центре отчетливо виден небольшой квадрат, соответствующий латерально смещенному участку и «парящий» над окружающей его текстурой (рис. 9.25, б).



**Рис. 9.26.** Схематическое изображение процесса создания случайно-точечных стереограмм, представленных на рис. 9.25

Левый и правый рисунки — практически идентичные текстуры, образованные случайными конфигурациями точек, исключение составляют лишь их центральные участки: они смещены относительно друг друга по горизонтали в разные стороны так, словно представляют собой целые поверхности. Смещенные участки (они образованы ячейками А и В) покрывают определенные участки фона, образованного ячейками 1 и 0. Благодаря сдвигу, свободные участки фона (ячейки Х и У) остаются непокрытыми и заполняются дополнительными случайными элементами. (Источник: В. Julesz. *Foundation of cyclopean perception*. Chicago: University of Chicago Press, 1971, p. 21)

Как схематически показано на рис. 9.26, смещенные участки правого и левого квадратов случайно-точечной стереопары отличаются друг от друга. Центральный участок левого квадрата смещен вправо, а правого — влево. Благодаря этому латеральному сдвигу центрального участка на правую и левую сетчатку проецировались разные изображения, как было бы, если бы маленький центральный квадрат действительно лежал отдельно, впереди текстуры, образованной случайной конфигурацией точек. В итоге для этого маленького центрального участка возникает бинокулярная диспаратность (т.е. левый и правый глаз видят его не совсем одинаково), и при стереоскопическом просмотре стереопары создается впечатление, что центральный участок лежит над фоном — текстурой, образованной случайной конфигурацией точек. Если центральный участок левого квадрата сместить влево» а правого — вправо (т.е. если создать обратную диспаратность между левым и правым квадратом), то при стереоскопическом просмотре этой стереопары будет казаться, что центральный квадрат лежит на поверхности позади текстуры, образованной случайной конфигурацией точек.

По мнению Джулеса (Julesz, 1964, 1971), из случайно-точечных стереограмм стереоскопический эффект извлекается зрительной системой автоматически благодаря определенному процессу, протекающему на нейронном уровне. Этот процесс, результатом ко-

торого является восприятие глубины, включает сопоставление тех участков рисунков, которые идентичны для обоих глаз, и оценку остающихся участков бинокулярных диспаратностей. Для возникновения эффекта глубины, или стереопсиса, достаточно одной бинокулярной диспаратности, поскольку, как уже отмечалось выше, в расположении элементов случайно-точечных стереограмм нет ничего — ни изобразительных признаков глубины, ни знакомых очертаний, — что могло бы навести на мысль о смещении одного участка относительно другого.

*Локальный стереопсис/глобальный стереопсис.*

Случайно-точечные стереограммы — уникальной пример двойственности восприятия глубины. При просмотре таких простых стереограмм, как те, что представлены на рис. 9.24, б и в, нет никакой неопределенности в том, какие именно линейные сегменты проекций на левой и правой сетчатках соответствуют друг другу. Проекция на левую и правую сетчатки каждым из полуполей подобных стереопар дают достаточное количество монокулярно распознаваемых стимулов, которые могут быть поэлементно сопоставлены зрительной системой друг с другом для создания стереоскопического эффекта. Подобная однозначная, не вызывающая сомнений локализация глубины называется локальным стереопсисом. В отличие от традиционных стереопар стереопары Юлеша не содержат никаких узнаваемых структур, и ничто в двух полуполях его стереопар «не сообщает» зрительной системе о возможности попарного сравнения каких-либо элементов изображений на правой и левой сетчатках для достижения стереопсиса. Следовательно, случайно-точечные стереограммы в том, что касается соответствия элементов правого и левого ретинальных изображений, — можно толковать двояко. Предполагается, что любой элемент, спроецированный на одну сетчатку, может быть сопоставлен с любым другим соседним элементом образа на другой сетчатке, но зрительная система сравнивает паттерны диспаратности двух сетчаток, а не «занимается» поэлементным сопоставлением двух ретинальных изображений. В данном случае необходим глобальный процесс поиска многих диспаратностей, без которых невозможно восприятие трехмерной поверхности. Поскольку требуется полное, или глобальное, сравнение диспаратных элементов, общих для обеих половин стереопар Джулеза, а не их локальное, «поточечное» сравнение, предполагаемый процесс стереоскопического восприятия стереограмм, образованных случайными конфигурациями точек, называется глобальным стереопсисом.