ГЛАВА 9

Восприятие пространства монокулярное и бинокулярное зрение

Эта и последующая главы посвящены исключительно важной функции зрения — восприятию пространства. В результате эволюции зрительная система приобрела способность пользоваться преимуществами бинокулярного зрения — воспринимать и локализовать в пространстве объекты и поверхности. Чтобы убедиться в справедливости этих слов и в том, насколько важна такая возможность, достаточно оглянуться вокруг. Как правило, мы видим, что окружающие нас предметы имеют определенную форму и размер, что они определенным образом ориентированы в трехмерном пространстве по отношению друг к другу и к наблюдателю.

То, что визуальный мир обычно воспринимается нами как определенным образом организованный и стабилизированный в трехмерном пространстве, — результат эволюционного развития зрительной системы. Однако понимание того, как именно происходит восприятие трехмерного пространства, представляет серьезную проблему. Как вообще можно почувствовать трехмерность пространства, если и сама сетчатка, и спроецированные на нее изображения — преимущественно двухмерные поверхности? Как зрительная система «достраивает», или выявляет, третье измерение? Частично ответ на этот вопрос дает сам характер стимуляции сетчатки. Например, мы видим, что одни поверхности более яркие, чем другие; проекции разных объектов занимают разные по величине участки наших сетчаток и видны по-разному — некоторые объекты видны полностью, а некоторые — лишь частично, потому что заслонены другими объектами. Ретинальное изображение несет в себе информацию, или признаки, позволяющую нам воспринимать трехмерное пространство. Некоторые из этих признаков воспринимаются одним глазом, а для восприятия других требуется совместная работа обоих глаз.

В этой главе мы расскажем именно о таких пространственных признаках, а также о тех процессах и механизмах зрительной системы, которые позволяют нам воспринимать окружающий мир — взаимное расположение в поле нашего зрения различных поверхностей и объектов определенной формы, которые покоятся на этих поверхностях и находятся на разном удалении от нас и на разной глубине. Кроме того, поскольку восприятие размера объекта непосредственно связано с восприятием глубины и удаленности, мы также обсудим некоторые факторы, влияющие на кажущийся размер.

Монокулярные пространственные признаки

Пространственные признаки, которые могут восприниматься не только двумя, но и одним глазом, называются монокулярными признаками. Большинство монокулярных пространственных признаков *статичны* (т. е. это те признаки пространства, которые воспринимаются при условии, что и наблюдатель, и находящиеся в поле его зрения объекты неподвижны), но есть и такие признаки, которые проявляются только тогда, когда либо есть движение (наблюдателя, окружающих предметов или того и другого), либо тогда, когда изменяется характер движения глазных, или окуломоторных, мышц. Восприятие неподвижных сцен, фотографий и иллюстраций, так же как и восприятие произведений живописи и графики, основано на статичных монокулярных признаках, которые называются пикторальными, или картинными, признаками и передают глубину и расстояние изобразительными средствами, т. е. создают иллюзию объема на такой двухмерной поверхности, какой является, например, фотография.

Интерпозиция (частичное загораживание)

Интерпозицией, или частичным загораживанием, называется неполная маскировка, или перекрывание, одного объекта другим. Если один объект частично закрыт другим, наблюдателю кажется, что тот объект, который виден целиком, находится на более близком расстоянии. Примеры загораживания представлены на рис. 9.1. Интерпозиция дает больше информации об относительной удаленности, когда речь идет о знакомых объектах. В качестве статического пикториалного признака она очень эффективна, но с ее помощью можно составить представление только об относительной *глубине.* Интерпозиция свидетельствует не об абсолютной глубине или удаленности объектов, а лишь об их относительной удаленности от наблюдателя.

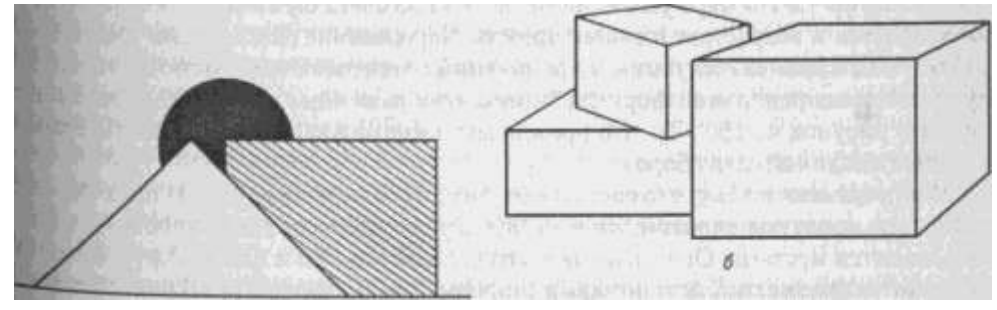


Рис. 9.1. а - круг лежит за прямоугольником, который, в свою очередь, частично закрыт треугольником. б - восприятие взаимного расположения линий, образующих геометрические поверхности трехмерных форм, основано на интерпозиции

Воздушная перспектива

Как правило, рассматривая какой-либо пейзаж, мы менее четко видим те предметы, которые удалены от нас, чем те, которые находятся поблизости. Этот монокулярный источник информации, называемый **воздушной перспективой,** является следствием влияния на свет мельчайших частиц, содержащихся в атмосфере. Свет проходя через атмосферу, содержащую взвешенные твердые частицы, пары воды и прочие примеси, рассеивается, что приводит к уменьшению четкости деталей и светимости ретинальных изображений объектов. Поскольку свет, который отражается от более удаленных предметов, проходит более длинный путь в атмосфере, нежели свет, который отражается от предметов, расположенных ближе к наблюдателю, более удаленные предметы воспринимаются менее четко, и чем дальше от наблюдателя они находятся, тем сильнее проявляется этот эффект

«дымки». Воздушная перспектива может служить признаком удаленности или глубины, и преж- де всего в тех случаях, когда речь идет об очень удаленных предметах (фотография, на которой кажущаяся удаленность передана с помощью воздушной перспективы, представлена на рис. 9.13).

Благодаря воздушной перспективе удаленные предметы меньше контрастируют с фоном, чем предметы, расположенные поблизости. В (O'Shea et al., 1994; O'Shea & Govan, 1977) представлены экспериментальные данные, из которых следует, что стимулы, резко не контрастирующие с фоном, как правило, кажутся рас-положенными дальше, чем стимулы, контраст которых с фоном выражен более четко. Следовательно, кажущийся контраст является источником пространствен- ной информации. А это значит, что поддающаяся оценке информация о кажущей-ся глубине и удаленности, которую можно получить с помощью воздушной перспективы, определяется уменьшением контрастности в результате увеличения расстояния, с которого ведется наблюдение. Теперь понятно, почему в ясную погоду такие крупномасштабные объекты, как здания или горы, кажутся менее уда- ленными, чем в пасмурный день.

Затененность и светимость

Как правило, наибольшей светимостью обладает та поверхность, которая ближе **к** источнику света. По мере удаления от источника света светимость поверхностей уменьшается и возрастает их затененность. Чередование света и тени также способствует восприятию глубины отграниченных поверхностей. Посмотрите на выпуклости и неправильной формы впадины, изображенные на рис. 9.2, а затем поверните рисунок на 180°. То, что прежде воспринималось как выпуклость, станет казаться впадиной, и наоборот.

Мы привыкли к тому, что свет падает сверху (солнце, люстры). И продолжаем так думать, даже повернув рисунок на 180°, в результате чего выпуклости и впадины меняются местами. Освещенные и затененные участки плоской картины являются потенциальными источниками информации о глубине (Berbaum, Bever & Chung, 1983, 1984; Berbaum, Tharp & Mroczek, 1983).

К трем годам дети уже привыкают к тому, что свет падает сверху, и на основании освещенности умеют отличать выпуклости от вогнутостей (т. е. возвышения от углублений) (Benson & Yonas, 1973; Yonas et al., 1979). Более того, цыплята,

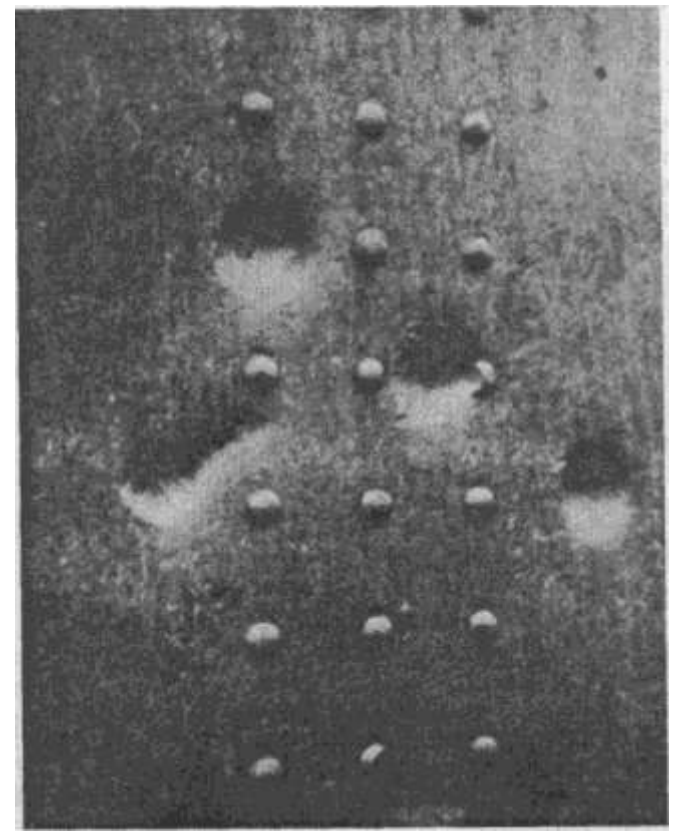


Рис. 9.2. Свет и тень в качестве признаков глубины

Если рисунок повернуть на 180°, выпуклости и углубления поменяются местами (то, что прежде было выпуклостью, станет впадиной, и наоборот)

подобно людям, реагируют на раздражители так, как будто они освещены светом, падающим сверху, и эта реакция позволяет предположить, что если их способность интерпретировать затененность и светимость как пространственный признак не является врожденной, то уж во всяком случае развивается на очень ранних стадиях филогенеза (Hershberger, 1970).

Успешное использование светотени в живописи для создания эффекта глубины иллюстрируется репродукцией одной из работ Вермеера (цветная вклейка 15). Искусство Вермеера — пример мастерского использования светотени для созда-ния эффекта глубины на плоской поверхности.

Затененность и форма. Правильная интерпретация наблюдаемой затененности и светимости поверхности может также явиться источником информации о *форме* объектов (Berbaum et al., 1984; Kleffner & Ramachandran, 1992). Как правило, если трехмерный объект освещен светом от единственного источника, взаимное расположение затененных и освещенных участков подчиняется определенным

Рис. 9.3. Затененность и форма

Верхний ряд - фотография нескольких знакомых и незнакомых (трехмерных) объектов, затененность которых способствует распознаванию их формы. Нижний ряд - три рисунка, показывающих, что изменение взаимного расположения освещенных и затененных участков оказывает заметное влияние на восприятие формы объекта. На всех трех рисунках изображен один и тот же предмет. Тень на центральном рисунке подчеркивает выпуклость, однако, как следует из правого рисунка, тот же самый контур, но с другим расположением светотени, воспринимается как впадина, или кратер. (Верхний рисунок предоставлен Харви Шиффманом, нижний взят из работы Wyburn, Pickford & Hirst, 1964)

общим закономерностям. Поскольку те поверхности, которые расположены ближе к источнику света, оказываются наиболее освещенными, форма объекта влияет на чередование освещенных и затененных участков. В результате этого поверхности, обращенные к источнику света, кажутся светлее, а противоположные им — темнее (рис. 9.3).

Кроме того, характер распределения света и тени на объекте способствует восприятию свойств его поверхности. Так, постепенный переход от света к тени может быть признаком ее искривления, а внезапный, резкий переход от света к тени — свидетельством таких изменений, как острый край или угол. Затененность является основным источником пространственной информации. Возможно, следует согласиться с Клеффнером и Рамачандраном, которые полагают, что есть специальные нейроны, «вычленяющие» из затененности информацию о форме (Kleffner & Ramachandran, 1992).

Элевация

Как правило, линия горизонта располагается в поле зрения выше (по вертикали), чем передний план. Соответственно если в поле зрения наблюдателя на разной высоте находятся два объекта и ему кажется, что они оба лежат *ниже* линии гори-

зонта, то более удаленным ему будет казаться тот объект, который располагается выше. Элевация (иногда также называемая *высотой расположения в поле зрения)* может играть определенную роль в восприятии как относительной, так и абсолютной удаленности (Wallach, O'Leary & McMahon, 1982). Она также выступает и в качестве пространственного признака, когда речь идет о восприятии плоскостных изображений, создатели которых стремились передать эффект глубины (Berbaum, Tharp & Mroczek, 1983).

Линейная перспектива

Восприятие глубины на основании плоскостного изображения в значительной мере облегчается за счет использования линейной перспективы (нередко называемой просто *перспективой).* Линейная перспектива предполагает планомерное уменьшение величины удаленных предметов и расстояний между ними. Изображение объемной сцены претерпевает такое же превращение, как и при проецировании на сетчатку (рис. 9.4).

Типичный пример линейной перспективы — железнодорожные рельсы — представлен на рис. 9.5.

Хотя рельсы параллельны, кажется, что вдали они сходятся в некой точке, которая называется *точкой схода.* Другой пример сходящихся в перспективе параллельных линий представлен на рис. 9.6.

Обратите внимание на то, что более удаленные концы досок кажутся уже. Художественное впечатление от линейной перспективы, использованной необычным образом, иллюстрируется рис. 9.7.

История линейной перспективы как приема, используемого в изобразительном искусстве, противоречива. В настоящее время общепризнано, что создателем теории линейной перспективы был живший в XV в. итальянский скульптор и архитектор Брунеллески (Janson, 1962; Lynes, 1980), а его последователь Альберти придал ей формальную завершенность (Fineman, 1981; Kubovy, 1986).

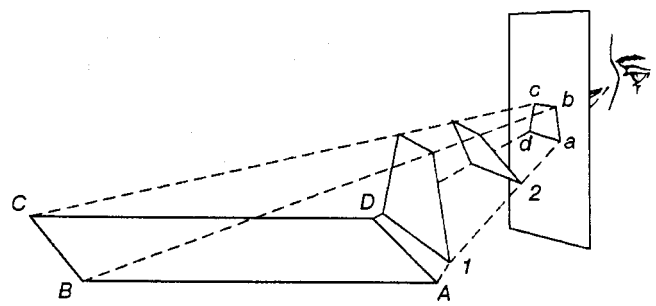
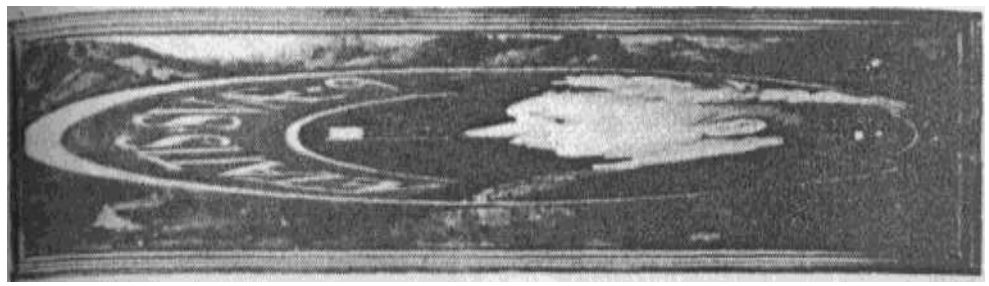
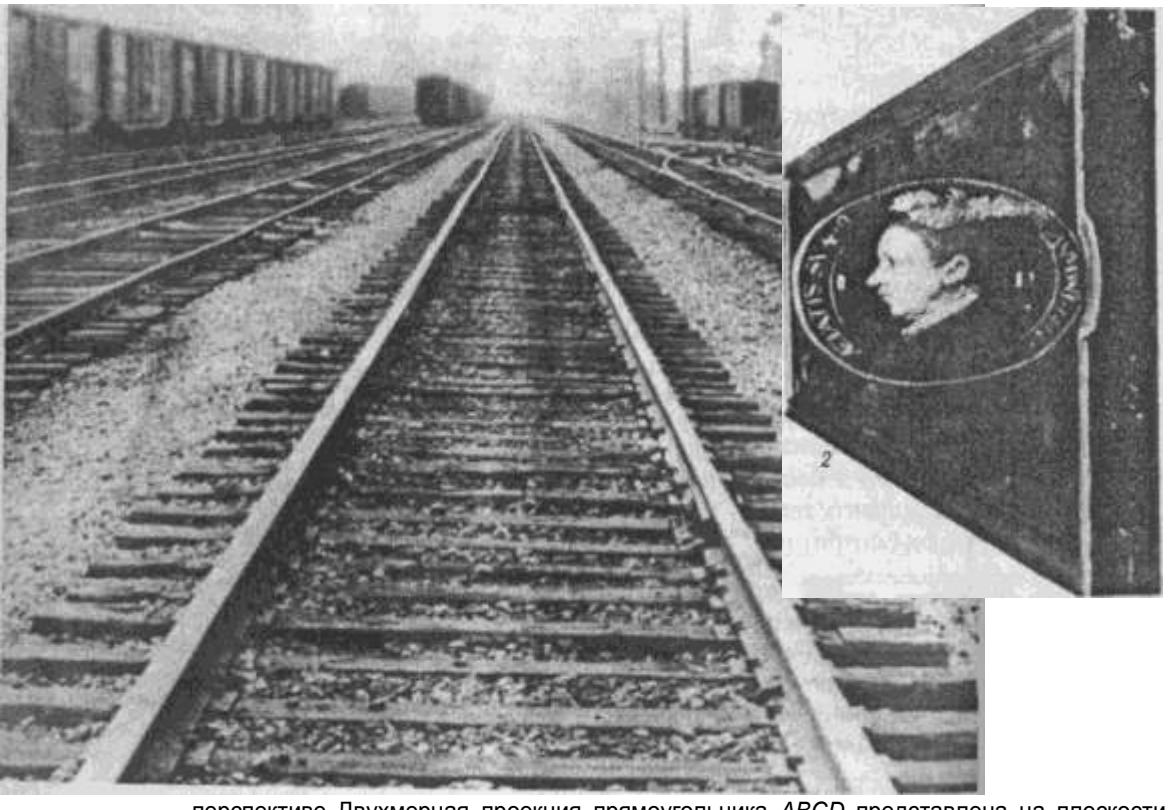


Рис. 9.4. Изображение прямоугольника представлено на плоскости картины в





перспективе Двухмерная проекция прямоугольника *ABCD* представлена на плоскости картины в виде трапеции *abcd.* Расстояния, отделяющие наиболее удаленные друг от друга элементы прямоугольника (сегмент ВС), при проецировании на плоскость уменьшаются *(bc).* Обратите внимание на то, что поскольку глаз воспринимает стимул как двухмерный (что и показано на плоскости картины), ретинальные изображения неограниченного числа трехмерных форм (формы 1, 2 и т. д.) будут одинаковыми. {*Источник:* **Hochberg,** 1964)

Рис. 9.5. Быть может, самая известная и поразительная особенность линейной перспективы - кажущееся схождение параллельных железнодорожных рельсов. Расстояние между рельсами одинаково на всем их протяжении, но соответствующие сетчаточные изображения, а следовательно и кажущиеся расстояния между уходящими вдаль рельсами, уменьшаются

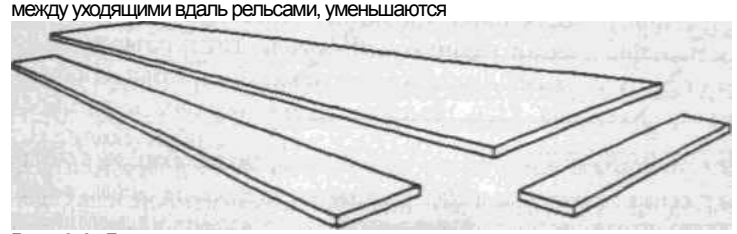


Рис. 9.6. Доски, нарисованные в перспективе.

Более удаленные от наблюдателя концы досок кажутся уже, хотя доски имеют прямоугольную форму, и их ширина одинакова по всей длине

1

Рис. 9.7. Необычное использование перспективы художником

1. Портрет Эдуарда VI исполнен в XVI в. Уильямом Скротсом с нарушением закона перспективы. Если смотреть на него сбоку, через выемку в раме, искажение устраняется (2). Вы сами сможете добиться аналогичного эффекта, если приподнимите край страницы и посмотрите на портрет сбоку

Градиент текстуры

Многим естественным (покрытым травой или деревьями) и искусственным (дорогам, полам, тканям) поверхностям свойственна определенной формы микроструктура, обычно воспринимаемая как зернистость, или текстура. Согласно представлениям Гибсона (Gibson, 1950), плотность подобных текстур изменяется непрерывно, т. е. поверхностям присущ определенный *градиент* текстуры, который в зависимости от физического взаиморасположения этих объектов и поверхностей, определяет структуру отражаемого ими оптического потока. Иначе говоря, когда мы смотрим на какую-либо текстурированную поверхность, по мере ее удаления от нас ее текстура начинает казаться более тонкой, а образующие ее элементы — относительно мелкими и теснее примыкающими друг к другу, или *более уплотненными.* Точно так же, как и в случае с линейной перспективой, кажущаяся величина элементов и промежутков между ними с увеличением расстояния уменьшается. В соответствии с этим восприятие такой текстурированной поверхности, как природный ландшафт, дает возможность достаточно надежно оценить удаленность (Sinai etfl., 1998).

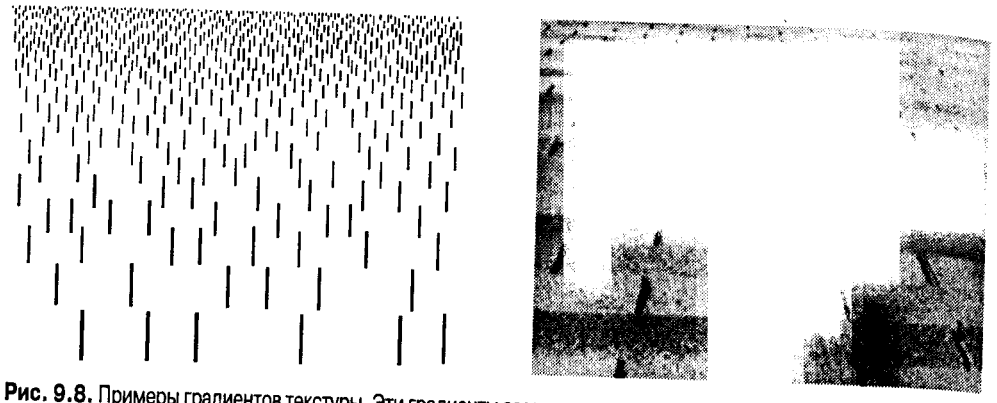


Рис. 9.8. Примеры градиентов текстуры. Эти градиенты создают впечатление глубины или удаленности на плоской поверхности

На основании информации о текстуре таких плоских поверхностей, как на фотографиях, можно также судить о глубине и удаленности (Gibson & Bridgeman, 1987; Todd & Akerstrom, 1987). Сказанное иллюстрирует рис. 9.8, на котором представлены два примера изменений текстуры, называемых **градиентом текстуры.** Градиент, или постепенное изменение величины, формы или пространственного расположения элементов, образующих паттерн текстуры, дает нам информацию об удаленности.

На рис. 9.9, *а* показано изменение текстуры *xy* — проекции на сетчатке лонгитюдной поверхности *XY:* вблизи *x* располагаются более крупные, четко выраженные элементы, а вблизи *y* — более тонкие, плотнее примыкающие друг к другу элементы. Благодаря градиенту текстуры, отраженному в образе на сетчатке, наблюдателю кажется, что он смотрит на удаляющуюся поверхность.

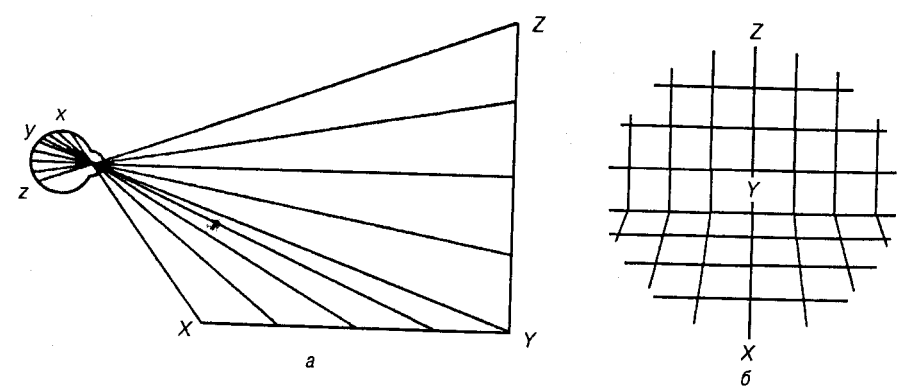


Рис. 9.9. Два вида оптических проекций лонгитюдной и фронтальной поверхностей а - текстура ретинальной проекции *xy, лонгитюдной поверхности XY* имеет определенный градиент, и образующие ее элементы изменяются от более крупных и грубых до более мелких и тонких. Рети-нальное изображение *yz* фронтальной поверхности *YZ,* находящейся прямо перед наблюдателем, *изоморфно, б-* второй вид оптических проекций поверхностей *XY и YZ.* Проекция текстуры поверхности *XY,* имеющей определенный градиент, воспринимается как «пол»; проекция изоморфной текстуры поверхности YZ воспринимается как «стена». *(Источник:* Gibson, 1950)

Глаз воспринимает изменение текстуры поверхности *XY* как происходящее с постоянной скоростью. Ретинальное изображение фронтальной поверхности *YZ* перпендикулярной направлению взгляда, отличается от проекции поверхности *XY:* она не имеет градиента текстуры, т. е. изоморфна, поскольку все элементы находятся на равном удалении от глаза. Следовательно, паттерн *YZ,* которому соответствует изображение на сетчатке *yz* (рис. 9.9, *а),* воспринимается как «стена», перпендикулярная паттерну ХУ— «полу» (рис. 9.9, *б).*

Как следует из рис. 9.10, роль изменения текстуры в качестве источника зрительной информации настолько велика, что даже простые двухмерные рисунки создают иллюзию пространства.

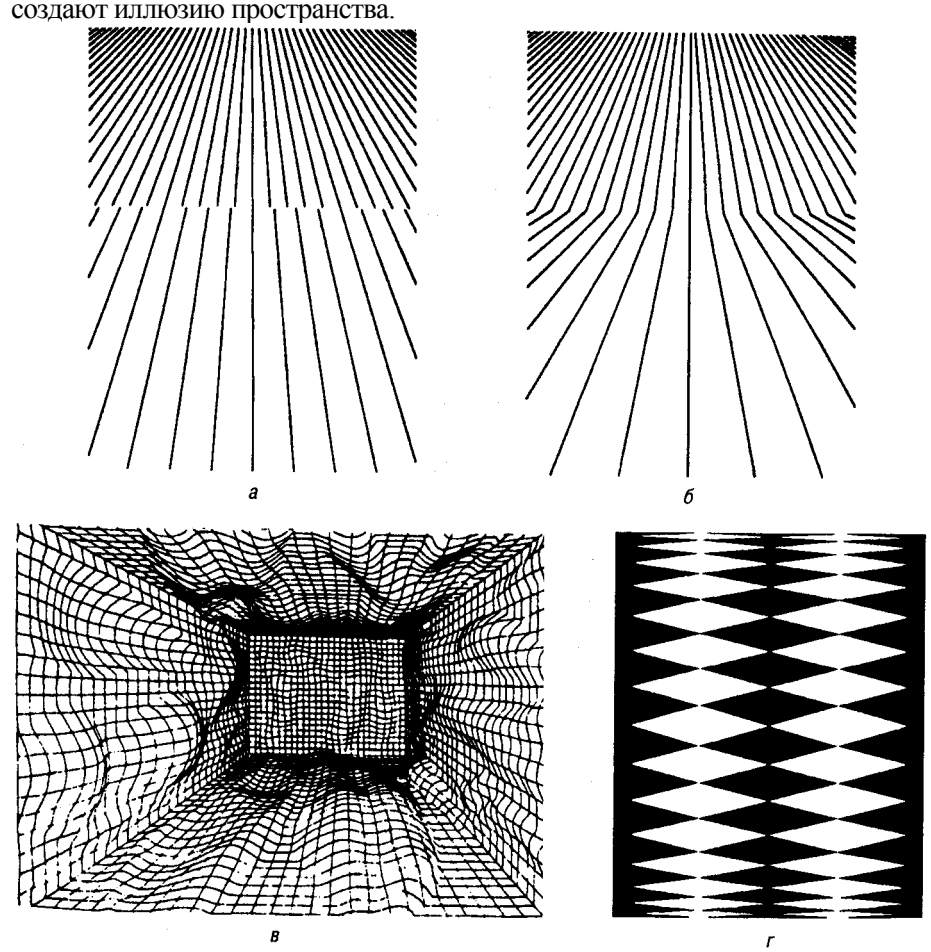


Рис. 9.10. Примеры кажущейся глубины, создаваемой постоянным и переменным градиентами текстуры
Изменение градиентов текстуры обозначает зрительно воспринимаемый обрыв а и угол *б.* Изменение градиентаа текстуры усиливает впечатление кажущейся глубины «сетчатой» или «проволочной» комнаты *в.* Незначительные изменения текстуры помогают идентифицировать эту форму как закругленную боковую поверхность барабана г

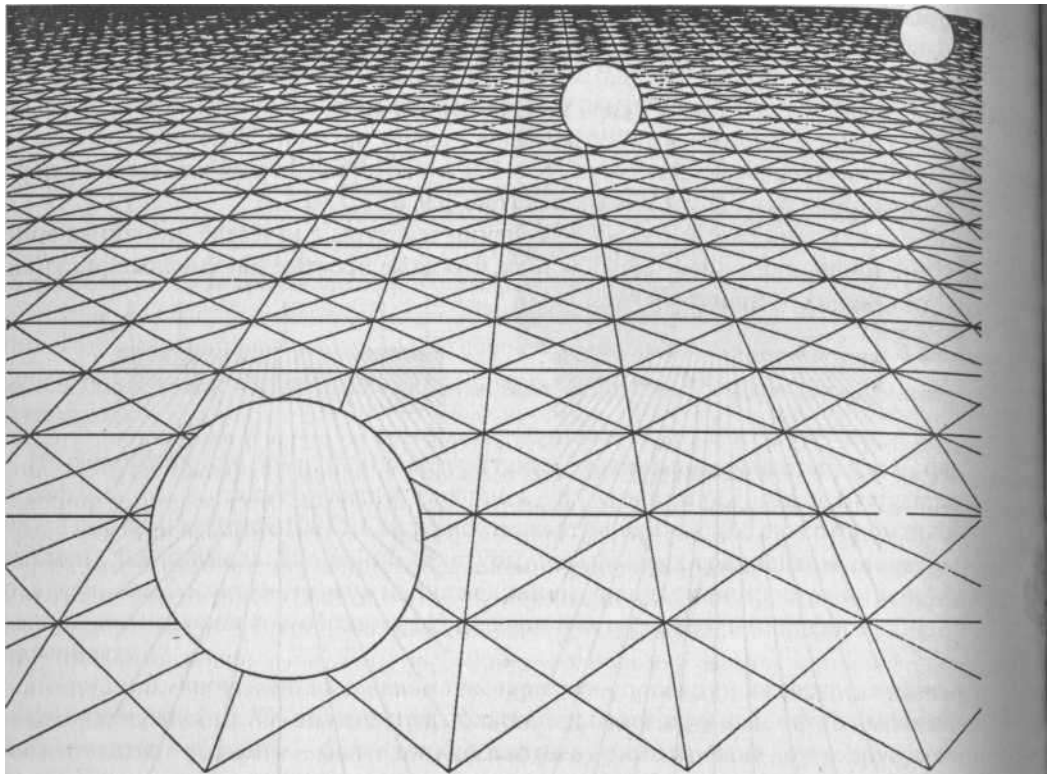


Рис. **9.1**1. Кажется, что диски расположены на разных фронтальных плоскостях Поскольку они загораживают равное число текстурных единиц, кажется, что они равны по величине, но по-разному удалены от наблюдателя. Согласно представлениям Гибсона, это является следствием «правила равного числа элементов текстуры для равных участков поверхности» (Gibson, 1979). *(Источник:* U. Neisser. Processes of vision. *Scientific American, 219,*1968, p. 204-205)

Примеры, представленные на рис. 9.10, свидетельствуют о том, что и прерывистость текстуры, и ее неравномерные изменения передают такие особенности поверхности, как искривленность, создают впечатление зрительного обрыва, а также являются источником информации о геометрии реальной поверхности объекта и ее наклоне относительно фронтальной линии наблюдателя.

Градиент текстуры наряду с интерпозицией и линейной перспективой может быть полезен при оценке кажущихся размеров объектов. Найссер отмечает, что увеличение плотности текстуры ретинального изображения, соответствующее увеличению расстояния от наблюдателя до объектов, дает «шкалу» для оценки величины последних (Neisser, 1968). В идеальном случае, когда все элементы текстуры идентичны, физически одинаковые объекты, загораживающие или покрывающие одинаковое число текстурных единиц (рис. 9.11), воспринимаются как равновеликие, хотя их ретинальные изображения отличаются по величине вследствие *разной* удаленности от наблюдателя.

Относительный размер

Признак удаленности/называемый **относительным размером,** применим в тех случаях, когда две похожие или идентичные формы разной величины рассматриваются одновременно или непосредственно одна за другой. В таких ситуациях больший по величине объект кажется расположенным ближе к наблюдателю (Hochberg, 1964). То, что относительный размер действительно является признаком удаленности, показано на рис. 9.12. Чтобы правильно интерпретировать этот признак удаленности, не требуется ни специального научения, ни опыта общения с объектами. Скорее, можно сказать, что в некоторых ситу ациях изображения объектов одинаковой формы, но разного размера, — вполне достаточные стимулы для того, чтобы возникло ощущение глубины.

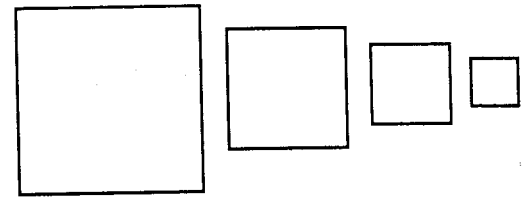


Рис. 9.12. Относительный размер Изображения одинаковых по форме, но разных по величине объектов могут создать иллюзию глубины. Наблюдателю кажется, что бблыщие по величине квадраты расположены ближе к нему, чем квадраты меньшего размера

Пикторальное (картинное) восприятие

Линейная перспектива, градиент текстуры и относительная величина — все это частные случаи проявления общего принципа геометрической оптики применительно к связи между изображением на сетчатке и расстоянием от наблюдателя до объекта: величина ретинального изображения пропорциональна расстоянию от наблюдателя до объекта. Непосредственным следствием совместного действия этих статических монокулярных признаков является то, что при увеличении расстояния от объекта до наблюдателя изображение объекта на сетчатке уменьшается. Будучи учтенным при создании плоских, двухмерных композиций, этот принцип легко позволяет создать впечатление глубины и удаленности. Использование в фотографии или в живописи статичных монокулярных признаков, описанных выше, — интерпозиции, затененности и линейной перспективы — делает возможным **пикторальное (или картинное) восприятие** — восприятие глубины на основе плоскостного изображения (рис. 9.13).

Репродукция картины, представленная на рис. 9.14, тоже иллюстрирует восприятие глубины, но в ней представлена причудливая смесь пространственных признаков. Хотя некоторые из них использованы вполне корректно, другие, противоречащие друг другу признаки намеренно создают такие пространственные связи, которые в действительности невозможны.

Вторым фактором, способным влиять на восприятие глубины, является количество *деталей,* изображенных на картине. В реальной жизни чем дальше от нас находятся объекты, тем меньше деталей мы видим. Следовательно, и восприятие глубины на основании двухмерного изображения может быть усилено деталями Предметов, которые кажутся лежащими на плоскости. Леонардо да Винчи называл градиент деталей картины «перспективой исчезновения» и считал, что «более удаленные от зрителя детали картины должны быть менее завершенными» (Bloomer, 1976, p. 83). Следовательно, коль скоро большая деталировка является признаком

Рис. 9.13. Восприятие глубины

Для восприятия этой фотографии, сделанной с высоты птичьего полета, важны различные статичные монокулярные признаки. Благодаря прежде всего воздушной перспективе элементы городского пейзажа, расположенные на переднем плане, кажутся более резко очерченными и воспринимаются более отчетливо, чем элементы на заднем плане

меньшего расстояния, художник может влиять на восприятие кажущейся удаленности, изменяя степень деталировки. Обратите внимание на то, что в картине Вер-меера, репродукция которой представлена на цветной вклейке 15, эффект глубины усилен именно таким образом.

Прием, успешно используемый для создания эффекта глубины на фотографиях и в компьютерной графике, называется *размывкой.* Разная степень размытости различных участков изображения является эффективным средством влияния на восприятие глубины (Mather, 1996, 1997). Так, если один фрагмент композиции резко сфокусирован, а примыкающий к нему — размыт, зрителю будет казаться, что

Рис. 9.14. Гравюра Уильяма Хогарта «Искаженная перспектива» (1754)-пример сознательно

неправильного использования художником некоторых статичных признаков глубины Гравюра предназначалась в качестве иллюстрации для фронтисписа книги, и сопровождавшее ее описание роли перспективы достойно того, чтобы его привести: «Всякий, кто занимается гравюрой, не зная законов перспективы, рискует создать нелепицу, подобную той, что представлена на фронтисписе этой книги». Ясно, что в гравюре Хогарта помимо перспективы неверно использованы и другие признаки, в частности интерпозиция и относительный размер. *{Источник:.* Corbis Images)

они лежат на разной глубине. Более конкретно эта мысль может быть выражена следующим образом: если между двумя участками проходит резкая граница, тот Участок, который виден более отчетливо, кажется наблюдателю расположенным ближе к нему, а при размытой границе более близким будет казаться менее сфокусированный участок.

Восприятие глубины может быть усилено за счет подавления *плоскостных признаков,* т. е. за счет уменьшения объема информации о том, что зритель видит именно двухмерное изображение. Например, если смотреть на плоскую картину через свернутый в трубку лист бумаги, не только исключается влияние рамы картины,

но и менее заметными становятся признаки того, что картина — плоская поверхность. При этом значительно усиливается впечатление объемности, глубины того что изображено на полотне (Schlosberg, 1941). Так, эффект глубины, создаваемый «Портретом молодого человека» Рембрандта, еще более усиливается, если смотреть на него через бумажную трубу (см. цветную вклейку 16). Как правило, *все,* что уменьшает впечатление от картины как от плоскостного, двухмерного изображения, усиливает восприятие заложенной в ней информации о глубине.

Описанные в этом подразделе пикториальные признаки — статические и монокулярные признаки, создающие эффект глубины на двухмерной, плоской поверхности. Восприятию глубины также способствуют и некоторые важные монокулярные источники информации о движении. Однако в отличие от статических признаков эти монокулярные признаки не могут быть представлены в двумерных изображениях. К ним относятся *монокулярный параллакс движения, естественная перспектива* и *аккомодация.*

Монокулярный параллакс движения

Монокулярный параллакс движения (от греческого слова *paralaxis* — перемена, изменение) — это монокулярный источник информации о глубине и взаимном расположении объектов в поле зрения, возникающий в результате перемещения наблюдателя или объектов. Более точное определение монокулярного параллакса движения таково: параллакс движения — это изменения во взаимном расположении ретинальных изображений объектов, лежащих на разном удалении от наблюдателя, вызванные поворотом его головы. Когда наблюдатель фиксирует свой взгляд на какой-нибудь точке, находящейся в поле зрения, а его голова совершает движение (пусть даже незначительное), ему начинает казаться, что объекты, лежащие ближе точки фиксации, перемещаются быстрее, чем более удаленные объекты. Короче говоря, ему кажется, что более близко расположенные предметы перемещаются быстрее, нежели более удаленные.

Кроме того, кажущееся направление движения близко расположенных объектов отличается от кажущегося направления движения удаленных объектов. Наблюдателю кажется, что объекты, расположенные ближе точки фиксации взгляда, перемещаются в направлении, противоположном направлению движения его головы, а направление движения объектов, лежащих за точкой фиксации, совпадает с направлением движения его головы. Следовательно, и относительная скорость, и направление воспринимаемого движения зависят от местоположения точки фиксации взгляда наблюдателя. Вместе эти параметры являются постоянно действующим источником информации о взаимном расположении объектов в поле зрения. На рис. 9.15 схематически представлено изменение относительной скорости перемещения на сетчатке изображений близко расположенного (квадрат) и удаленного (круг) объектов при движении глаз справа (позиция 1) налево (позиция 2). Когда глаза находятся в позиции 1, взгляд зафиксирован на точке *X.* Квадрат лежит перед точкой фиксации *X,* а круг — позади нее. Однако когда глаза слегка поворачиваются влево, с позиции 1 в позицию 2 (направление движения указано стрелкой), изображения близко расположенного квадрата и удаленного круга перемещаются по сетчатке на разные расстояния, а именно: если взгляд зафиксирован

на *X,* при движении глаз влево, на позицию 2, образ более близко расположенного квадрата проделает несколько больший путь по поверхности сетчатки, чем образ более удаленного круга. Как показано на рис. 9.15 (позиция 2), расстояние на сетчатке между образами точки фиксации *X* и квадрата больше, чем расстояние между образами *X* и круга. Следовательно, даже при незначительном изменении положения глаз изображение более близко расположенного объекта смещается по сетчатке на большее расстояние, в результате чего и перемещается в пределах поля зрения наблюдателя быстрее, чем удаленный объект. К тому же благодаря движению глаз образы близко расположенного и удаленного объектов перемещаются в разных направлениях (относительно точки фиксации взгляда *X).* Наблюдателю, зрение которого благодаря оптическим свойствам хрусталика приспособлено к «перевернутым» сетчаточным изображениям, кажется, что более близко расположенные предметы перемещаются в направлении, противоположном направлению движения глаз, а более удаленные — в том же направлении.

Хотя параллакс движения и кажется сложным признаком, на самом деле он — тривиальный источник информации о взаимном расположении объектов в пространстве, когда перемещаются наблюдатель или/и объекты. Он проявляется также и в ситуациях, когда голова наблюдателя относительно неподвижна, а окружа-

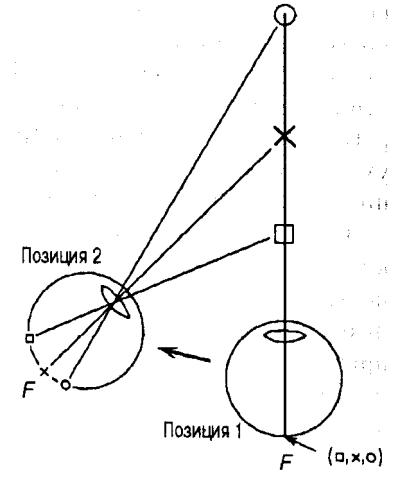


Рис. 9.15. Схема параллакса движения, описание см. в тексте

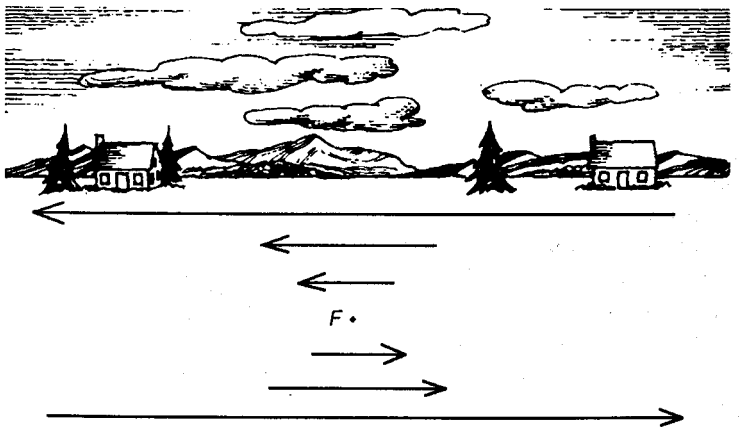


Рис. 9.16. Схема параллакса движения

Если при движении влево наблюдатель фиксирует взгляд на точке *F,* ему кажется, что более близко Расположенные объекты перемещаются вправо, а более удаленные - влево. Длина стрелок отражает тот факт, что увеличение кажущейся скорости перемещения объектов в поле зрения прямо пропорционально их расстоянию от точки фиксации взгляда. *(Источник:* Gibson, 1950)

ющие объекты словно проносятся мимо, например при езде в автомобиле. Парад лаке движения в подобных условиях схематически представлен на рис. 9.16.

На рисунке изображено кажущееся перемещение окружающих объектов, когда наблюдатель смотрит на них из окна движущегося автомобиля. Если автомобиль едет влево, то наблюдателю, фиксирующему свой взгляд на точке *F,* кажется, что более близко расположенные объекты перемещаются вправо, в направлении, *противоположном* его движению, а объекты, расположенные позади точки фиксации взгляда, перемещаются влево, т. е. в *том же* направлении, что и он сам. Кроме того объекты, расположенные на разных расстояниях от точки фиксации взгляда, перемещаются с разными скоростями. Воспринимаемая скорость движения объектов тем меньше, чем ближе к точке фиксации взгляда .F лежит объект (на рисунке это отражено длиной стрелок).

Экспериментальное подтверждение

Параллакс движения

Существование параллакса движения легко доказать следующим образом. Закройте один глаз и расположите на линии взгляда один за другим два предмета, например два пальца, так, чтобы один был ближе к вам примерно на 10 дюймов (около 25 см), чем другой. Если, зафиксировав взгляд на более удаленном пальце, вы повернете голову, вам покажется, что палец, который ближе, перемещается в направлении, противоположном направлению движения головы. Если же вы зафиксируете взгляд на том пальце, который ближе, вам покажется, что более удаленный палец перемещается в том же направлении, что и ваша голова.

Параллакс движения — относительное кажущееся движение объектов в поле зрения — является важным источником информации о глубине и удаленности и особенно эффективен в тех случаях, когда речь идет о таких ситуациях, как восприятие объектов, выступающих на фоне объектов, находящихся на заднем плане. Как станет ясно из материала следующего раздела (при обсуждении *зрительно воспринимаемого обрыва),* параллакс движения используется многими видами животных (включая и насекомых, см. Srinivasan, 1992) как очень важный признак, помогающий им избегать всевозможных углублений и обрывов.

Динамическая перспектива

Описанные в предыдущей главе паттерны оптического потока (см. рис. 8.4) являются еще одним источником информации о глубине и удаленности, получаемой за счет движения. Вспомните, что паттерны оптического потока, создаваемые движением по направлению к поверхностям или параллельно им, дают информацию о скорости и направлении движения. В них также содержится информация об относительной *удаленности* объектов от движущегося наблюдателя. Дж. Дж. Гибсон назвал содержащийся в паттернах оптического потока источник информации о расстоянии, на котором находятся объекты, динамической перспективой *(motion perspective).* Например, когда наблюдатель приближается к фронтальной поверхности, он благодаря изменяющейся перспективе может оценить взаимное расположение объектов по отношению к нему (Clocksin, 1980; McCleod & Ross, 1983). Это чувство знакомо всем: где бы вы ни шли, вам кажется, что объекты, располо-

женные ближе к вам, проносятся мимо быстрее, чем более удаленные, создавая на сетчатке последовательность «проплывающих» или стремительно «текущих» друг за другом изображений и тем самым снабжая вас надежной информацией об относительной удаленности.

Аккомодация

Аккомодация была описана нами в главе 3 (см. рис. 3.17) как механизм образования на сетчатке четкого изображения в результате фокусировки хрусталика ресничными мышцами, получающими соответствующий сигнал от окуломоторной, или глазодвигательной, мышцы. Поскольку аккомодация при фокусировке взгляда на близлежащих объектах отличается от аккомодации при его фокусировке на удаленных объектах, окуломоторные сигналы (т. е. степень сокращения мышцы) могут служить источником информации о положении в пространстве того объекта, за которым ведется наблюдение. Поскольку «настройка» хрусталика определяется расстоянием, на котором находится объект наблюдения, аккомодация также может служить источником информации о глубине и удаленности. Следует, однако, помнить, что возможности аккомодации как источника пространственной информации весьма ограничены. Оценить с помощью аккомодации глубину и удаленность можно лишь в том случае, если расстояние, отделяющее наблюдателя от объекта, не превышает 2 метров.

Прежде чем перейти к обсуждению *бинокулярных* признаков, мы расскажем еще об одном, дополнительном, источнике информации, на этот раз — когнитивной природы, который также может вносить свой вклад в восприятие пространства, — о знакомом размере.

Знакомый размер

Когда мы смотрим на знакомые объекты, мы пользуемся не только их визуальными признаками глубины и расстояния, но и информацией невизуального характера, например представлениями об их величине и форме, приобретенными нами благодаря предшествующему опыту. Мы хорошо знаем размеры окружающих нас объектов и достаточно точно можем оценить их, основываясь на своих воспоминаниях. Хотя знакомый размер объекта и не является визуальным признаком глубины или удаленности в строгом смысле этого понятия, он может играть заметную роль в восприятии пространства, а вот ответить на вопрос, в какой мере мы используем подобную информацию, — непросто.

Результаты многих исследований свидетельствуют о том, что роль знакомого размера объекта в определении его кажущегося размера зависит прежде всего от условий, в которых ведется наблюдение. Возможно, что если суждения о размере знакомых объектов выносятся в обычных условиях наблюдения, при которых визуальные признаки четко выражены, информация о знакомом размере и не используется (Fillenbaum, Schiffman & Butcher, 1965). Когда же наблюдение за объекта-Ми проводится в неблагоприятных условиях, т. е. когда признаки затененности и светимости, а также удаленности выражены слабо или вовсе отсутствуют, знание Размеров объектов, другими словами *знакомый размер,* может иметь важное значение для решения вопроса об их габаритах (Schiffman, 1967). Иначе говоря, инфор-

мация о величине объектов, основанная на предшествующем знакомстве с их аналогами, используется тогда, когда визуальные признаки удаленности либо выражены недостаточно четко, либо вовсе отсутствуют.

При некоторых условиях привычный размер знакомого объекта влияет на восприятие его *удаленности.* В одном из своих опытов Эпштейн предъявлял испытуемым фотоизображения 10-, 25- и 50-центовых монет, которые, конечно, отличаются по величине, и это всем известно (Epstein, 1963, 1967). Однако втайне от испытуемых фотографии были трансформированы таким образом, что все монеты стали одинаковыми по величине, т. е. фотоизображение 10-центовой монеты было увеличено до размеров 25-центовой, а фотоизображение 50-центовой монеты уменьшено до того же размера. Фотографии предъявлялись испытуемым в условиях, при которых визуальные признаки были выражены нечетко (использование только одного глаза, тусклое освещение и т. д.). Когда все фотографии предъявлялись с одного и того же расстояния (проекции образов всех монет на сетчатку одинаковы по величине), наблюдатели говорили, что 10-центовая монета находится ближе, чем 50-центовая монета (первая увеличена по сравнению с привычным размером, а вторая — уменьшена). Подобные результаты свидетельствуют о том, что при отсутствии достаточно четких визуальных признаков удаленности привычный размер знакомых объектов может влиять на суждение наблюдателя о том, на каком расстоянии они находятся (см. также Fitzpatrick, Pasnak & Tyler, 1982; Gogel & DaSilva, 1987).

Бинокулярные признаки

Монокулярные признаки дают богатую пространственную информацию, и на базе монокулярного зрения могут выполняться многие операции, успех которых зависит от зрения. Однако восприятие пространственной информации от некоторых источников требует активности обоих глаз. Некоторые функциональные и структурные аспекты бинокулярного зрения описаны нами в предыдущих главах. Сейчас мы приступаем **к** описанию бинокулярных признаков — тех видов пространственной информации, которые могут быть получены за счет восприятия окружающей обстановки обоими глазами.

Конвергенция

Конвергенцией называется тенденция глаз к сближению при скоординированной фиксации на объектах, расположенных вблизи от наблюдателя (рис. 9.17).

Объекты, расположенные далеко от наблюдателя, напротив, рассматриваются им таким образом, что линии взглядов обоих глаз практически параллельны. Поскольку конвергенция контролируется глазодвигательными мышцами, степень их напряженности может служить признаком глубины или удаленности: чем ближе объект, тем более они напряжены. Однако, как и аккомодация, конвергентные движения глаза в качестве источника информации о глубине или удаленности полезны только в тех случаях, когда речь идет об объектах, расположенных вблизи от наблюдателя.

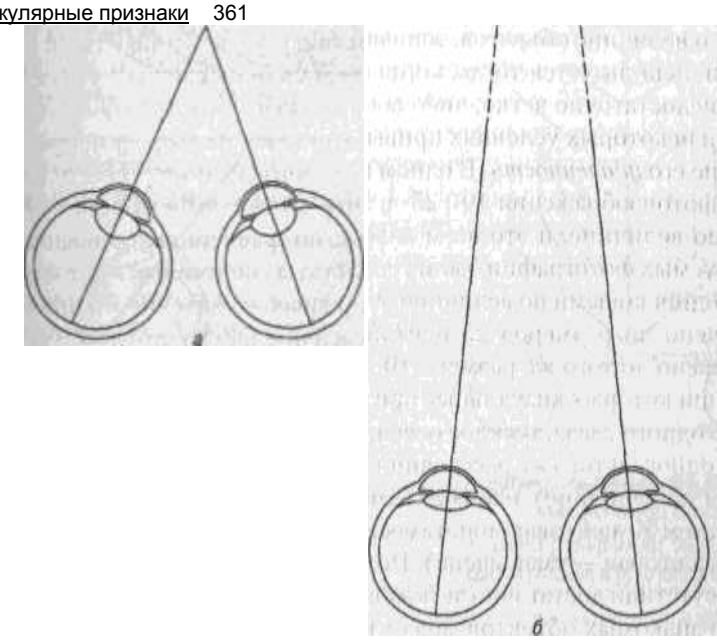


Рис. 9.17. Конвергенция глаз

а - конвергенция глаз на близко расположенном объекте. Зрительные линии обоих глаз направлены внутрь, *б*- конвергенция глаз на удаленном объекте. Зрительные линии обоих глаз практически параллельны. Аккомодация глаз в этих различных условиях наблюдения тоже различна. В первом случае, а, хрусталики выпуклые, что соответствует близкому зрению, во втором случае, *б,* - относительно плоские

Бинокулярная диспарантность

Как правило, животные с фронтально расположенными глазами, и в первую очередь хищники и приматы, обоими глазами видят относительно большую часть поля зрения (т. е. у них относительно большие области бинокулярного перекрывания, см. рис. 3.16). Однако в пределах области бинокулярного перекрывания два глаза получают несколько отличные друг от друга изображения одной и той же объемной композиции. На рис. 9.18 схематически представлено различие в восприятии одного и того же объекта двумя глазами.

У человека это происходит потому, что его глаза удалены друг от друга примерно на 2-3 дюйма (около 5-8 см). В том, что два изображения немного отличаются Друг от друга, легко убедиться, если рассматривать какой-либо находящийся поблизости объект поочередно каждым глазом. В зависимости от местоположения точки фиксации взгляда поле зрения одного глаза несколько отличается от поля зрения другого (рис. 9.19).

Эта разница между двумя ретинальными изображениями называется **бинокулярной диспарантностью** (или иногда — **бинокулярным параллаксом).** На Рис. 9.20 изображено возникновение диспарантности в простых условиях, заключающихся в том, что наблюдатель рассматривает две линии, лежащие на разных Расстояниях друг от друга.

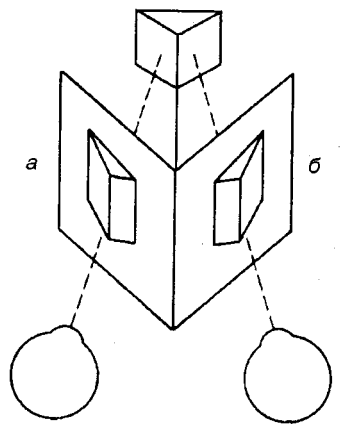


Рис. 9.18. Разное восприятие клина двумя глазами

Изображение трехмерного клина на сетчатке правого (*а*) и левого (*б*) глаз

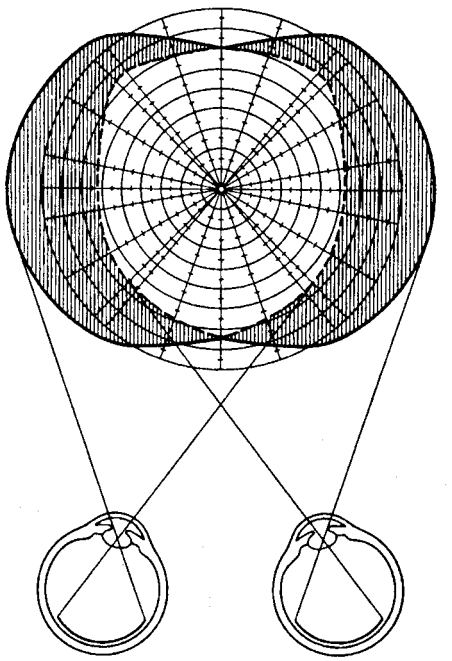


Рис. 9.19. Схематическое изображение полей зрения каждого глаза (заштрихованные участки) и области бинокулярного перекрывания (центральный белый участок)

Обратите внимание на то, что участок, видимый одним глазом, не совпадает полностью с участком, видимым другим глазом. Центральный белый участок – бинокулярное поле зрения

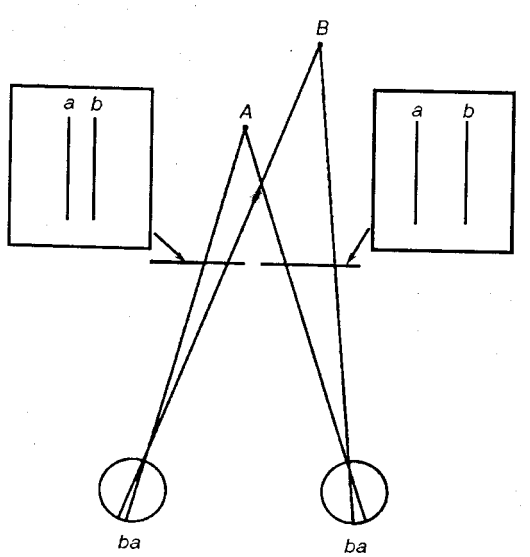


Рис. 9.20. Восприятие относительного расстояния между двумя объектами на основании информации, являющейся следствием бинокулярной диспарантности

Как следует из проекций, представленных в двух квадратах, восприятие относительного расстояния между двумя линиями является следствием небольшой диспарантности расстояний между изображениями линий на сетчатке правого и левого глаза (т. е. расстояний между *a* и *b*). На сетчатке правого глаза расстояние между изображениями линий больше. Иными словами, расстояние *ba* на сетчатке правого глаза больше, чем расстояние *ba* на сетчатке левого глаза. Разница между этими расстояниями определяет степень бинокулярной диспарантности. Общее правило таково: чем больше расстояние между объектами, тем больше и диспарантность

Способность зрительной системы использовать информацию, являющуюся следствием бинокулярной диспаратности, для определения того, насколько один объект более удален от наблюдателя, чем другой, впечатляет. По данным (Yellot, 1981). возможна идентификация такой разницы в удаленности двух объектов, которая соответствует сетчаточной диспарантности, равной 1 мк (микрон — 0,001 мм). Иными словами, обнаруживается даже равная 1 мк разница в положении образа объекта на левой и правой сетчатках. Если учесть, что ширина колбочек центральной ямки колеблется от 0,003 до 0,008 мм, это означает, что зрительная система может надежно обнаруживать сетчаточные диспарантности, которые значительно меньше диаметра большинства фоторецепторов сетчатки!

Описанный ниже эксперимент доказывает, что бинокулярная диспарантность придает бинокулярному зрению необыкновенную ценность.

Экспериментальное подтверждение

Оценка глубины на основании бинокулярной диспарантности

Рассмотрим на практическом примере, с какой точностью можно оценить глубину на основании бинокулярной диспарантности. Если вы возьмете два каких-либо вертикальных предмета, например два карандаша, по одному в каждую руку и будете держать их на расстоянии вытянутой руки, причем один из них будет на 1 мм ближе к вам, чем другой, вы сможете определить даже такую незначительную разницу. Роль бинокулярной диспарантности станет очевидной, если, выполняя этот эксперимент, вы закроете один глаз. Вы сразу же поймете, что оставшихся в вашем распоряжении монокулярных признаков недостаточно для того, чтобы обнаружить разную удаленность от вас двух карандашей. Чтобы понять, насколько важна бинокулярная диспарантность, достаточно, прикрыв один глаз, попытаться вдеть нитку в иголку.

В следующем подразделе мы продолжим рассмотрение роли бинокулярной диспарантности в восприятии пространства вообще и в восприятии глубины и удаленности в частности.

Корреспондирующие точки сетчаток и гороптер

Более глубокий анализ диспарантности как источника информации о глубине и расстоянии может быть сделан на основе некоторых фундаментальных принципов физиологической оптики. Когда взгляд зафиксирован на небольшом объекте, его изображение проецируется на центральные ямки обеих сетчаток. Однако будет виден только один объект, поскольку оба глаза конвергированы и проецируют объект на идентичные, или *корреспондирующие,* участки обеих сетчаток. Это значит, что если можно было бы совместить две сетчатки со спроецированными на них изображениями так, чтобы совпали обе центральные ямки, то совпали бы и оба изображения объекта, на котором зафиксирован взгляд. Участки сетчаток, идентичные для обоих глаз, называются корреспондирующими точками сетчаток.

Образы тех объектов, на которых взгляд не фиксируется, но которые находятся примерно на том же расстоянии от наблюдателя, что и объект, на котором зафиксирован его взгляд, тоже будут

проецироваться на идентичные, или корреспондирующие, точки обеих сетчаток. Эти образы будут «слиты» друг с другом, и каждому объекту будет соответствовать сингулярное изображение. Для каждого

расстояния от наблюдателя до объекта и степени конвергенции существует определенный ряд пространственных точек, проецируемых на корреспондирующие места обеих сетчаток. Объект, лежащий в любой из этих пространственных точек виден в единственном числе и воспринимается наблюдателем как лежащий на том же расстоянии от него, что и тот объект, на котором зафиксирован его взгляд

Если мы графически обозначим все точки пространства, соответствующие объектам, видимым при одинаковой высоте фиксации взгляда и конвергенции спроецируем их на соответствующие точки сетчатки, то получим поверхность, называемую **гороптер** (рис. 9.21).

Гороптер - это воображаемая, или виртуальная, проходящая через точку фиксации взгляда искривленная поверхность, проекции всех точек которой попадают на корреспондирующие точки сетчаток обоих глаз и вызывают ощущение единичного объекта. Однако объекты, не лежащие на гороптере, соответствующем опре-

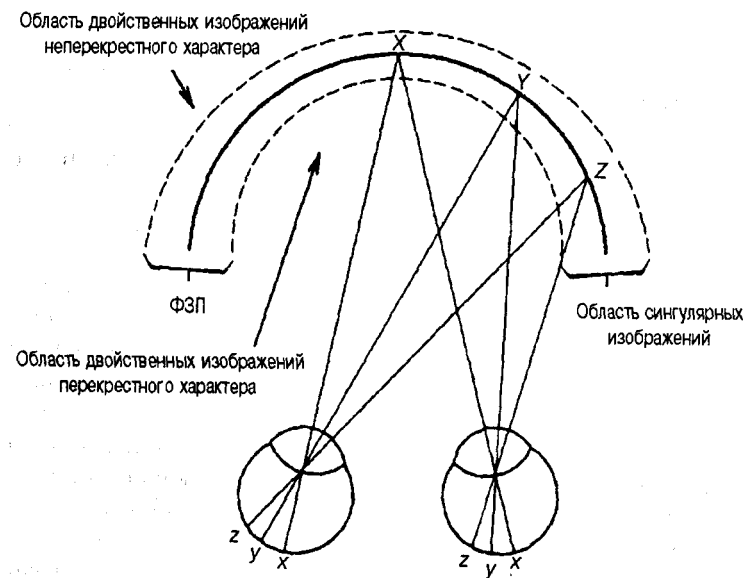


Рис. 9.21. Гороптер и фузионная зона Панума (ФЗП), соответствующие определенному положению глаз

Гороптер представляет собой воображаемую поверхность, являющуюся совокупностью точек пространства, изображения которых проецируются на корреспондирующие точки сетчаток и вызывают впечатление единичного объекта. Так, изображения точек *X, Y и* 2проецируются на корреспондирующие точки обеих сетчаток, и каждая из них воспринимается как сингулярный объект. Несмотря на то что образы пространственных точек, лежащих внутри ФЗП, не попадают на корреспондирующие точки сетчаток, эти образы тоже будут сливаться и точки будут восприниматься как единичные объекты. Пространственные точки, не лежащие на гороптере (и не вписывающиеся в границы ФЗП), будут вызывать двойное видение (двоение). Объекты, расположенные дальше точки фиксации взгляда (т. е. дальше, чем гороптер и ФЗП), воспринимаются в виде двойственных изображений неперекрестного характера (см. ниже), а объекты, расположенные ближе гороптера и ФЗП, - в виде двойственных изображений перекрестного характера. Гороптер и связанная с ним ФЗП зависят от расстояния фиксации взгляда и от окулярной конвергенции, так что разным положениям глаз соответствуют разные гороптеры и разные ФЗП

деленному положению глаз, вызывают *диплопию,* или двойное видение, поскольку они стимулируют диспарантные, или **некорреспондирующие, точки сетчатки.** Иными словами, объекты, расположенные ближе или дальше точки фиксации взгляда, проецируются на не соответствующие друг другу участки двух сетчаток, что и приводит к диспарантности и двойному видению.

Исключением из этого общего правила являются те некорреспондирующие точки сетчаток, которые представляют собой образы точек пространства, лежащих в пределах узкой горизонтальной полосы, окружающей гороптер. Этот участок, показанный на рис. 9.21, называется **фузионной** зоной **Панума (ФЗП)** (по имени датского физиолога, который первым указал на его важность). Пространственные точки, стимулирующие несоответствующие точки сетчаток, но лежащие внутри ФЗП, тоже сливаются в сингулярное изображение. Иными словами, ФЗП представляет собой небольшую зону, окружающую гороптер, соответствующий совершенно определенному расстоянию между объектом и наблюдателем, ретинальные изображения точек которой сливаются, хотя им и присуща некоторая диспарантность. Пространственные стимулы, располагающиеся внутри ФЗП, воспринимаются как единичные объекты, которые кажутся наблюдателю лежащими на несколько ином расстоянии от него, чем объект, на котором зафиксирован его взгляд.

Обобщая изложенное выше, можно сказать, что для данного расстояния от наблюдателя до объекта, на котором зафиксирован его взгляд, существует область пространства, дающая слитные, сингулярные изображения и окруженная участками двойного видения. На каком бы объекте ни был бы зафиксирован наш взгляд, образы других объектов, находящихся на одинаковом с ним расстоянии, проецируются на соответствующие точки обеих сетчаток, и каждый из этих образов создает впечатление сингулярного объекта; объекты, находящиеся на другом расстоянии от наблюдателя (и лежащие вне ФЗП), проецируются на некорреспондирующие точки сетчаток, в результате чего возникает эффект двойного видения. Каждой точке фиксации взгляда соответствует свой гороптер: только объекты, расположенные на *одном и том же* расстоянии от наблюдателя и требующие одинаковой конвергенции, дают сливающиеся образы и воспринимаются наблюдателем как сингулярные. Иными словами, для каждого расстояния от наблюдателя до объекта существует отдельный и определенный набор соответствующих точек сетчатки и свой собственный гороптер (наряду с примыкающей к нему ФЗП), и только объекты, изображения которых проецируются на эти корреспондирующие точки, дают сингулярные изображения.

Эффект двойного видения, которое является результатом стимулирования некорреспондирующих точек сетчаток, может быть продемонстрирован следующим образом.

Этот эксперимент обобщает некоторые рассмотренные выше положения. Если взгляд зафиксирован на более близко расположенном предмете, его образ проецируется на центральные ямки обеих сетчаток. Что же касается более удаленных предметов, на которых взгляд не фиксируется, то их образы проецируются на некорреспондирующие точки двух сетчаток и наблюдается эффект двойного видения. Однако — это на рисунке не показано, — когда взгляд фиксируется на более Удаленном предмете, более близко расположенный предмет будет воспринимать-

ся в двойном виде, причем двойственное изображение будет носить перекрестный характер. Дело в том, что характер двойственных изображений различен и зависит от того, где — за объектом, на котором зафиксирован взгляд, или перед ним — лежит объект, воспринимаемый в двойном виде. Двойственные изображения объектов, лежащих за точкой фиксации взгляда, — *неперекрестные {неперекрестная диспарантность),* а двойственные изображения объектов, лежащих ближе точки фиксации взгляда, — *перекрестные (перекрестная диспарантность).* Следовательно, особенность двойственных изображений — перекрестные они или неперекрестные — может служить признаком относительной удаленности (хотя, скорее всего, мы используем его бессознательно).

Итак, обобщая все вышесказанное, можно повторить, что до тех пор, пока взгляд наблюдателя зафиксирован на какой-либо точке данного гороптера, все пространственные точки, расположенные на таком же расстоянии от наблюдателя, проецируются на корреспондирующие точки обеих сетчаток и поэтому воспринимаются как сингулярные. Объекты, расположенные ближе или дальше гороптера (объекты, лежащие вне ФЗП данного гороптера), проецируются на некорреспондиру-

Экспериментальное подтверждение

Двойное видение и бинокулярная диспарантность

Возьмите в руки два предмета и держите их так, как показано на рис. 9.22. Зафиксировав взгляд на более близко расположенном предмете, вы одновременно увидите его в одиночном виде и более удаленный предмет - в двойном. Это связано с тем, что образ более близко расположенного предмета проецируется на корреспондирующие точки центральных ямок *(F)* обоих глаз, а образ более удаленного предмета - на некорреспондирующие точки обеих сетчаток. На рис. 9.22 сплошными линиями обозначен свет, отражающийся от обоих предметов, а пунктирными - направления проецирования изображений более удаленного предмета, свидетельствующие о том, что он дает два отдельных образа, в результате чего и воспринимается в двойном виде.

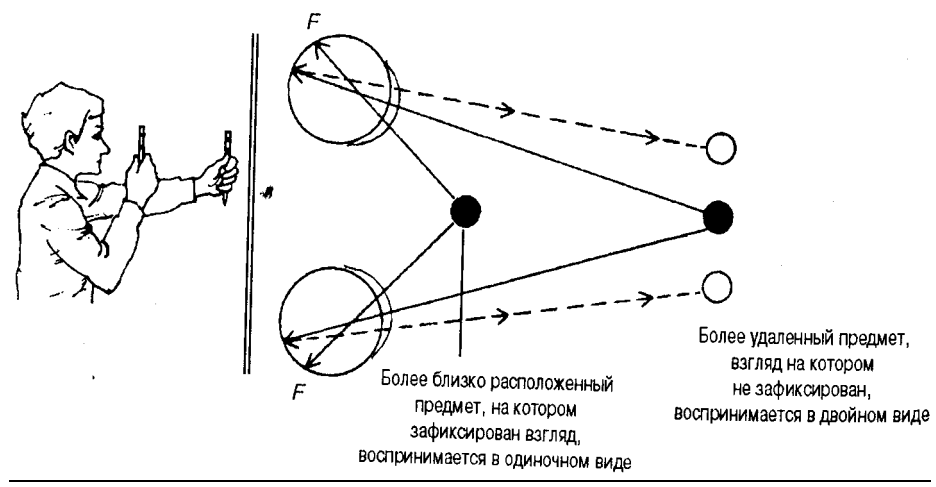


Рис. 9.22. Двойное видение и бинокулярная диспарантность

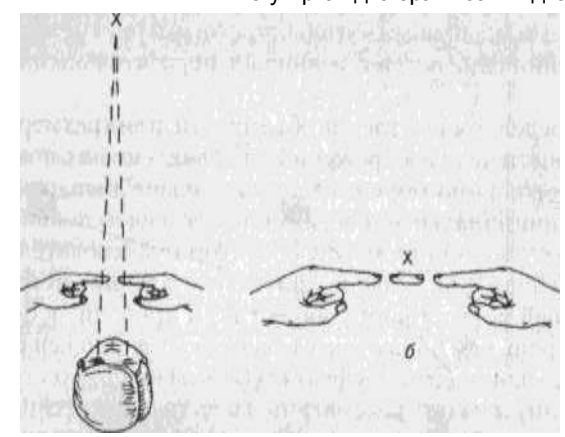
ющие точки сетчаток. Поэтому их образы не сливаются и они воспринимаются в двойном виде. Двойственные изображения объектов, лежащих перед гороп-те-ром, — перекрестные, а двойственные изображения объектов, лежащих за гороп-тером, — неперекрестные.

Хотя паттерн двойственных изображений непосредственно зависит от положения объектов относительно гороптера, двойственные изображения объектов, на которых взгляд не фиксируется, как правило, подавляются и остаются незамеченными, исключение составляют лишь некоторые особые ситуации. Описанный ниже эксперимент с «фантомными образами» иллюстрирует эту мысль.

Экспериментальное подтверждение

Бинокулярная диспарантность и фантомные образы

Бинокулярная диспарантность и двойное видение могут быть использованы для создания уди-



вительных эффектов, в чем вы сами можете легко убедиться, если выполните следующие инструкции. Расположите указательные пальцы перед лицом на уровне глаз на расстоянии, равном примерно 12 дюймам (около 30 см), таким образом, чтобы пальцы «смотрели» друг на друга и чтобы расстояние между ними было равно примерно 1 дюйму (2,54 см) (рис. 9.23, а). Зафиксируйте взгляд прямо перед собой на точке, расположенной за пальцами, на стене или какой-либо иной удаленной поверхности (на рисунке точка фиксации обозначена буквой Л). Между пальцами появится фантомный плавающий предмет, по форме напоминающий сосиску (б). Стоит вам немного потренироваться, и вы, слегка смещая пальцы то вверх, то вниз, сможете наблюдать причудливые пространственные эффекты. Кроме того, немного приблизившись к поверхности, на которой зафиксирован ваш взгляд, вы увидите, что «сосиска» сморщивается.

«Сосиска» - результат слияния левого и правого ретинальных изображений кончиков обоих пальцев. Это утверждение можно легко проверить. Для этого нужно попеременно моргнуть каждым глазом. При этом будет преобладать монокулярное зрение, и «сосиска» исчезнет. Но когда открыты оба глаза, два монокулярных образа сливаются, «сосиска» вскоре появляется снова. Этот эксперимент описан в работе (Sharp, 1928).

Рис 9.23. Бинокулярная диспарантность и фантомные образы

Бинокулярная диспарантность и стереопсис

Диспарантность 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 *ste-*

reos — твердый, объемный, пространственный и *opsis* — зрение). Одним из наиболее впечатляющих примеров стереоскопического зрения является восприятие эффекта глубины при просмотре слайдов с помощью такого знакомого многим оптического прибора, как **стереоскоп,** например стереоскопа марки *View-Master.* 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 стереополуполями), возникает иллюзия объема. Популярный в середине и во второй половине XIX в. стереоскоп викторианского типа представлен на рис. 9.24, *а,* а примеры стереограмм — на рис. 9.24, *б и в.*

Итак, стереограммы — это парные картины, на одной из которых изображено то, что видит левый глаз, а на другой то, что видит правый. Когда слегка диспарантные 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 диспарантности двух изображений, предъявленных с помощью стереоскопа или стереопроектора, и оно тем сильнее, чем больше диспарантность. 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 диспарантности. 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

Пары стереокартин, или стереограмм, представленные ниже на *б* и *в*, вставляются в держатель таким образом, что каждый глаз воспринимает одну стереограмму из пары.

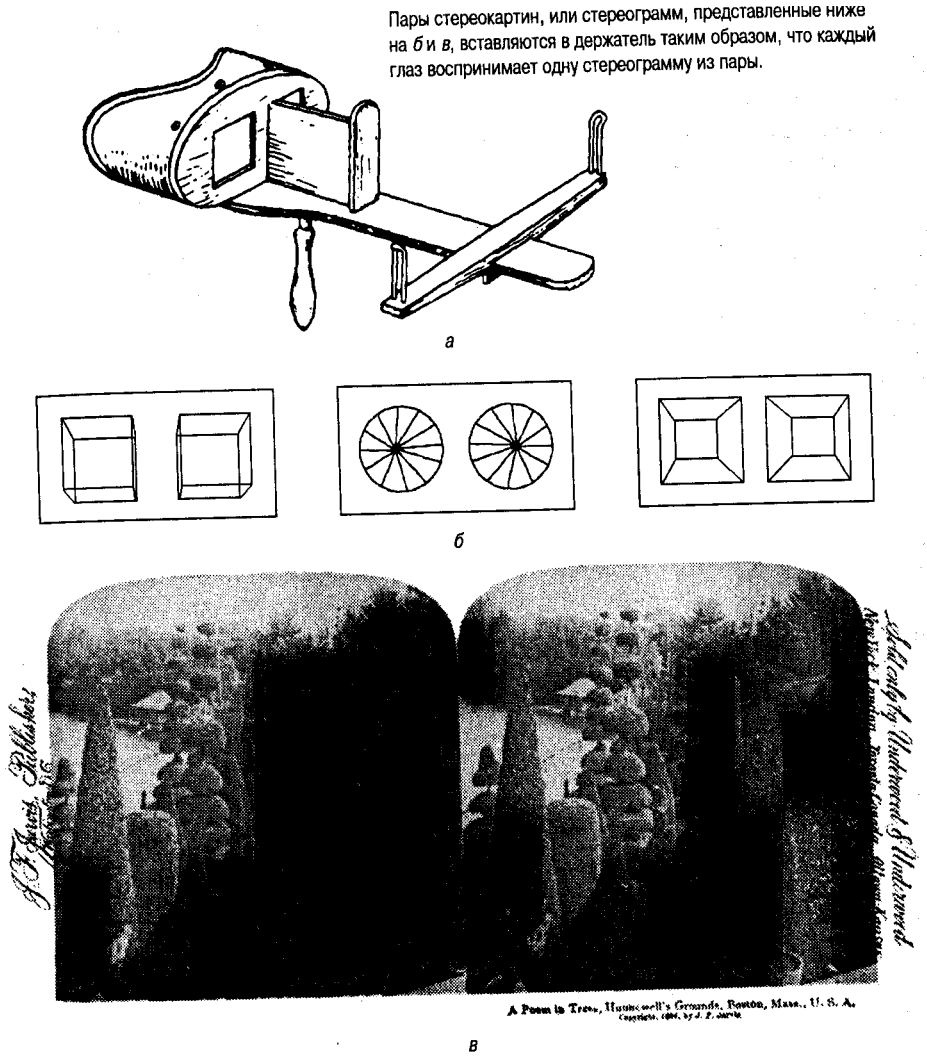


Рис. 9.24. а - типичный переносной стереоскоп, с помощью которого глазам предъявлялись разные изобра-жения. Это стереоскоп, созданный Оливером Уэнделлом Холмсом-старшим, отцом знаменитого.члена Верхов-ного суда, б- три простые контурные стереограммы. Элементы парных фигур подобраны таким образом, что при их просмотре через стереоскоп и слиянии изображений виден один трехмерный объект. Фигурьн.каждой стереограмме - изображения, которые были бы восприняты левым и правым глазами при их просмотре оез стереоскопа, *в* - ранняя фотографическая стереограмма. При просмотре через стереоскоп левое и правое изоб-ражения проецируются соответственно на левый и правый глаза. При слиянии изображении воспринимается объемное изображение пейзажа, названное «Поэмой деревьев». Хотя оба изображения и кажутся идентичными, при внимательном осмотре обнаруживаются их незначительные различия. Стереограмма состоит из двух: слегка отличающихся друг от друга фотографий одного и того же пейзажа, сделанных с позиции каждого глаза. Так, пейзаж, представленный слева, - это то, что видит левый глаз, а пейзаж, представленный справа, - то, что видит правый глаз. Незначительные отличия двух образов приводят к бинокулярной диспарантности, и когда они предъявляются с помощью стереоскопа отдельно каждому глазу, пейзаж приобретает объемность и глубину

(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 диспарантность либо вовсе отсутствует, либо выражена очень сла-бо. Следовательно, чем больше расстояние от наблюдателя до объекта, тем меньше бинокулярная диспарантность и тем менее объемными кажутся объекты.

Перцептивные эффекты бинокулярной диспарантности могут иметь важные практические последствия. Благодаря чрезвычайной чувствительности зрительной системы даже к незначительной информации о бинокулярной диспарантности 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 диспарантности и происходит их слияние. Но если один глаз видит фальшивую купюру (пусть даже мастерски изготовленную), а второй — подлинную, диспарантность 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 диспарантность), 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 случа-

ях, когда эти изображения весьма значительно отличаются друг от друга, наблюдается необычное явление, называемое **бинокулярным соперничеством.** Общепризнано, 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 подавленным. 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 Papathomas 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 (burner 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).

Циклопическое восприятие

Термин **циклопическое восприятие** предложен Белой Джулезом для обозначения стереоэффекта, возникающего при просмотре созданных им стереограмм совершенно нового типа, образованных кажущимся случайным набором черных и белых элементов (рис. 9.25, *а) J*ulesz, 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 стереограмм 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. Безвестном 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 при-частны к зрительному восприятию (Julesz, 1971, p. xi).

Стереограммы, с помощью которых Джулез в свое время демонстрировал циклопическое восприятие, действительно необычны (Kemp, 1998). Воспользовавшись компьютерной программой, он создал два практически одинаковых рисунка, представлявших собой случайные конфигурации точек (обычно такие стереограммы 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

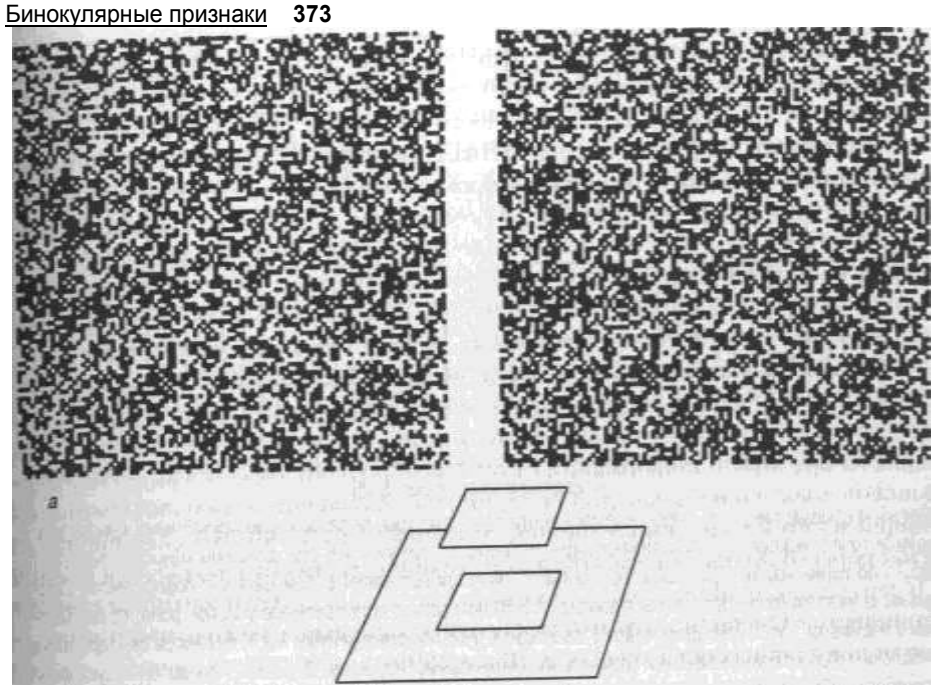


Рис. 9.25. Стереограммы, образованные случайными конфигурациями точек а - при монокуляром просмотре эти изображения воспринимаются как лишенные глубины однородно скомпонованные случайные элементы. Но при стереоскопическом слиянии в центре виден квадрат, «парящий» над фоном, и создается вполне отчетливое впечатление глубины, *б* - аналогичная картина - «парящий» над фоном квадрат - наблюдается и при просмотре анаглифа этой стереограммы в правильно подобранных по цвету очках. *(Источит:* B. Julesz. *Foundation ofcyclopean perception.* Chicago: University of Chicago Press, 1971, p. 21)

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).*

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 диспарантность (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, образован-

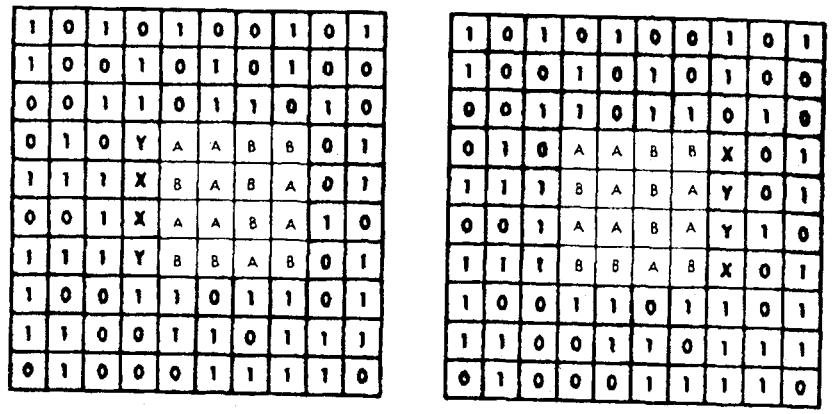


Рис. 9.26. Схематическое изображение процесса создания случайно-точечных стереограмм,

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 цельные поверхности. Смещенные участки (они образованы ячейками А и В) покрывают определенные участки фона, образованного ячейками 1 и 0. Благодаря сдвигу, свободные участки фона (ячейки *X и Y)* остаются непокрытыми и заполняются дополнительными случайными элементами. *(Источник:* B. Julesz. *Foundation ofcyclopean perception.* Chicago: University of Chicago Press, 1971, p. 21)

ной случайной конфигурацией точек. Если центральный участок левого квадрата сместить влево, а правого — вправо (т. е. если создать обратную диспарантность 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 Джулеза (Julesz, 1964, 1971), из случайно-точечных стереограмм стереоскопический эффект извлекается зрительной системой автоматически благодаря определенному процессу, протекающему на нейронном уровне. Этот процесс, результатом которого является восприятие глубины, включает сопоставление тех участков рисунков, которые идентичны для обоих глаз, и оценку остающихся участков бинокулярных диспарантностей. Для возникновения эффекта глубины, или стереопсиса, достаточно одной бинокулярной диспарантности, 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 стерео-граммы — 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. Проекции 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 Джулеза 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 постижения 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 диспарантности двух сетчаток, а не «занимается» поэлементным сопоставлением двух ретинальных изображений. В данном случае необходим *глобальный* процесс поиска многих диспарантностей, без которых невозможно восприятие трехмерной поверхности. Поскольку требуется полное, или глобальное, сравнение диспарант-ных 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.**

Автостереограммы. У нас нет технических возможностей продемонстрировать здесь стереопсис, достигаемый с помощью стереограмм Джулеза (впрочем, возможно, читатель не поленится посмотреть стереопару, представленную на рис. 9. 25, *а,* через стереоскоп). Однако, приложив некоторые усилия, без всяких специальных приспособлений можно испытать эффект глобального стереопсиса с помощью **автостереограммы.** Автостереограмма представляет собой специальную форму стереограммы, созданную Кристофером Тайлером (Pugliese, 1991; Tyler & Clarke, 1990; Stork & Rocca, 1989), содержащую (в пределах одного рисунка, напечатанного типографским способом) информацию для обоих глаз и, подобно стереограммам Джулеза, не имеющую никаких монокулярных признаков. Пример типичной автостереограммы представлен на рис. 9.27. Рекомендации, которым необходимо следовать, чтобы с их помощью наблюдать стереоскопический эффект, приводятся ниже, в описании эксперимента.

Первая попытка увидеть стереоизображение для многих трудна. Некоторым людям приходится в течение нескольких минут напрягать окуломоторные мышцы, но настойчивость и тренировка помогают большинству добиваться успеха. Интересно отметить, что аналогичный стереоскопический эффект можно вызвать, глядя на пол или потолок, на которые нанесен повторяющийся узор, или на обои с определенным рисунком: в конце концов у недоумевающего наблюдателя может возникнуть ощущение, что некоторые элементы потолка или пола отделяются от

них, а фрагменты рисунка обоев «парят» перед стеной или на воображаемой поверхности перед ним (Pugliese, 1991). Причина этого явления заключается в том, что зрительная система «ошиблась», сопоставляя изображения повторяющегося узора на правой и левой сетчатках: она связала и стереоскопически «слила» в одно Два изображения, которые являются проекциями не соответствующих друг другу элементов узора, результатом чего и становится неуместное восприятие глубины (Michison & McKee, 1987).

Экспериментальное подтверждение

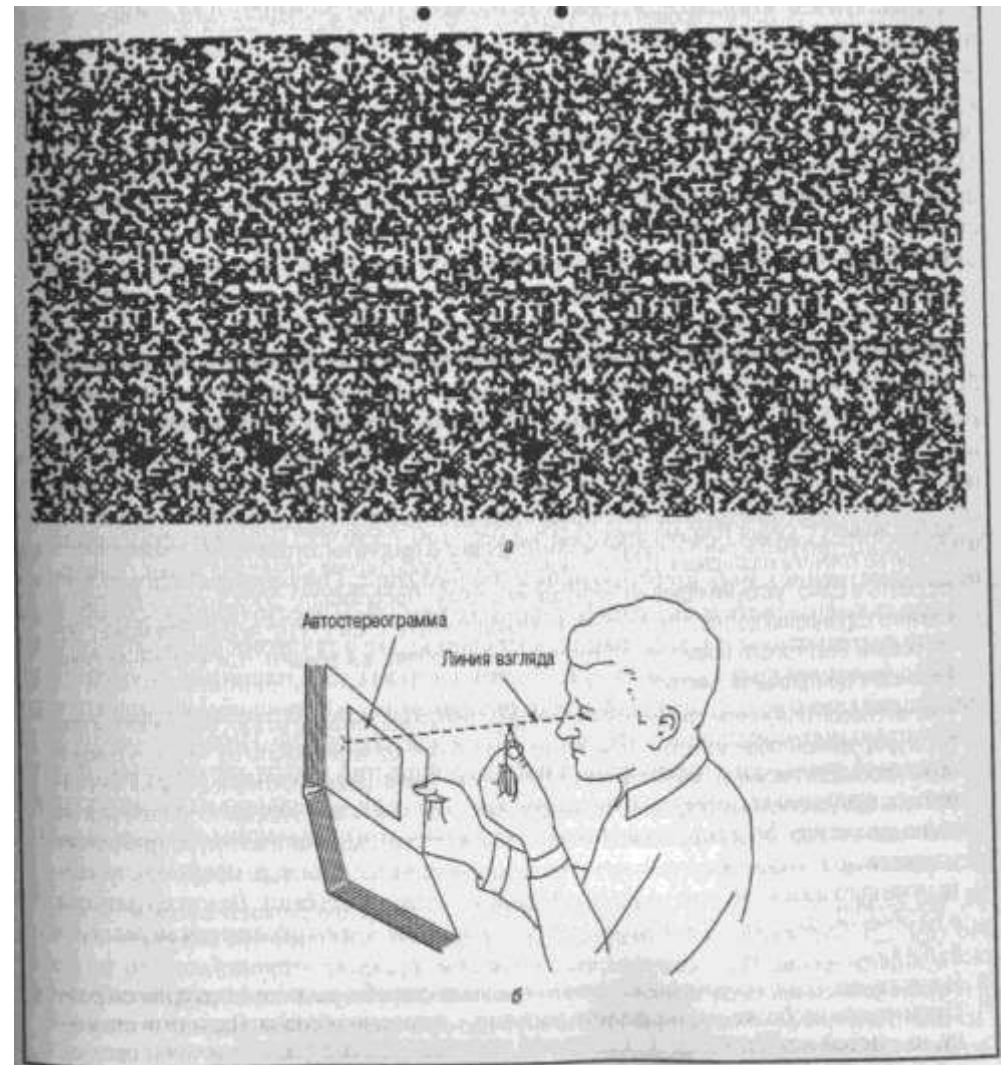
Просмотр автостереограммы

При правильном просмотре рис. 9.27, а будет видно изображение знакомого объекта, лежащего на переднем плане, на фоне образованной точками текстуры. Задача наблюдателя -сфокусировать взгляд на двух точках, расположенных над рисунком, и таким образом конвергировать глаза, чтобы видеть три точки. Иными словами, глаза должны конвергировать на точке, лежащей перед рисунком. Ниже приводятся описания нескольких способов выполнения этого требования. Ваша задача упростится, если, пока вы стараетесь получить стереоизображение, кто-нибудь будет медленно читать вам этот текст вслух. Держите карандаш длиной примерно 6 дюймов (около 15 см) перед рисунком таким образом, чтобы его кончик был направлен примерно на середину расстояния между двумя точками (рис. 9.27, б). Зафиксировав взгляд на кончике карандаша, вы сможете увидеть и две точки над рисунком. Продолжая фиксировать взгляд на кончике карандаша, медленно перемещайте карандаш взад-вперед до тех пор, пока вместо двух точек не увидите три точки, расположенные на одной прямой. (Это значит, что теперь ваши глаза конвергированы именно настолько, насколько нужно.) До тех пор пока ретинальные изображения кончика карандаша и слившейся «центральной» точки не приобретут четкость, поддерживайте это положение глаз, затем медленно переведите взгляд на центральную точку и отодвиньте карандаш. Если ваши глаза стремятся вернуться в исходное положение, продолжайте попытки до тех пор, пока не сможете стабильно поддерживать восприятие конфигурации из трех точек. У одних наблюдателей образ объекта в стереоскопической глубине проступает мгновенно, другим для этого приходится поддерживать фиксацию в течение нескольких минут. Если после нескольких попыток вам так и не удалось увидеть стереоскопического изображения, попробуйте воспользоваться другими способами. Как и при первой попытке, держите карандаш так, чтобы его кончик был на уровне середины расстояния между двумя точками. Но теперь фиксируйте взгляд не столько на карандаше, сколько на самом рисунке. Поскольку ваш взгляд зафиксирован на рисунке, вы увидите двойственное перекрестное изображение карандаша. Медленно подвиньте карандаш так, чтобы два его изображения оказались на одних линиях с двумя точками фиксации над рисунком, после чего медленно сфокусируйте взгляд на кончике карандаша. Два расплывающихся изображения карандаша должны конвергировать в одно, указывающее на центральную точку. Продолжайте фокусировать взгляд на кончике карандаша до тех пор, пока центральная точка не станет четко видна. Это может потребовать некоторого времени, но когда это произойдет, вы увидите, как в глубине фона возникает центральная фигура.

Третий способ получения стереоскопического изображения, которое на этот раз появится *под* текстурировнной поверхностью (поскольку глаза будут конвергировать на точке, лежащей ниже плоскости рисунка), заключается в следующем. Глядя на верхнюю часть рисунка, постарайтесь фокусировать взгляд на поверхности, лежащей за точками, например на полу или на стене, до тех пор, пока вместо двух точек не появятся три. Задержите взгляд на трех точках на несколько мгновений, а затем, не меняя точки фокусирования взгляда, медленно опускайте глаза вниз до тех пор, пока не увидите в глубине «спрятанный» объект. *Подсказка* (хоть она и не облегчит вашу задачу!): в глубине видна та же фигура, что и изображенная на рис. 7.16 в главе 7.

И последнее. Если, испробовав все описанные выше способы, вы так и не увидели стереоскопического изображения, попробуйте поступить следующим образом. Поднесите страницу, на которой нарисована автостереограмма, как можно ближе к глазам, так чтобы рисунок

превратился в расплывшееся пятно. В этот момент ваш взгляд сфокусирован на точке, лежащей позади поверхности страницы. Затем, *как можно медленнее,* отодвигайте страницу от лица таким образом, чтобы автостереограмма все время оставалась не в фокусе. Если она все же оказалась в фокусе, это значит, что вы, возможно, слишком далеко отодвинули страницу (или сделали это слишком быстро). Помните, важно, чтобы автостереограмма была не *в фокусе.* Попробуйте еще раз, отодвигая страницу еще медленнее и время от времени останавливаясь, и делайте это до тех пор, пока не «проявится» трехмерное изображение. Автостереограмма -



необычная и трудная задача для зрительной системы, поскольку нужно сфокусировать глаза на расстоянии, отличном оттого, на котором расположен сам рисунок. Но если у вас два глаза и вы не страдаете *стереослепотой* (см. следующий подраздел), то при известной тренировке (и терпении) вы сможете увидеть стереоскопическое изображение.

Рис. 9.27. Автостереограмма (а) и способ ее просмотра (б)

Одно из наиболее значительных открытий, сделанных в ходе изучения циклопического восприятия с помощью случайно-точечных стереограмм, заключается в

том, что стереоскопическое видение может возникнуть не только при полном отсутствии монокулярных признаков глубины, но даже и при отсутствии каких-либо распознанных контуров или форм. При монокулярном просмотре стереограммы Джулеза воспринимаются как совершенно неупорядоченные текстуры, в которых нет даже намека на узнаваемые контуры или формы. Следовательно, стереоскопическое видение может не только предшествовать восприятию формы, но может также и происходить без ее распознавания. Иными словами, восприятие очертаний и форм не является обязательным условием достижения стереоскопического эффекта. Как отмечали Галик и Лоусон, циклопическое восприятие свидетельствует о том, что «не столько контуры наталкивают [нас] на мысль о глубине, сколько глубина — на мысль о контурах» (Gulick & Lawson, 1976, p. 272).

Восприятие стереоскопического эффекта с помощью стереограмм, образованных случайными конфигурациями точек, доступно не только взрослым, но и младенцам. По одним данным она проявляется с 3,5-месячного возраста (Fox et al, 1980), по другим — с 6-месячного (Petrig et al., 1981). Более того, эта форма стереоскопического видения свойственна не только человеку, но и другим биологическим видам. Способность к восприятию стереоскопического эффекта с помощью случайно-точечных стереограмм проявляют соколы (Fox, Lehmkuhl & Bush, 1977), кошки (Fox & Blake, 1970) и обезьяны (Bough, 1970).

Циклопическая стимуляция создается уникальным сочетанием лабораторных условий, обеспечивающим техническое отделение друг от друга монокулярной и бинокулярной форм предъявления информации. Наблюдение за большинством пространственных событий осуществляется без подобных ограничений. В реальной жизни пространственному восприятию способствует комбинация различных пространственных признаков визуальных стимулов и эффективность восприятия зависит от того, насколько эти признаки сочетаются друг с другом. Однако специфические возможности стереоскопического видения принесли немалую пользу пространственному восприятию окружающего мира. Оно не только позволяет наблюдателю извлекать точную информацию о глубине и расстоянии между объектами и поверхностями и тем самым вносит свой вклад в такие процессы, происходящие на более высоких уровнях зрительной системы, как, например, координация движений глаз и руKj, но и способствует *унитарному {совокупному)* восприятию тех отличительных признаков, которые лежат на одной глубине. Иными словами, перцептивный процесс группирования и интегрирования пространственных отличительных признаков, лежащих на одной глубине или одинаково удаленных от наблюдателя, способствует узнаванию объекта. Фрисби следующим образом выразил эту мысль:

> Возможно, именно распознавание защитной окраски было самым первым результатом того, что в ходе эволюционного развития биологические виды получили бинокулярное зрение. Не исключено, что настоящим оправданием бинокулярного зрения стала возможность распознавать с его помощью характерное сочетание полос — отличительный признак, принадлежащий тигру (или иному хищнику, или желанной, но спрятавшейся добыче), и отделять их от полос, образуемых ветвями, прутьями

> и листьями дерева, в котором он притаился, готовясь к прыжку. Подобное предположение находится в полном соответствии с открытием случайно-точечных стереограмм, ибо они показывают, сколь велики возможности стереопсиса в том, что касается распознавания защитной окраски как отличительного признака: любой способности воспринимать глубину, основным оружием которой является стереоскопическое зрение, зрительная система гораздо лучше может разложить общую картину на ее составляющие и таким образом выполнить возложенную на нее работу — увидеть, что же это такое (Frisby, 1980, p. 155).

объектможно увидеть только после того, как произойдет бинокулярное слияние его образов...

Возможно, благодаря особой

Нейрофизиологические основы бинокулярной диспарантности

физиологической основой стереоскопического зрения являются обнаруженные у многих млекопитающих, в том числе и у человека, клетки, избирательно реагирующие на бинокулярную диспарантность. Иными словами, существуют клетки, слабо реагирующие на монокулярную стимуляцию, но активные по отношению к стимуляции, в результате которой возникают отличные друг от друга ретинальные изображения (бинокулярная диспарантность). Эти клетки, названные *детекторами диспарантности,* активируются, когда соседствующие друг с другом группы стимулов идентичных диспарантностей достигают обеих сетчаток (Barinaga, 1998; Dobbins et al., 1998; Heydt et al., 1978; Hubel & Wiesel, 1970; Ohzawa et al, 1990; Poggio, 1995; Poggio & Poggio, 1984; Sakata et al., 1996; Trotter et al., 1995). Это значит, что бинокулярная стимуляция избирательно возбуждает различные пулы детекторов диспарантности, «настроенных» на различные диспарантности. Некоторые детекторы «имеют узкую полосу пропускания» и реагируют на стимулы, бинокулярная диспарантность которых либо невелика, либо вовсе отсутствует; особенно активно они реагируют на стимулы, лежащие исключительно на линии фиксации или на близком к ней расстоянии (т. е. на раздражители, лежащие внутри ФЗП гороптера и стимулирующие соответствующие точки сетчаток, см. рис. 9.21). Другие клетки избирательно реагируют только на стимулы, лежащие перед или за линией фиксации взгляда.

Так, Поггио и Фишер изучали активность нейронов коры головного мозга обезьяны при фиксации ее взгляда на точке, лежащей на определенном расстоянии от нее (Poggio & Fischer, 1977). Исследователи предъявляли ей стимулы, располагая их перед или за точкой фиксации взгляда. Они обнаружили, что если взгляд обезьяны был зафиксирован на определенной точке, нейроны коры ее головного мозга вели себя по-разному: в некоторых клетках потенциалы действия возникали только тогда, когда предъявленные обезьяне стимулы располагались перед точкой фиксации (и клетки тормозились, когда стимулы располагались за точкой фиксации), а некоторые клетки вели себя диаметрально противоположным образом: они тормозились стимулами, располагавшимися перед точкой фиксации, и активировались стимулами, располагавшимися за ней. Так было доказано, что в коре головного мозга приматов имеются клетки, не просто реагирующие на бинокулярную стимуляцию, но избирательно реагирующие на положение стимула относительно точки фиксации.

Изложенное выше позволяет нам сделать вывод о том, что существуют как минимум три класса клеток, обрабатывающих бинокулярную информацию о глуби-

не: клетки, избирательно «настроенные» на плоскость фиксации и ФЗП, клетки стимулируемые раздражителями, лежащими перед плоскостью фиксации, и тор-мозимые раздражителями, находящимися за ней, и клетки, активируемые стиму-лами, лежащими за плоскостью фиксации, и тормозимые раздражителями, находящимися перед ней (см. также Poggio, 1995).

Некоторые результаты изучения психофизики мозга человека подтверждают факт существования детекторов диспарантности, реагирующих только на стиму-лы, расположенные на определенном расстоянии от точки фиксации взгляда (Richards, 1970; 1971; Richards & Regan, 1973; см. также Blake & Cormick, 1979; Cormick et al., 1993). Люди, страдающие стереослепотой, не способны воспринять глубину объекта только с помощью стереоскопического признака или бинокулярной дис-парантности (хотя они и воспринимают глубину с помощью других признаков). О некоторых людях можно сказать, что они страдают частичной стереослепотой: они не способны использовать стереоскопические признаки для локализации объ-екта, лежащего за или перед плоскостью фиксации взгляда. Подобные наблюдения согласуются с представлением о существовании трех классов детекторов диспарантности: первого — для объектов, лежащих на линии фиксации и имеющих нулевую диспарантность, а также для объектов, лежащих внутри ФЗП, второго — для объектов, лежащих за линий фиксации, и третьего — для объектов, лежащих перед ней. Следовательно, исходя из представленных в данном подразделе результатов физиологических исследований можно сказать, что стереослепота (или частичная стоя реослепота) человека является результатом нарушения нормального соотношения между детекторами диспарантности всех трех классов.

Взаимодействие пространственных признаков

Использование и происхождение некоторых моно- и бинокулярных признаков глубины и удаленности, как правило, характерных для большого количества стимулов, содержащихся во внешней среде, ставит перед нами несколько вопросов. Какие признаки наиболее важны? Насколько эффективно монокулярное восприятие глубины?. Является ли восприятие пространства результатом постепенного научения в ходе контактов с окружающей действительностью или оно — данность, цроявление врожденных перцептивных навыков, ответ на непосредственную сти-муляцию сетчатки, не требующий от наблюдателя никакой обработки информации? Мы обсудим эти вопросы в последних подразделах данной главы, но они *бу*-дут фигурировать и в следующих двух главах. Однако вначале мы расскажем о двух точках зрения — конструктивистской и экологической (см. главу 1) — на природу и источник зрительной информации, доступной наблюдателю и используемой им для восприятия глубины и расстояния.

Конструктивистский подход к пространственным признакам

По мнению конструктивистов, наблюдатель играет активную роль в комбинировании, оценке и интерпретации пространственной информации, которую он получа-ет от разных пространственных признаков. Иными словами, для того чтобы вос-приятие «состоялось», наблюдатель должен обработать информацию, полученную

ГЛАВА 8

Восприятие движения

В предыдущих главах мы говорили преимущественно о восприятии неподвижного предмета находящимся в покое наблюдателем. Однако восприятие неподвижного объекта, спроецированного на зафиксированную сетчатку находящегося в покое наблюдателя, — крайне редкое явление. Большинство организмов относительно подвижны и перемещаются в мире, наполненном разнообразными перемещающимися объектами: источниками удовлетворения их физиологических потребностей, которые нужно преследовать, либо источниками опасности — хищниками или движущимися препятствиями, — встреч с которыми следует избегать.

Биологическая роль восприятия движения чрезвычайно велика. Чтобы их движения были эффективными, животные должны быть в состоянии определять, где именно, в каком направлении, а нередко — и с какой скоростью перемещаются те или иные объекты. Не вызывает сомнения, что информация о движении имеет решающее значение для выживания большинства биологических видов, и вполне вероятно, что в ходе эволюционного развития именно к формированию способности воспринимать движение окружающая среда предъявляла более жесткие требования, чем к формированию любого другого аспекта зрительного восприятия. Говоря об этом, Грегори высказывает предположение об эволюционном приоритете восприятия движения над восприятием формы (Gregory, 1977, p. 93):

В строении сетчатки человеческого глаза сохранились некоторые особенности эволюционного развития зрительной системы, начиная от

глаза, способного воспринимать лишь движение, и кончая глазом, воспринимающим формы. Периферия сетчатки чувствительна только к движению. Вы сами можете убедиться в этом, попросив кого-нибудь помахать каким-либо предметом в области периферии вашего поля зрения таким образом, чтобы стимулировать только края сетчатки. Вы увидите, что воспринимаете только движение и его направление, но не можете определить, какой предмет движется. Если прекращается движение, объект становится невидимым. Это очень близко к тому, что наблюдается при примитивном восприятии (этот эксперимент — максимальное приближение к примитивному восприятию, которое нам доступно). Самые удаленные от центральной ямки края сетчатки еще более примитивны: при их стимуляции движением мы вообще ничего не ощущаем, но при этом возникает рефлекс поворота глаз, благодаря которому объект оказывается в центре поля зрения, и к его идентификации подключается высокоорганизованная центральная

ямка и связанные с нею нейроны более высоких уровней зрительной системы. Следовательно, периферия сетчатки — это инструмент раннего предупреждения, вызывающий такой поворот глаз, в результате которого высокоразвитая объекторазличи-тельная часть зрительной системы нацеливается на объект и определяет, полезен он, вреден или нейтрален.

В этой главе мы опишем механизмы и процессы, на которых основано восприятие движения. Мы рассмотрим как физиологические, так и поведенческие механизмы восприятия движения, обратив особое внимание на некоторые явления, связанные с движением, в том числе на паттерны оптического движения и биологическое движение. Мы опишем и такие аномалии восприятия движения, как кинетический эффект глубины, индуцированное движение и стереоэффект Пульфри-ха, а также некоторые примеры кажущегося, или иллюзорного, движения, включая стробоскопическое движение, «движущиеся картины» (кинематограф), автокинетическое движение и эффект последействия движения. Завершит главу краткое описание прогнозирования траекторий движения. Начнем же мы с описания нейронных структур, обеспечивающих восприятие движения.

Детекторы движения

С эволюционной точки зрения восприятие движения представляет собой базовый аспект зрения, имеющий принципиальное значение для выживания видов. В естественных условиях движение объекта может быть сигналом опасности, от которой нужно как можно быстрее скрыться, либо свидетельством появления пищи или особи противоположного пола. Большинство животных, в том числе и все позвоночные, обладают способностью воспринимать движение, причем в основе восприятия движения многими видами лежат сложные нейронные процессы (Groh, 2000; Treue et al, 2000; Movshon & Newsome, 1992; Rind & Simmons, 1999). Более того, установлено, что нейронные механизмы, специализирующиеся на анализе движения, формируются в очень раннем возрасте. Так, ребенок способен следить за движущимся предметом вскоре после появления на свет (Nanez, 1988).

В предыдущих главах мы уже упоминали рецепторы, чувствительные к движению. В главе 3 сказано о специфической реакции на движущийся стимул ганглиозных М-клеток сетчатки (Yang & Masland, 1992). Мы также описали и роль магноцеллюлярного слоя латерального коленчатого тела (ЛКТ) в обработке информации о движущемся предмете. Дополнительные доказательства существования нейронов, специализирующихся на восприятии движения, получены и при изучении коры головного мозга (затылочной доли) (Dupont et al., 1994). Как отмечалось в главе 3 при обсуждении вопроса о рецептивных полях нейронов, существуют клетки, которые реагируют не просто на движение, но на движение в определенном направлении. Более того, слой *МТ* затылочной доли коры головного мозга (или слой V5) получает нейронный импульс от реагирующих на движение клеток зрительной коры (Movshon & Newsome, 1992; Rosenzweig et al.,1999). В то время как рецептивные поля чувствительных к движению клеток зрительной коры относительно малы, избирательны и реагируют только на локальное перемещение,

многие нейроны МГвоспринимают движение, совершаемое на больших по площади участках поля зрения. Однако, как и иннервирующие их чувствительные к движению клетки зрительной коры, многие нейроны демонстрируют ярко выраженную избирательность по отношению к направлению движения. Существует точка зрения, согласно которой нейроны *МТ* интегрируют информацию о различных формах движения, выступая в роли основных его детекторов. (Albright, 1992; Loge-thetis & Schall, 1989; Salzman & Newsome, 1994).

Хотя нейронные процессы, лежащие в основе восприятия движения человеком, и распределены по многим участкам мозга, основную роль в них играют нейроны слоя *МТ.* Это подтверждается результатами клинического обследования женщины, у которой после перенесенного инсульта была повреждена зона *МТ* коры головного мозга (Zihl et al., 1983). Результатом этих повреждений явилась некая форма *агнозии движения,* называемая акинетопсией (что в дословном переводе с греческого означает «взгляд, плохо видящий движение»). Несмотря на то что зрение пациентки сохранило все свои функции, включая остроту и бинокулярность (т. е. интерактивное использование обоих глаз), а также восприятие формы и цвета, она утратила способность воспринимать большую часть движений, совершаемых как на плоскости, так и в пространстве, и только фиксировала конечный результат движения — сам факт перемещения предметов с одного места на другое. Клинические обследования показали, что хотя больная частично и воспринимала как движение вверх-вниз, так и движение взад-вперед, ее возможности ограничивались маленьким участком поля зрения. Кроме того, она совершенно не воспринимала движений в глубину. «Ей было трудно наливать чай или кофе в чашку, потому что она не видела подъема жидкости, казавшейся ей застывшей, замороженной. Более того, она не могла вовремя остановиться, поскольку не воспринимала изменения уровня жидкости в чашке или в кастрюле» (p. 315). Больная также жаловалась на то, что ей трудно следить за беседой, поскольку она не видит мимики собеседника, и прежде всего — движений его губ. Если вместе с ней в комнате оказывалось одновременно более двух человек, ей становилось не по себе и она сразу же уходила, ибо, как она сама говорила: « Я не видела, как люди переходили с места на место. Только что они были здесь, а в следующий момент — уже там» (p. 315). Особенно неуютно пациентка чувствовала себя в толпе, среди двигающихся людей и предметов, например на улице, и по возможности старалась избегать подобных ситуаций. Она не могла переходить улицу, потому что была не в состоянии оценить скорость приближающихся машин, хотя без труда различала их: «При первом взгляде на машину мне кажется, что она очень далеко. Но стоит мне начать переходить улицу, как она оказывается рядом» (p. 315). Со временем, однако, она научилась справляться со своим недугом и компенсировать неспособность воспринимать движение. Так, она научилась оценивать приближение машин по возрастающему шуму. Невозможность воспринимать движение носила очень специфический характер и касалась только ее зрительной системы. У пациентки сохранилась способность тактильного восприятия движения (т. е. она без труда реагировала на раздражитель, перемещающийся по поверхности ее кожи) и способность реагировать на звук как признак движения (т. е. на движущийся источник звука).

Системы глаза, обеспечивающие восприятие движения

Казалось бы, что наиболее общий способ вызвать восприятия движения — последовательная стимуляция ряда соседних сетчаточных элементов. Однако таким образом нельзя вызвать восприятие всех форм движения. Движения объекта воспринимаются только в том случае, если его образ на сетчатке относительно неподвижен, т. е. тогда, когда глаза совершают следящие движения. При этом движения глаз совпадают с движением объекта, вследствие чего ретинальное изображение более или менее неподвижно. По мнению Грегори, существуют две взаимосвязанные ситемы восприятия движения: «изображение—сетчатка» и «глаз—голова» (рис. 8.1).

Система, обеспечивающая восприятие движения «изображение—сетчатка»

Для системы «изображение—сетчатка» эффективный способ вызывать восприятие движения — последовательная стимуляция примыкающих друг к другу сетчаточных рецепторов. Если глаз относительно неподвижен, как, например, во время фиксации взгляда, по сетчатке «пробегает» ряд изображений, вызванных движу-

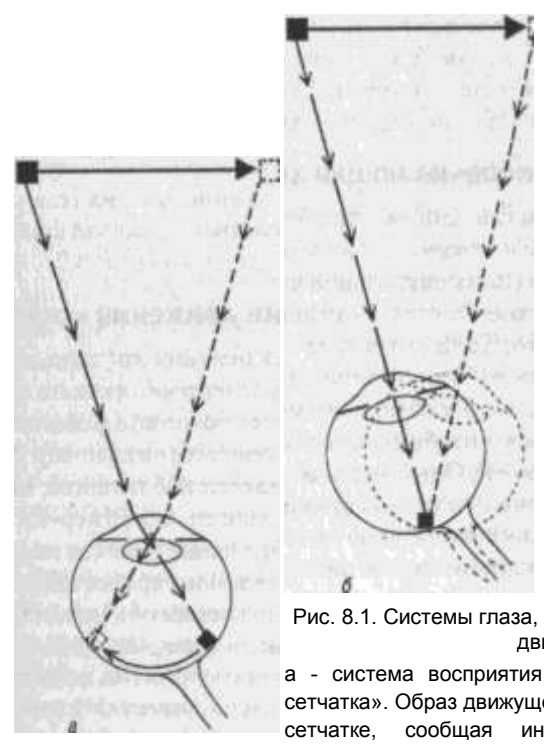


Рис. 8.1. Системы глаза, обеспечивающие восприятие движения

а - система восприятия движения «изображение-сетчатка». Образ движущегося объекта пробегает по сетчатке, сообщая информацию о движении неподвижному глазу, *б* - система восприятия движения «глаз-голова». За перемещающимся объектом наблюдает глаз, совершающий следящие движения, вследствие чего образ на сетчатке относительно неподвижен, однако это не мешает восприятию движения объекта. Изображения, перемещающиеся по сетчатке, воспринимаются как стационарные фоновые стимулы, а изображения, остающиеся неподвижными во время движения глаз, - как движущиеся объекты. (*Источник.* Gregory, 1973)

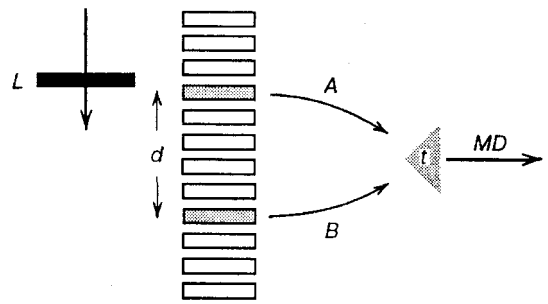


Рис. 8.2. Нейронная модель детектора движения

Два сетчаточных рецептора *A* и *B*, расположенные на расстоянии d друг от друга, связаны с детектором движения *MD*. Детектор движения реагирует в том случае, если свет *L* сначала воздействует на рецептор Д а затем сразу же или через какой-то определенный промежуток времени *t* - на рецептор *B*. (*Источник.* J. F. Schouten. Subjective stroboscopy and a model of visual movement detectors. В кн.: W. Wathen-Dunn(Ed.). *Modes for the perception of visual form.* Cambridge, Mass.: MIT Press, 1967)

щимся стимулом. Регистрируемое таким образом движение — результат последовательной активности рецепторов сетчатки, через которые «пробегает» образ предмета. Подобная система детектирования движения хорошо согласуется с мозаикой омматидиев, характерной для сложного глаза членистоногих (см. рис. 3.4 в главе 3). Нейронная модель детектора движения, соответствующая системе восприятия движений «изображение-сетчатка», представлена на рис. 8.2.

Система, обеспечивающая восприятие движения «глаз—голова»

Когда мы следим глазами за движущимся объектом (как правило, наши глаза совершают при этом следящие движения), изображение объекта на определенном участке сетчатки (или центральной ямки) остается более или менее неподвижным. В этом случае движение глаз компенсирует движение объекта, но это не мешает нам воспринимать его. Если объект, за которым ведется наблюдение, передвигается на фоне неподвижной текстурированной поверхности, например если речь идет о наблюдении за катящимся по полу мячом, изображение объекта на сетчатке остается неподвижным, а изображение текстурированной поверхности будет скользить («пробегать») по ней. Однако для восприятия движения объекта восприятие стимуляции поверхностью не обязательно. Например, движение светящейся точки в темной комнате дает достаточно информации для восприятия движения, хотя в то время, когда мы следим за ней, нет никакой стимуляции сетчатки фоном.

Сейчас вполне уместно задать следующий вопрос: каким образом объект может быть воспринят как находящийся в движении, если его изображение на сетчатке более или менее неподвижно? Чтобы ответить на этот вопрос, нужно хотя бы вкратце рассказать о том, как зрительная система управляет движениями глаз. Когда глаза следят за движущимся объектом, мозг посылает им нейронные сигналы, называемые **эфферентными сигналами,** благодаря которым глаза в глазницах двигаются именно так, как надо в данный момент. Эти нейронные сигналы — команды глазным мышцам — поступают непосредственно как ответ на движение объекта

и только тогда, когда глаза совершают *произвольные* движения. (В данном контексте *активными,* или *произвольными,* называются не только сравнительно редкие, непосредственно контролируемые и осознанные движения глаз, которые мы совершаем, например, если сознательно переводим взгляд справа налево. Этим термином мы также обозначаем и те обычные движения глаз, и прежде всего следящие движения, которые были описаны в главе 4, т. е. те движения, которые совершаются автоматически и бессознательно и регистрируются зрительной системой, когда мы читаем, следим за движущимся объектом или просто смотрим по сторонам.) Ниже мы обсудим роль этих активных, произвольных, эфферентных сигналов в восприятии движения.

Теория упреждения сигнала. Одним из наиболее распространенных зрительных событий является сканирование окружающей обстановки и восприятие ее как стационарной. Например, читая текст на этой странице и переводя взгляд слева направо и сверху вниз, вы стимулируете этим свои сетчатки, однако **и** страница, **и** текст остаются неподвижными. Каким бы простым и обыденным ни казалось это явление, оно тоже заставляет нас обратиться все к тому же принципиальному вопросу: почему, несмотря на движения глаз, то, что находится в поле нашего зрения, остается неподвижным? Когда наши глаза совершают активные движения, пусть даже и незначительные, по сетчатке проносится поток образов окружающих нас предметов, при этом стимулируется ряд рецепторов сетчатки, и в соответствии с тем, что было сказано о системе восприятия движения «изображение—сетчатка», мы должны были бы воспринимать движение. Однако этого не происходит. Для объяснения этого явления в рамках **теории упреждения сигнала** была высказана мысль о наличии гипотетического нейронного механизма, который учитывает командные сигналы, автоматически приводящие глаза в движение, и сравнивает их с результирующими изменениями изображения на сетчатке, вызванными движениями глаз. Так, когда глаза совершают активные движения, эфферентные двигательные сигналы, посылаемые мозгом глазным мышцам и приводящие глаза в движение, нейтрализуются, отменяются или подавляются (компенсируются) результирующим потоком образов, вызываемых этими самопроизвольными движениями глаз.

Более конкретно суть теории упреждения сигнала может быть изложена следующим образом: когда мозг посылает глазным мышцам моторную команду, он одновременно посылает в гипотетический **центральный блок сравнения сигналов и** связанный с этой командой **упреждающий сигнал** (также называемый утечкой **сигнала)** (рис. 8.3).

Полагают, что функции центрального блока сравнения сигналов, хотя бы частично, исполняет *мозжечок,* сложная подкорковая структура, играющая принципиальную роль в поддержании равновесия тела и координации движений (Blake-more et al, 1998;

Middleton & Stricr, 1998; Miles & Fuller, 1975). Следовательно, сигналы, приводящие в движение глаза, регистрируются сетчаткой. Эта вводная информация о движении, или **афферентные сигналы,** зарегистрированные сетчаткой, поступают в центральный блок сравнения сигналов, где сравниваются с Упреждающими сигналами, пришедшими в центральный блок сравнения из мозга (Matin, 1986).

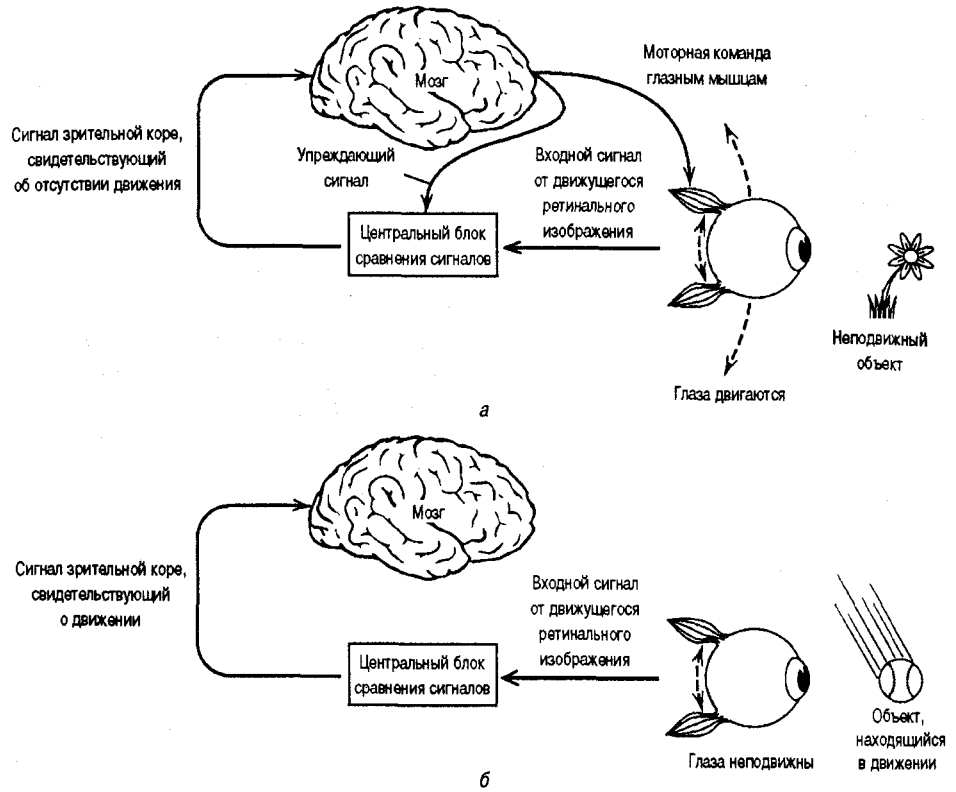


Рис. 8.3. Схематическое изображение центрального блока сравнения сигналов и упреждающий сигнал

для двух условий

а - окружающие предметы неподвижны, и имели место произвольные движения глаз. Когда мозг посылает глазам команду двигаться, он одновременно посылает центральному блоку сравнения сигналов упреждающий сигнал. Произвольные движения глаз вызывают движение соответствующего сетчаточного изображения, что тоже создает сигнал, поступающий в центральный блок сравнения сигналов. Происходит сравнение упреждающего и входного сигналов, создаваемых движением сетчаточного образа. Если они оба свидетельствуют о движении, как показано на а, они взаимно уничтожаются и никакого восприятия движения нет (см. табл. 8.1, п. 2). *б*- глаза неподвижны, а объект перемещается. Как и при условиях, описанных в а, сигнал от движущегося ретинального изображения поступает в центральный блок сравнения сигналов. Однако поскольку произвольные движения глаз отсутствуют, в центральный блок сравнения не поступает упреждающий сигнал и сигнал к движению сетчаточного образа *не отменяется,* как это было при условиях, описанных в а. Результатом является восприятие движе-ния(см. табл. 8.1, п. 1)

На рис. 8.3 схематически представлена роль центрального блока сравнения в двух ситуациях: 1) когда глаза совершают произвольные движения, а объект наблюдения неподвижен и 2) когда глаза неподвижны, а объект наблюдения перемещается. Если входящие сигналы согласуются с упреждающим сигналом или соответствуют ему (т. е. если оба сигнала указывают на присутствие движения, как показано на рис. 8. 3, *а),* движения глаз вызывают перцептивную *отмену,* или подавление, перемещения сетчаточного образа. Вследствие этого окружающая обстановка и воспринимается как стационарная, несмотря на изменения в ретинальном изображении, вызванные его перемещением. Следовательно, если изменения в сетчаточном образе произвольны, т. е. являются *исключительно* результатом активных движений глаз, а не результатом движения объекта или всего того, что находится в поле зрения, последующий сетчаточный входящий сигнал соответствует упреждающему сигналу и зрительная система компенсирует (подавляет) или отменяет эти изменения. Перцептивным результатом такой ситуации является восприятие визуального объекта как *неподвижного.* Подобные изменения в сетчатке происходят и при беглом осмотре объектов, находящихся в поле зрения (сканировании) неподвижных предметов, находящихся в поле зрения.

Напротив, если движение образа на сетчатке, отражением которого является сигнал, входящий в центральный блок сравнения, не соответствует упреждающему сигналу, движение *воспринимается.* Следовательно, когда глаза неподвижны и перемещаются только объекты, находящиеся в поле зрения (рис. 8.3, *б),* упреждающий сигнал, способный отменить результирующее движение, отраженное во входном сигнале, не возникает и движение воспринимается. Это типичные условия функционирования нашего зрения, в которых «работает» система восприятия движения «изображение-сетчатка». Следовательно, благодаря стимуляции системы восприятия движения «изображение-сетчатка», наша зрительная система способна отличить движение ретинального изображения, вызванное одними лишь активными, произвольными движениями глаз, от его движения, причиной которого является реальное перемещение различных объектов.

Теперь мы готовы обсудить тот самый вопрос, с которого начали, а именно способность воспринимать движение объекта при слежении за ним даже тогда, когда его ретинальное изображение остается неподвижным. В данном случае произвольные следящие движения глаз создают упреждающие сигналы, не соответствующие входным афферентным сигналам. Вместо того чтобы генерировать входные сигналы, свидетельствующие о перемещении сетчаточного образа, образ физически перемещающегося объекта стабилизируется на сетчатке. Поскольку стимуляция сетчатки не отменяется и не компенсируется упреждающими сигналами, объект воспринимается как движущийся. Следовательно, когда мы следим за перемещающимся объектом, его образ остается зафиксированным на сетчатке: упреждающий сигнал *не вызывает* его перцептивной отмены. Именно поэтому мы и воспринимаем движение. С другой стороны, входные сигналы, являющиеся следствием стимуляции сетчатки фоном объекта, отменяются и фон воспринимается как неподвижный (рис. 8.3, *а).* Короче говоря, когда глаза совершают активные следящие Движения, поле зрения неподвижного фона объекта стабильно, и воспринимается только перемещение физически движущихся объектов.

Из этого анализа системы восприятия движения «глаз—голова» следует, что когда движения глаз *непроизвольны* — а это значит, что отсутствуют упреждающие сигналы, — стимуляция сетчатки перемещающимися по ней изображениями не может быть компенсирована и движение объектов или всего того, что находится в поле зрения, будет восприниматься. Это подтверждается и наблюдением, которое приписывается Герману фон Гельмгольцу и суть которого заключается в том, что когда глазное яблоко приводится в движение искусственно, *пассивно,* т. е. когда

стимулируется *только* система восприятия движения «изображение-сетчатка» создается превратное впечатление, что все, попадающее в поле зрения, находится в движении.

Экспериментальное подтверждение

Пассивное движение глазного яблока

Вы и сами без труда можете убедиться в этом. Закройте один глаз и осторожно проведите пальцем по нижнему веку открытого глаза справа налево или сверху вниз. Вам покажется, что все, что вы видите, перемещается в направлении, противоположном направлению движения глаза. Когда вы прикасаетесь к глазному яблоку, глаз начинает двигаться, что, в свою очередь, вызывает перемещение по сетчатке образа воспринимаемого вами стимула. Однако поскольку движение глаза - *пассивное* движение (т. е. оно вызвано не командой мозга глазным мышцам, а вашим пальцем), оно стимулирует только систему восприятия движения «изображение-сетчатка». Вследствие этого не возникает никакого упреждающего сигнала, способного отменить перемещение изображения по сетчатке, и вы воспринимаете сцену в движении. Эту же мысль можно выразить и по-другому: поскольку отсутствуют какие-либо доказательства того, что перемещение образа по сетчатке является результатом движений глаза, мозг решает, что оно вызвано перемещением самих визуальных объектов. В результате вам кажется, что они перемещаются, ибо глаз совершает пассивные движения и отсутствуют как произвольные импульсы, активно направляющие движения глаз, так и сопровождающие их упреждающие сигналы (Bridgeman & Delgardo, 1984). Вывод, который может быть сделан из вышесказанного, заключается в следующем: при наблюдении за стационарными объектами пассивные движения глазного яблока стимулируют систему восприятия движения «изображение-сетчатка» *без* соответствующих упреждающих сигналов, в результате чего и создается впечатление движения.

Дополнительные доказательства роли упреждающих сигналов в восприятии движения получены выдающимся физиком Эрнстом Махом, который провел эксперимент, противоположный эксперименту Гельмгольца (Gregory, 1973). Он не пользовался приемами, искусственно вызывающими движения глаз, а напротив, фиксировал их мастикой так, чтобы они не могли двигаться. Когда же он все-таки попробовал привести их в движение, оказалось, что визуальная сцена движется в том же направлении, в котором пытались двигаться глаза. В условиях этого эксперимента *возникали* и самопроизвольные сигналы-команды глазным мышцам, и упреждающие сигнала, но поскольку глаза были зафиксированы, они не сопровождались никакими афферентными сигналами (т. е. движением изображения по сетчатке). Иными словами, одни лишь упреждающие сигналы без сравнимых с ними афферентных сигналов движения создают такое впечатление, что поле зрения перемещается в том же направлении, в каком пытаются, но не могут двигаться глаза. (Результаты более поздних экспериментальных исследований роли самопроизвольных движений глаз и упреждающих сигналов в восприятии движения при иммобилизации глаз описаны в Stevens et al, 1976; Matin et al., 1982.)

И последнее. Поразительные результаты получены в ходе клинического обследования человека, у которого при активных движениях глаз не возникали упреж-дающие сигналы (Haarmeler et al., 1997). Нейрологическое обследование с привлечением МРТ выявило патологию того участка первичной зрительной коры, кото-

рый, должно быть, имеет критически важное значение для обработки информации о движении, сообщаемой активными движениями глаз. Без упреждающих сигналов пациент не мог компенсировать самопроизвольные движения глаз, и поэтому каждый раз, когда он смотрел на неподвижные предметы, ему казалось, что они двигаются со скоростью, соответствующей скорости движения его глаз.

В табл. 8.1 обобщены некоторые описанные выше результаты влияния движения объекта и изображения на сетчатке для случаев, когда присутствуют и отсутствуют самопроизвольные движения глаз (и упреждающие сигналы).

Таблица 8.1

Влияние движения объекта, изменений сетчаточного изображения и произвольных движений глаз на восприятие движения

Система восприятия движения	Типичная активность	Активность объекта (или окружающей обстановки)	Образ на сетчатке	Произвольные движения глаз и упреждающие сигналы	Восприятие
«Изображение—сетчатка»	Фиксация	Движение	Изменяется	Нет	Движение
«Глаз—голова»	Сканирование	Неподвижен	Изменяется	Да	Отсутствие движения
«Глаз—голова»	Слежение	Движение	Не изменяется	Да	Движение

Рассмотрим первую ситуацию, при которой активна только система «изображение—сетчатка». Объект перемещается в поле зрения, его образ на сетчатке изменяется, но глаза неподвижны. Упреждающих сигналов, способных отменить (компенсировать) изменения, происходящие на сетчатке, нет, и движение воспринимается. Подобное возможно в том случае, когда ваш взгляд зафиксирован на неподвижном объекте, а в поле вашего зрения возникает другой,

движущийся объект. Во второй ситуации активна система «глаз—голова». Глаза сканируют неподвижную сцену, вызывая изменения сетчаточного образа. Однако, поскольку движения глаз самопроизвольны, результирующие упреждающие сигналы отменяют в центральном блоке сравнения сигналов сигналы об изменениях, происходящих на сетчатке, и движение не воспринимается. Именно это и происходит, когда вы просто смотрите на неподвижные предметы вокруг себя. Третья ситуация тоже описывает активную систему «глаз—голова». Объект перемещается на фоне другого, неподвижного объекта, а глаза наблюдателя совершают следящие движения. Изображение объек-а на сетчатке зафиксировано. В результате, поскольку движения глаз самопроизвольны, упреждающие сигналы отменяют изменения в ретинальном изображении, вызванные стимуляцией фоном, который поэтому и воспринимается как неподвижный. Однако поскольку эти сигналы не компенсируют сигналов от неподвижного ретинального изображения объекта, за которым следят глаза, последний и воспринимается как движущийся. Подобное происходит тогда, когда ваши глаза следят за перемещающимся объектом.

Когда мы поворачиваем голову, шею или поворачиваемся всем корпусом и эти Движения совершаются независимо от движений глаз, нам не кажется, что вокруг

много двигающихся объектов. Общий механизм, лежащий в основе системы вос-приятия движения «глаз—голова», не просто следит за движениями глаз, но и управ-ляет общей ориентацией индивидуума (Blakemore et al., 1999). А это значит, что центральная нервная система таким образом учитывает взаимодействие визуали-ной информации и информации о положении тела в пространстве, что, совершая активные движения, мы, несмотря на вызванные ими изменения сетчаточного изображения, *преимущественно* воспринимаем окружающий мир как относительно стабильный. Так, произвольные, активные сигналы-команды, которые мы подаем глазодвигательным мышцам, когда ходим, бежим трусцой, бегаем, прыгаем, про-сто встаем со стула или поднимаемся по лестнице, объединяются с результиру-ющими изображениями через сетчатку и отменяются вместе с этим движением. Следовательно, благодаря упреждающим сигналам, генерируемым во время наших активных движений, мы обычно воспринимаем окружающий нас мир как относи-тельно стабильный. Функциональное преимущество подобного механизма, обес-печивающего осмысленное взаимодействие динамичного организма с динамичной средой, очевидно.

Оптическая стимуляция как источник восприятия движения

В окружающем нас мире предметы перемещаются по-разному, в разных направле-ниях и с разными скоростями. В довершении к этому, по мере того как перемещается сам наблюдатель, постоянно изменяется и местоположение точки, с которой он видит то, что его окружает. Все эти динамичные события вызывают соответствующие изменения освещенности ретинального изображения. Следовательно, восприятие движения вычленяется из сложного паттерна изменяющихся стимуляций, отраженного в сетчаточном образе. О некоторых наиболее информативных ситуациях, создаваемых этими переменами, будет рассказано ниже.

Паттерны оптического потока

Когда индивидуум перемещается в окружающем его мире, изображение на сетчатке изменяется в соответствии с физическими характеристиками движения. Иными словами, по мере того как наблюдатель перемещается, непрерывно изменяется оптическая проекция большинства поверхностей (т. е. полов, стен, потолков, дорог и полей). Паттерн изменений, создаваемый движением наблюдателя, называется паттерном оптического потока.

Как следует из рис. 8.4, когда наблюдатель приближается к поверхности, расположенной прямо перед ним, сфокусировав взгляд на точке *F,* ему начинает казаться, что контуры радиально расступаются, расходятся от фокальной точки, ом ступая все дальше и дальше на край поля зрения, создавая радиальный паттерн оптического потока. Фокальная точка паттерна потока, созданного движением наблюдателя к ней, называется *фокусом экспансии* и соответствует направлению движения наблюдателя.

Векторы на рисунке обозначают изменение оптических паттернов конфигурации, создаваемое продвижением наблюдателя вперед в трехмерном пространстве

ни обработки сложной визуальной информации, ни какой бы то ни было специальной подготовки. Участники экспериментов идентифицировали аспекты знакомых движений даже тогда, когда мелкие сегменты, содержащие последовательные элементы биологического движения, предъявлялись им всего на 100 мс (т. е. на 1/io с) (Johansson, von Hofsten & Jansson, 1980). Дополнительная информация о влиянии пространства и времени на восприятие биологического движения представлена в Neri et al., 1998.

Легкость, с которой биологическое движение вычленяется из динамических конфигураций светящихся точек и интерпретируется, возможно, отчасти связана с нейронной активностью соответствующих отделов коры головного мозга. Доказано, что в восприятии биологического движения участвуют специфические участки коры. С помощью ПЭТ было доказано, что когда взрослые люди наблюдают за комбинациями светящихся точек, отражающих танцевальные движения или движения человека, берущего в руку чашу и подносящего ее ко рту, некоторые виды движений вызывали повышенную нейронную активность определенных участков коры, и в первую очередь — теменной доли (Bonda et al., 1996).

Завершая этот подраздел, можно сказать, что различные проявления моторной активности, присущей человеку как биологическому виду, даже представленные только комбинациями движущихся светящихся точек, расположение которых соответствует основным суставам, легко воспринимаются и достаточно информативны для того, чтобы вызвать сильные, четкие впечатления о сложном характере движения.

Искажения восприятия движения

Причиной искаженного восприятия физического движения, присущего многим динамическим событиям, является либо неверное восприятие двигательной активности, либо ее ошибочное толкование. Более того, кажущееся движение объекта и контекст, в котором это движение совершается, могут влиять на восприятие его формы или очертаний. Ниже будут рассмотрены два явления, иллюстрирующие это влияние движения: *кинетический эффект глубины* и *анортоскопическое восприятие.* Затем мы обсудим *индуцированное движение* и *стереоэффект Пулъфриха,* обратив основное внимание на роль всего пространственного контекста в восприятии движения окружающих нас предметов.

Глубина, создаваемая движением: кинетический эффект глубины

Если несколько двухмерных теней, например таких, как те, что возникают при вращении проволочного куба, спроецировать на просвечивающий экран (рис. 8.6, а*),* возникнет совершенно определенное впечатление, что вращается жесткий объемный предмет. Это явление называется кинетическим эффектом глубины (Wallach & O'Connell, 1953). Неподвижный проволочный куб отбрасывает плоскую, двухмерную тень.

Однако при вращении куба вокруг его вертикальной оси изменяющийся паттерн теней создает впечатление глубины и кажется, что вращается не проволочный,

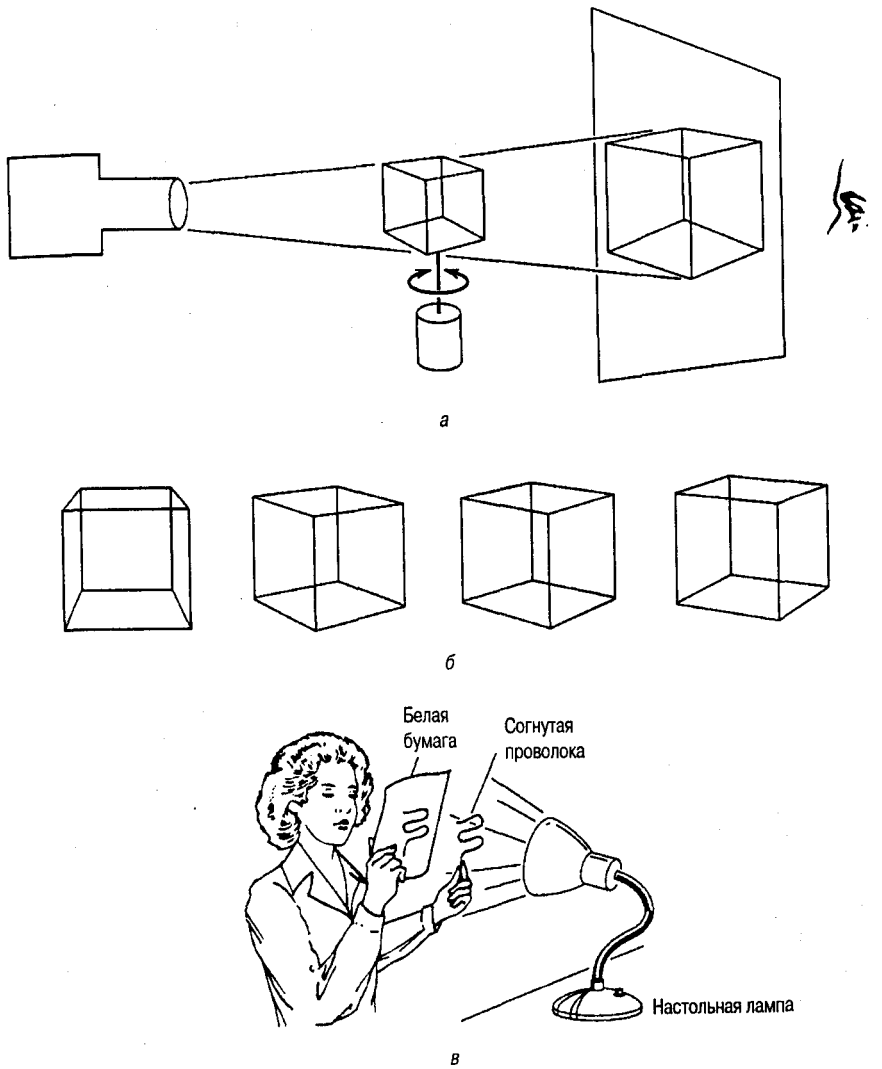


Рис. 8.6. Кинетический эффект глубины

а - установка для демонстрации кинетического эффекта глубины с помощью проволочного куба, *б* - проекции вращающегося проволочного куба. в. Простое приспособление для демонстрации кинетического эффекта глубины с предметом незнакомой формы (описание приводится в тексте)

а Сплошной куб, хотя все его движения проецируются на плоский экран. Это значит, что на сетчатку проецируется такая последовательность зрительных образов, которая стимулирует ее точно так же, как и целостный образ, являющийся результатом вращения действительно объемного, трехмерного, объекта. Пример этих сетчаточных образов представлен на рис. 8.6, *б.* В итоге зрительная система интерпретирует изменения в паттерне теней как изменения, вызываемые вращением

трехмерного объекта, а не как последовательность изменений плоских паттернов которые в действительности проецируются на сетчатку.

Кинетическому эффекту глубины подвержено не только восприятие знакомых форм. Наблюдение за вращением такого незнакомого предмета, как произвольно изогнутая проволока, тоже вызывает кинетический эффект глубины. В качестве стационарного стимула эта проволока воспринимается как плоский предмет, **и** ее форма (объем) не обнаруживается. Однако же когда ее приводят во вращение, используя для наблюдения за тенями варианты тех приспособлений, что представлены на рис. 8.6, *а,* она сразу же начинает восприниматься как целостный объемный предмет. Ниже приводится описание эксперимента, графически представленного на рис. 8.6, *в.*

Экспериментальное подтверждение

Кинетический эффект глубины

Возьмите большую бумажную скрепку (или любой кусок относительно жесткой, но гибкой проволоки, например шток для чистки курительных трубок, кусок электропровода или вешалку для рубашек) и изогните ее так, чтобы получилась трехмерная фигура неправильной формы. Держите ее между листом белой бумаги и настольной лампой так, чтобы тень от проволоки падала на бумагу (см. рис. 8.6, *в).* Чтобы образ проволоки на сетчатке получился достаточно четким, расстояние между изогнутой проволокой и листом бумаги должно быть небольшим. Вращая изогнутую проволоку пальцами, наблюдайте за изменяющимся узором теней. Вращающаяся изогнутая проволока будет восприниматься как динамичная трехмерная фигура. В спокойном состоянии она будет восприниматься как двухмерный предмет неправильной формы.

Кинетический эффект глубины воспринимается пятимесячными младенцами (Schmucker & Proffitt, 1994). Следовательно, как и биологическое движение, кинетический эффект глубины характеризует базовую чувствительность к информации, которую несет в себе движение. Вообще кинетический эффект глубины и оптическое движение объекта иллюстрируют важное положение, заключающееся в том, что восприятие *движения* объекта оказывает существенное влияние на восприятие его структуры или формы (Sperling et al., 1989; Normfh & Lappin, 1992; Kourtzi & Shiffar, 1999).

Паттерн изменений, создаваемых движущимся объектом, даже в том случае, когда визуально он нечеток, может помочь обнаружить сам факт движения. Именно эту мысль подчеркивает в своих работах Бингхэм (Bingham, 1995). В одном из исследований, проведенных им вместе с коллегами, испытуемым предъявляли (с помощью динамических комбинаций нерегулярных светящихся точек) неодушевленные движущиеся целостные предметы определенной формы (методика проведения эксперимента была аналогична методике Йоханссона, описанной в разделе, посвященном биологическому движению). По паттерну активности, выявленному на основании динамических комбинаций светящихся точек, наблюдатели точно идентифицировали такие связанные с движением события, как качающийся маятник, катящийся мяч, поверхность воды, на которой появляется рябь, и опадающие листья (Bingham, Schmidt & Rosenblum, 1995).

Анортоскопическое восприятие

Восприятие движения весьма существенно зависит от условий наблюдения за движущимся объектом. Используя необычные условия наблюдения, Парке доказал, что когда изображение фигуры перемещается горизонтально за экраном таким образом, что в каждый данный момент через стационарную смотровую щель виден лишь его небольшой фрагмент, она все равно воспринимается как единая, целостная фигура (рис. 8.7. и 8.8) (Parks, 1965).

Это необычное явление, открытое в 1862 г. Цельнером (Zollner, 1860), называется **анортоскопическим восприятием,** что в дословном переводе с греческого означает «неправильное восприятие» (история открытия Цельнера кратко изложена в Rock, 1986). Интересно отметить, что в условиях динамического анортоскопического предъявления может быть распознана вся фигура, хотя в каждый данный момент видна только ее узкая полоска. Следовательно, вопреки тому обстоятельству, что одновременно на сетчатке никогда не проецируется вся фигура целиком, зрительная система способна интегрировать, или собрать воедино, ряд последовательных фрагментов, спроецированных на один и тот же участок сетчатки.

Воспринимаемая форма фигуры зависит не только от формы смотровой щели (рис. 8. 8), но и от скорости перемещения фигуры за ней. При сравнительно невысоких скоростях фигура воспринимается слегка вытянутой в длину, при относительно высоких — несколько сплюснутой (Anstis & Atkinson. 1967; Haber & Nathanson, 1968). Кроме того, фигура кажется наклоненной в сторону ее движения.

Анортоскопическое восприятие не только свидетельствует о принципиальной роли движения и фона в восприятии формы объекта, но и о том, что последовательность представленных на сетчатке относительно изолированных друг от друга изображений фрагментов объекта по прошествии какого-то времени может интегрироваться зрительной системой, благодаря чему и становится возможным восприятие всей формы объекта. Хотя детальное объяснение анортоскопического восприятия — дело будущего, уже сегодня ясно, что оно имеет ряд важных перцептивных и когнитивных последствий (подробный анализ этого явления представлен в Rock, 1983, 1986).

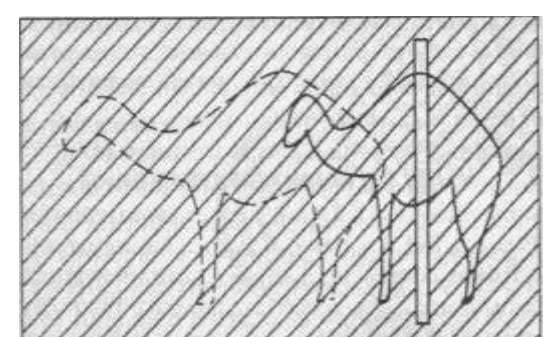


Рис. 8.7. Стимул и схематическое изображение демонстрации эффекта Паркса Слева - стимул, справа - стимул предстает в виде сжатого верблюда. *(Источник,* Т.

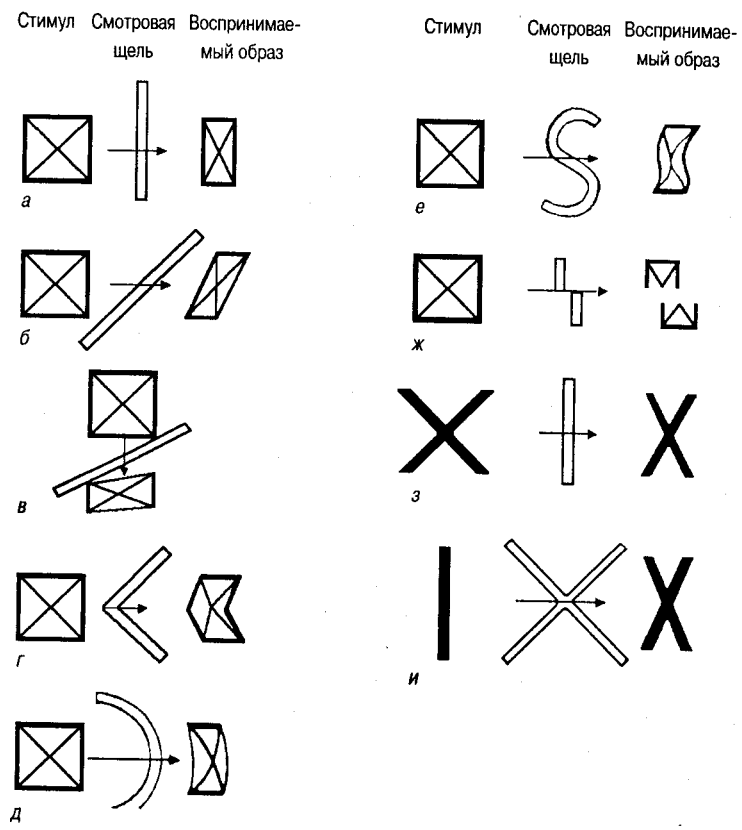


Рис. 8.8. Примеры искаженного восприятия фигур, перемещающихся позади стационарного щелевого отверстия

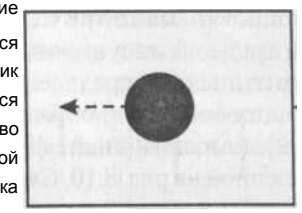
а - воспринимаемая фигура кажется смещенной и сжатой в направлении ее движения, *б-ж*- наклонная и искривленная смотровые щели, а также смотровая щель, образованные двумя прорезями, смещенными относительно друг друга, *е, и* - формы фигуры и смотровой щели могут быть взаимозаменяемыми, Х-образная фигура, рассматриваемая через вертикальную смотровую щель, воспринимается точно так же, как и вертикальная фигура, рассматриваемая через Х-образную смотровую щель. *(Источник.* S. M. Anstis & J. Atkinson. Distortions in moving figures viewed through a stationary slit. *American Journal of Psychology, 80,*1967, p. 573)

Индуцированное движение

Пространственный контекст оказывает весьма заметное влияние на восприятие формы и величины объекта. Нередко динамический контекст таков, что наблюдатель не может точно сказать, какой именно объект находится в движении. Если две освещенные фигуры разного размера находятся в полной темноте и перемещается только та из них, которая больше, как правило, наблюдателю кажется, что она неподвижна, а движется только фигура меньшего размера. Когда речь идет о подобных невыгодных условиях визуального наблюдения, говорят, что движущийся стимул большего размера *индуцирует* движение меньшего по величине стимула.

Рис. 8.9. Индуцированное движение

За светящейся точкой, помещенной в светящийся прямоугольник, наблюдают в темноте. Если прямоугольник физически смещается вправо (сплошная стрелка), создается впечатление, что находящаяся в нем точка смещается влево (пунктирная стрелка). Кажущееся движение неподвижной точки индуцировано физическим движением прямоугольника



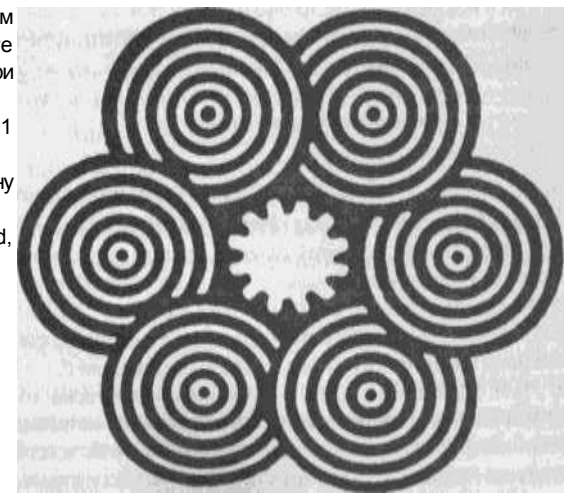
Например, если неподвижную светящуюся точку поместить в находящийся в темноте освещенный прямоугольник и начать медленно перемещать его вправо, то создастся впечатление, что прямоугольник неподвижен, а точка сдвигается вправо. Как показано на рис. 8.9, кажущееся движение точки *индуцировано* физическим перемещением прямоугольника.

Более знакомый пример — луна на фоне покрытого тучами ночного неба. В подобной ситуации всегда создается впечатление, что луна мчится за кажущимися неподвижными тучами, хотя на самом деле все наоборот: тучи проносятся на фоне неподвижной луны и закрывают ее. Это индуцированное движение — визуальное искажение, или иллюзия, в которой присутствует реальное физическое движение, но оно ошибочно приписывается не тому фрагменту конфигурации стимулов, который его совершает, а неподвижному.

Когда есть возможность двоякого толкования признаков фона и рамочных условий, создается впечатление, что вписанный объект меньшего размера перемещается относительно описывающего его объекта большей величины. Возможно, причина этого явления заключается в тех выводах, которые мы автоматически делаем на основании своего предшествующего опыта наблюдений за взаимодействием мелких и крупных объектов в окружающем нас мире. Дело в том, что вокруг нас обычно перемещаются именно небольшие объекты, а крупные предметы вместе с фоном чаще остаются неподвижными.

Рис. 8.10. Индуцированное вращательноедвижение

Держа рисунок на расстоянии, равном примерно '12 дюймам, сфокусируйте взгляд на центральной шестеренке. При перемещении страницы взад-вперед со скоростью, равной примерно 1 перемещению в секунду, вам покажется, что наружные колеса вращаются в одну сторону, а центральная шестеренка - в противоположную. *(Источник.* Le Grand, 1967)



Индуцировать можно не только прямолинейное движение. Дункер в своем классическом труде об индуцированном движении сообщает о том, что вращение неподвижного диска с определенным узором может быть индуцировано вращением окружающих его колец, образованных концентрическими окружностями (Dun-cker, 1929). (Аналогичный эффект можно наблюдать **и** с помощью композиции представленной на рис. 8.10. См. также Anstis & Reinhardt-Rutland, 1976; Day, 1981.)

Стереоэффект Пульфриха

Интересное перцептивное искажение физического движения, известное как **стереоэффект Пульфриха,** возникает в тех случаях, когда оба глаза стимулируются одним и тем же внешним событием, но интенсивность освещения разная. Схематически этот эффект представлен на рис. 8.11.

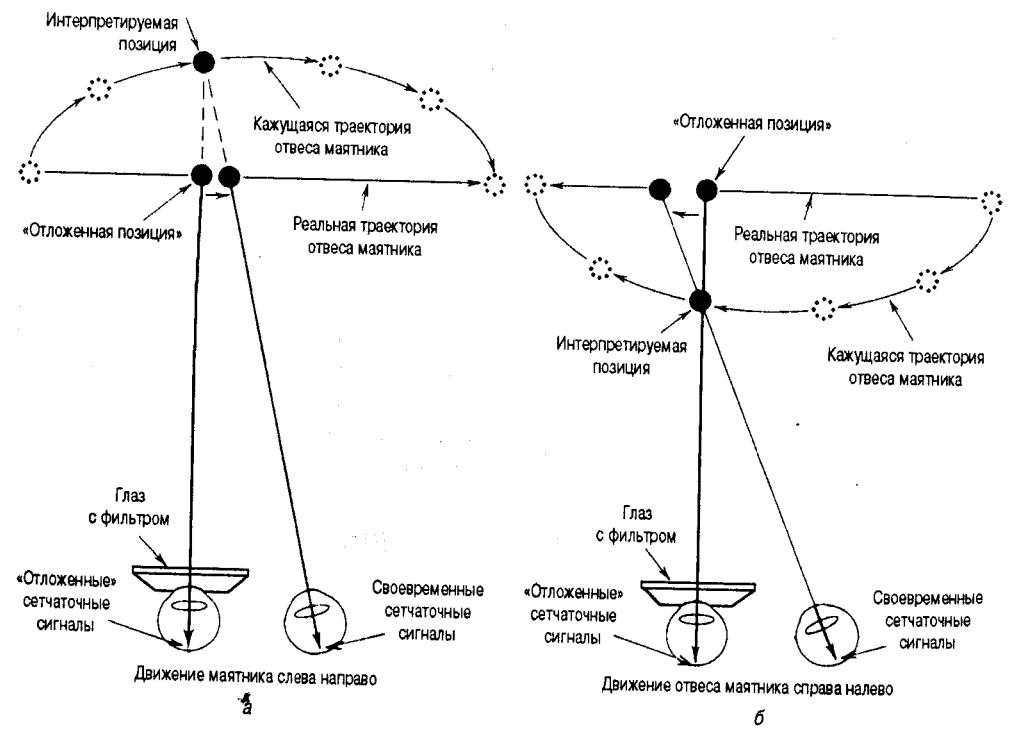


Рис. 8.11. Схематическое изображение стереоэффекта Пульфриха

Когда наблюдатель, один глаз которого прикрыт фильтром, смотрит на маятник, описывающий прямую дугу в плоскости, перпендикулярной линии его взгляда, ему кажется, что маятник описывает эллипс. Причиной этого являются «отложенные сигналы» от того глаза, который прикрыт фильтром. Перцептивный эффект проявляется в кажущемся смещении отвеса маятника в сторону *от* наблюдателя при его движении слева направо, т, е. от участка поля зрения, прикрытого фильтром, к участку без фильтра а и в смещении к наблюдателю, когда отвес маятника смещается в противоположном направлении *б.*

В обоих случаях - и в а , и в б - кажущиеся траектории, созданные сериями интерпретированных позиций отвеса маятника, соответствуют серии визуальных сигналов, которые достигли бы обоих глаз, если бы отвес маятника действительно то удалялся от наблюдателя, то приближался бы к нему, т. е. если бы отвес маятника двигался вглубь

Отвес маятника совершает возвратно-поступательное прямолинейное движение в плоскости, перпендикулярной взгляду наблюдателя. Однако когда наблюдатель смотрит на него обоими глазами, но один из них прикрыт темным фильтром (т. е. когда он в солнечных очках с одним темным стеклом), ему кажется, что отвес маятника движется по эллиптической траектории, то приближаясь к нему, то удаляясь.

По мнению Грегори (Gregory, 1973) и других авторов (Brauner & Lit, 1976; Enright, 1970), причина этого искажения — зависимость времени реакции зрительной системы от интенсивности стимуляции. Фильтр уменьшает количество света, попадающего в один глаз, что, в свою очередь, вызывает незначительную, но существенную с нейронной точки зрения задержку поступления сигнала от глаза в мозг. Следовательно, в любой момент кажущаяся позиция отвеса маятника, воспринимаемая глазом через фильтр, немного отстает от позиции, воспринимаемой глазом без фильтра, в результате чего позиции, в которых оба глаза видят отвес маятника, несколько отличаются друг от друга. Во время движения маятника слегка отличные друг от друга кажущиеся позиции отвеса, возникшие вследствие задержки сигнала от глаза с фильтром, соответствуют картине, созданной такой стимуляцией глаз и мозга, которая была бы, если бы маятник действительно двигался вглубь по эллиптической траектории. Иными словами, зрительная система тщательно сравнивает и «примиряет» несогласованную информацию, полученную мозгом от обоих глаз, тем, что воспринимает реальное движение в искаженном виде: наблюдателю кажется, что отвес маятника движется вглубь по эллиптической траектории.

Ирония заключается в том, что это явление описано и объяснено в 1922 г. немецким физиком Карлом Пульфрихом, которому не довелось испытать его на собственном опыте, ибо он был слеп на один глаз. (Подробное описание методологии изучения стереоэффекта Пульфриха и предполагаемых процессов, лежащих в его основе, читатель может найти в Emerson & Pesta, 1992; Fineman, 1981; Walker, 1978.)

Кажущееся движение

В данном разделе термином **кажущееся движение** обозначается восприятие движения в тех случаях, когда на самом деле никакого физического перемещения объекта в пространстве нет. Иными словами, речь идет об *иллюзии* движения неподвижного объекта. Однако кажущееся движение — это нечто большее, чем редкий перцептивный курьез, наблюдаемый в лабораторных условиях. В действительности кажущееся движение — чрезвычайно распространенное явление. Мы сталкиваемся с ним каждый раз, когда смотрим фильм или телепередачу. В этом разделе мы рассмотрим причины кажущегося движения и начнем с одной из его простейших форм — со *стробоскопического движения.*

Стробоскопическое движение

Ситуация, при которой два стационарных источника света, расположенных на небольшом расстоянии друг от друга, включаются попеременно через определенные Промежутки времени, была изучена одной из первых и представляет собой один Из наиболее убедительных примеров кажущегося движения (рис. 8.12).

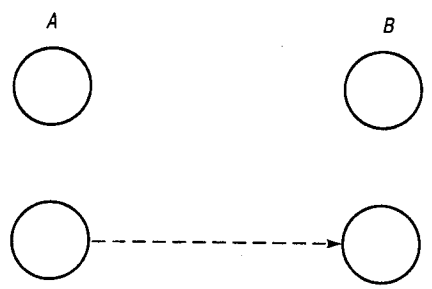


Рис. 8.12. Стробоскопическое движение, создаваемое двумя стационарными источниками света, *A* и *B*, которые включаются попеременно. При определенных интенсивности света, расстоянии между *A* и *B* и времени между их включениями возникает иллюзия, что свет движется от *A* к *B* (нижний рисунок), хотя источники света включаются последовательно

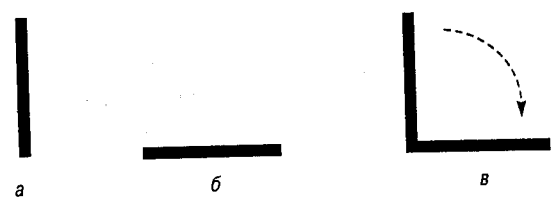


Рис. 8.13. Кажущееся движение на примере двух расположенных рядом неподвижных стимулов Если всматриваться в изображение вертикальной линии а, за которой следует горизонтальная линия б, то примерно через 60 мс покажется, что вертикальная линия сместилась на 90° по часовой стрелке в.

Разумеется, сами картины не двигаются. Речь идет о кинематографе — о проецировании на экран быстро сменяющих друг друга кадров, на которых запечатлены очень незначительно отличающиеся друг от друга сцены. Каждый последующий кадр отличается от предыдущего небольшим изменением положения в пространстве движущегося объекта. Если эта последовательность неподвижных кадров проецируется на экран с надлежащей скоростью (обычно 24 кадра в секунду), возникает ощущение движения. Так же как и в случае стробоскопического движения, характер кажущегося движения, создаваемый движущимися картинами, зависит от скорости проецирования. Если скорость мала, видны только мелькания или — при совсем незначительной скорости — ряд отдельных кадров, если же скорость слишком велика — все кадры сливаются в расплывающееся пятно (история кинематографа, а также технология производства кинокартин и анализ их восприятия кратко описаны в Wead & Lellis, 1981, подробное **и** небезынтересное изложение этой проблемы читатель найдет в Hochberg, 1986).

Как уже было сказано при обсуждении таких явлений, как *эффекты маскировки* и *инерция зрения* (см. главу 4), реакция зрительной системы на визуальную стимуляцию продолжается еще какое-то время **и** после исчезновения вызвавшего ее раздражения. В случае же кинолент, если ряд отдельных кадров демонстрируется с надлежащей скоростью, в нейронах, возбужденных предыдущим кадром, потенциалы действия продолжают возникать и после того, как на экране возник последующий кадр. А это значит, что изображение, запечатленное на каждом кадре, «сливается» с изображениями, запечатленными на предшествующем и следующем кадрах, что и производит впечатление непрерывного движения. Зрительная система интегрирует, или суммирует, ряд последовательных образов, создавая иллюзию непрерывной визуальной сцены или события. Ниже описано экспериментальное подтверждение феномена, называемого *кинетическим затуманиванием* и основанного на эффекте последействия.

Экспериментальное подтверждение

Кинетическое затуманивание

Подержите палец на расстоянии 10-12 дюймов от светящегося серого экрана телевизора или монитора компьютера и понаблюдайте за его непрерывным движением из стороны в сторону. Вы увидите даже немного пугающий поток расплывающихся изображений двигающегося пальца. Этот эффект практически не зависит от освещенности, но наиболее отчетливо он проявляется при низкой освещенности (которая благоприятствует зрительной стойкости).

Хотя *инерционность зрительной системы* (т. е. *эффект последействия)* важна для восприятия плавного, непрерывного движения из последовательно представляемых отдельных изображений, и прежде всего потому, что благодаря ей периоды затемнения между изображениями остаются незамеченными, не менее важен и другой фактор. Плавное объединение кадров достигается за счет близкого сходства их отличительных признаков и общности содержания. Чем теснее они связаны между собой и чем больше структурное сходство соседних кадров, тем выше их «феноменальная идентичность», т. е. тем легче зрительной системе объединить информацию, последовательно получаемую от физически дискретных (не связанных друг с другом) стимулов, таким образом, что мы воспринимаем, как непрерывное движение (Ramachandran et al, 1998).

Когда мы смотрим какой-либо отрывок из кинофильма — например, кадры, на которых изображен бегущий человек и между которыми сохраняется преемственность, — изменения в положении его рук, ног и всего тела от кадра к кадру проецируются на один и тот же участок сетчатки, то, что изображено на кадре, сохраняет свою кажущуюся связность и структурную общность. Перцептивный результат таков, что зрительная система интерпретирует эти последовательные, связанные друг с другом изменения как *движение.* Напротив, череда не похожих друг на друга, откровенно не совместимых друг с другом кадров способна дезориентировать зрительную систему. Хотя у нее и может быть опыт восприятия последовательности превращающихся друг в друга разных форм, возможность восприятия плавного, кажущегося движения снижается. Условия, способствующие проявлению подобного феномена, можно создать только в лаборатории, занимающейся изучением восприятия.

Эффект обратного вращения колеса. На практике свет, проецируемый на экран большинством современных кинопроекторов, между двумя кадрами несколько раз прерывается. Это объясняется тем, что даже скорость демонстрации киноленты, равная 24 кадрам в секунду, полностью не избавляет от мельканий. Чтобы избежать их, обычно каждый кадр показывают трижды. Это делается с помощью специального трехлопастного прерывателя, который каждый кадр проецирует на экран в виде трех проекций, что соответствует общей скорости, равной 72 проекциям в секунду. Старые домашние кинопроекторы демонстрируют фильмы со скоростью 16 кадров в секунду (общая скорость — 48 проекций в секунду), но поскольку эти проекции обычно демонстрируются при меньшей освещенности, они лучше сливаются, а тенденция к мельканию выражена слабее. Изображение, которое мы видим на телевизионном экране, основано на том же принципе слияния, но технически совершенно иное.

Именно в данном контексте уместно объяснить *эффект обратного вращения колеса,* который проявляется в том, что по спицам колес зрителю кажется, будто транспортные средства, которые в соответствии с происходящим на экране двигаются вперед, на самом деле едут назад. Некоторые авторы считают, что в данном случае нет никакой иллюзии движения (кроме, разумеется, восприятия движения колес, являющегося результатом последовательного представления самих кадров) (Christman, 1979; Fineman, 1981). Скорее речь может идти о *несоответствии* числа оборотов колеса в секунду и числом кадров, снятых за одну секунду. Если камера снимает 24 кадра в секунду, а колесо делает за одну секунду 23 оборота (или количество оборотов, кратное 23), то каждый последующий кадр запечатлевает колесо чуточку *раньше,* чем оно успевает совершить полный оборот. Во время демонстрации фильма зрителю покажется, что колесо катится назад со скоростью, равной 1 оборот в секунду. Если бы скорости вращения колеса и проецирования фильма были бы равны (т. е. 24 оборота в секунду и 24 кадра в секунду соответственно), то колеса казались бы неподвижными. Если бы колеса вращались со скоростью 25 оборотов в секунду (или с любой другой скоростью, кратной 25), притом что фильм проецируется на экран со скоростью 24 кадра в секунду, зрителю казалось бы, что колеса катятся вперед со скоростью 1 оборот в секунду.

Резюмируя, можно сказать, что восприятие кинофильма на основании ряда дискретных, прерывистых изображений является результатом инерционности зрительной системы, а также распознавания общих отличительных признаков и последовательных изменений от кадра к кадру. Однако полного объяснения этого феномена у нас нет. Как писали Вид и Леллис: «Наука еще не в состоянии объяснить причину этой иллюзии [кинематографа]. Нам известно, что при определенных условиях мы склонны воспринимать дискретные объекты как непрерывные структуры, но пока что никто не знает, почему этот обман удается» (Wead & Lellis, 1981, p. 41).

Реальное движение/кажущееся движение. Как зрительная система обрабатывает информацию об изменениях в сетчатке, вызванных разнообразными формами кажущегося движения? Каковы способы обработки информации о кажущемся движении и отличаются ли они от способов обработки информации об изменениях, вызванных физически перемещающимися объектами? Ясно, что ни стробоскопическое движение, ни восприятие кинофильмов не приводят к таким изменениям сетчатки, к которым приводит наблюдение за реальным физическим движением. Как уже отмечалось выше, кинофильмы — это последовательность дискретных, быстро проецируемых на экран кадров, отделенных друг от друга чрезвычайно короткими периодами затемнения. Следовательно, исходя из сложности обработки информации, поступающей от различных компонентов подобной стимуляции, можно было бы ожидать, что физиологические механизмы, лежащие в основе восприятия реального и кажущегося движения, различны.

Однако эксперименты показали, что движение объектов, запечатленное на кинопленке, которую демонстрируют надлежащим образом, кажется таким же непрерывным, как и движение реальных объектов. Следовательно, можно принять, что в основе восприятия многих форм кажущегося движения лежит тот же самый механизм детектирования движения, что и в основе восприятия реального движения (Clatworthy & Frisby, 1973). Если говорить конкретно о стробоскопическом движении, то оно может быть результатом функционирования некой системы, участвующей в восприятии некоторых видов быстро сменяющих друг друга реальных Движений. Уоллс, сторонник ярко выраженного эволюционного подхода, так сформулировал свою оригинальную и даже несколько эксцентричную точку зрения на сходство реального и кажущегося движения:

> Реальное и стробоскопическое движение субъективно сходны, но это сходство обманчиво... Возможно, это не простое совпадение, ибо можно предположить, что очень похожая имитация кажущимся движением реального движения при тех же простран-

ственных И временных условиях и при том же освещении имеет некоторую биологическую ценность. Какую именно, мы сказать не можем. Автор готов рискнуть и предположить, — очень осторожно! — что, возможно, когда примитивное, глупое позвоночное видело движущийся объект, который сперва скрывался за какой-то преградой, а потом появлялся вновь, оно до тех пор не могло с уверенностью сказать, один это объект или два, пока в его распоряжении не появились автоматические средства определения «единственности» объекта в то время, пока он был спрятан от него. Какой бы ни была причина эволюции процесса домысливания изображения в фи-феномен, трудно сказать, какую пользу его сохранение принесло нам... если, конечно, не считать кино жизненной необходимостью (Walls, 1963, p. 362).

Автокинетическое движение

Ощутить движение можно, если, находясь в абсолютно темной комнате, сосредоточить взгляд на светящейся точке. В этих условиях у наблюдателя нет ни пространственного фона, ни каких-либо фиксированных зрительных координат, с которыми можно было бы соотнести эту светящуюся точку. В результате единственная стационарная светящаяся точка начинает «дрейфовать», и это явление называется **автокинетическим движением.** Как правило, светящаяся точка лишь ненамного отклоняется от своего положения, однако нередко совершает и весьма заметное движение. В том, что касается масштаба и направления автокинетического движения, индивидуальные различия наблюдателей очень велики и на восприятие этого явления заметно влияет их социальный статус (Sherif, 1936).

Предложено несколько механизмов, объясняющих возникновение автокинетического движения и основанных преимущественно на роли непроизвольных движений глаз (Mack, 1986; Post & Leibowitz, 1985). Заслуживающее внимание объяснение автокинетического феномена предложено Грегори (Gregory, 1973). Его теория, иногда называемая *теорией утомленных глазных мышц,* основана на изменяющейся способности глазных мышц поддерживать **фиксацию** глаза на неподвижной светящейся точке. В ходе продолжительной **фиксации** микродвижения глаз вызывают флуктуации фиксации, и в результате длительной фиксации глазные мышцы «устают». Чтобы компенсировать усталость и возрастающие усилия, необходимые для поддержания фиксации на светящейся точке, глазным мышцам требуются *необычные командные сигналы, корригирующие командные сигналы.* По своей сути эти корригирующие сигналы — то же самое, что и эфферентные сигналы, приводящие в движение глаза, совершающие следящие движения во время наблюдения за перемещающимся стимулом. Однако поскольку эти сигналы полностью лишены каких-либо признаков визуального фона, они превратно толкуются как сигналы к движению глаз. Следовательно, по Грегори, причиной движения светящейся точки в темноте являются не движения глаз, а корригирующие сигналы, призванные *предотвратить* их.

Эффект последействия движения

Пассажиру только что остановившегося поезда, до этого долго смотревшему в окно, кажется, что теперь уже неподвижный пейзаж движется вперед, и это **ощущение** настолько реально, словно поезд медленно катится назад. Это пример эффекта последействия движения **(ЭПД),** суть которого заключается в том, что восприятие движения может продолжаться и после прекращения воздействия движущегося раздражителя. Точно так же и неподвижная сцена покажется движущейся вверх, если до этого долго смотреть на падающую воду (на водопад). Это пример особого эффекта последействия движения, описанного в 1834 г. Аддамсом (Addams, 1834) и в 1882 г. Баудитчем и Холлом (Bowditch & Hall, 1882) и называемого *иллюзией водопада* (подробное описание этого эффекта см. в Fineman, 1981). Одно их первых приспособлений, предназначенных для демонстрации иллюзии водопада, представлено на рис. 8.14.

Как будет понятно из описанного ниже экспериментального подтверждения, ЭПД можно легко продемонстрировать с помощью компьютера.

Экспериментальное подтверждение

Эффект последействия движения

Вам понадобится компьютер, содержащий достаточно длинный текст, набранный чрез два, а еще лучше - через три интервала. Глядя на центр монитора, «гоните» текст вниз с постоянной скоростью, не читая его. Секунд через 90, когда вы остановите текст, вам покажется, что неподвижный монитор перемещается вверх. Иллюзия движения вверх - это *эффект последействия движения,* вызванный тем, что вы до этого наблюдали за движением вниз. Если у вас нет доступа к компьютеру, сделайте следующее. Глядя на центр телевизионного экрана, проследите за движением по нему заключительных титров фильма, не читая их. Когда титры пройдут, вам покажется, что экран движется вниз.

ЭПД несколько иного характера, отчасти вызванный определенным ритмом непроизвольных движений глаз во время фиксации взгляда, может быть продемонстрирован с помощью геометрического узора, представленного на рис. 8.15.

Нейронные процессы, лежащие в **основе ЭПД.** Общий подход к трактовке ЭПД базируется на представлениях об *эффектах последействия* и *селективной*

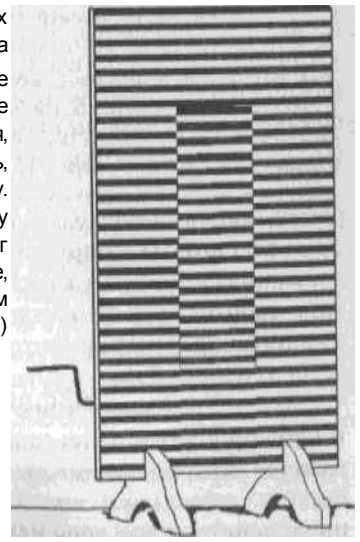


Рис. 8.14. Одно из первых приспособлений, предназначенных для демонстрации иллюзии водопада

С помощью ручки полосатый ремень приводится в движение (вверх или вниз), и испытуемые через специальное отверстие наблюдают за ним. После того как ремень останавливается, испытуемый, глядя на фон или на какую-либо другую поверхность, продолжает видеть движение, но в обратную сторону. (Авторство этого приспособления обычно приписывается Боудичу и Холлу *(Источник.* Bowditch & Hall, 1882), однако Боринг высказывает предположение о том, что нечто подобное, возможно, было создано раньше, Уильямом Джеймсом *(Источник.* Boring, 1942))

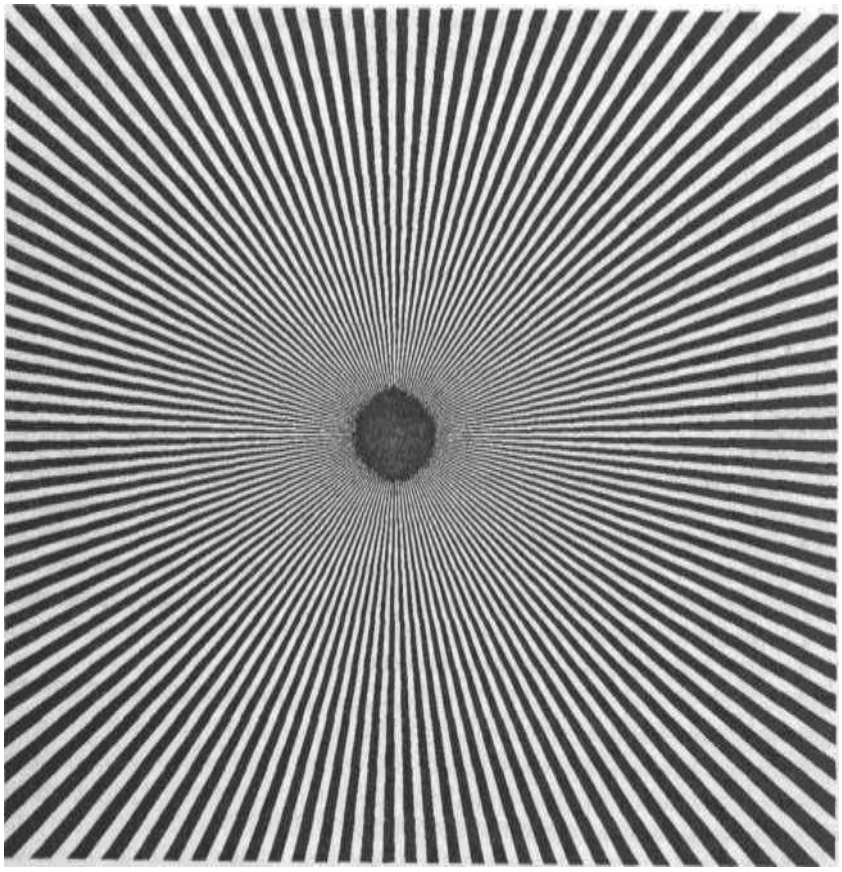


Рис. 8.15. Пример геометрического узора, вызывающий эффект последействия, в котором может восприниматься движение

Если в течение примерно 20 секунд пристально всматриваться в центр узора, а затем «спроецировать последействие» на лист белой бумаги, обычно появляется ощущение вращательного движения. {*Источник:* D. M. MacKay. Ways of looking at perception. W. Wathen-Dunn (Ed.). *Models for the perception of visual form.* Cambridge, Mass: MIT Press, 1967)

адаптации (см главы 4,5 и 7). Не вдаваясь в детали, можно сказать, что причиной ЭПД являются селективная адаптация и уставание чувствительных к восприятию движения детекторов, характерные для человека, воспринимающего движение какого-либо объекта. Рассматривание «водопада» или прокручивание текста (см. вышеописанные экспериментальные подтверждения), т. е. восприятие в течение какого-то периода времени только движения *вниз,* приводит к тому, что детекторы, чувствительные к движению такого типа, утомляются, или адаптируются, в результате чего становятся менее активными. Поэтому, когда человек, наблюдавший за движением вниз, переводит свой взгляд на неподвижную композицию, чувствительность его рецепторов, воспринимающих движение вниз, оказывается пониженной и ему кажется, что и неподвижная композиция, и ее элементы перемещаются вверх.

На каком уровне зрительной системы находятся рецепторы, обеспечивающие ЭПД? Сегодня у нас нет определенного ответа на этот вопрос, однако варьирование условий, при которых они возникают, дает возможность высказать некоторые предположения. Например, если эти рецепторы лежат на уровне сетчатки, то адаптация к действию движущегося стимула только одного глаза должна привести к тому, что второй, неадаптированный глаз *не почувствует* ЭПД. Иными словами, если происхождение ЭПД связано с функционированием сетчатки, адаптация одного глаза не должна повлиять на состояние другого. Однако когда такой эксперимент был проведен, оказалось, что неадаптированный глаз тоже ощущает ЭПД, что свидетельствует в пользу

центрального, или кортикального, происхождения этого феномена (Nitchell, Reardon & Muir, 1975; Mitchell & Ware, 1974; Murakami & Cava-nagh, 1998. Фундаментальный обзор литературы, посвященной ЭПД, читатель найдет в Mather et al., 1998).

Прогнозирование траектории движения

Заключительный раздел главы посвящен преимущественно не восприятию движения объектов, а *прогнозированию* траекторий их движения. Этот вопрос вполне заслуживает краткого обсуждения, поскольку некоторые объяснения движения объектов по определенным траекториям получены на основании такого явления общего характера, как восприятие движения, рассмотрению которого была посвящена эта глава. Поскольку большинство людей постоянно имеют дело с динамическими событиями, происходящими в окружающем мире, и в первую очередь — с движущимися объектами, можно было бы предположить, что им уже знакомы некоторые базовые принципы и законы физики и понятна предсказуемость траекторий движения объектов. Между тем в том, что касается движения объектов даже, казалось бы, в простых условиях, все еще немало заблуждений, а нередко и ошибочных представлений. Приведены результаты экспериментов (McCloskey, Carra-mazza & Green, 1980; см. также: Kaiser, Proffitt & McCloskey, 1985), проведенных для оценки способности испытуемых точно предсказать траекторию движения объектов на основании решения таких простых физических задач, как две первые задачи, представленные на рис. 8.16.

Когда испытуемых, преимущественно студентов колледжа, из которых 70 % как минимум изучали физику в средней школе, спросили о траектории движения предмета, выпущенного из изогнутой трубы, на удивление многочисленная группа оказалась не готовой дать точный ответ. Они отвечали, что выпущенный из изогнутой трубы предмет будет продолжать двигаться по кривой даже в отсутствие внешнего'воздействия. Более того, увеличение числа неправильных ответов при переходе от задачи 1 к задаче 2 позволяет предположить, что, по мнению большинства испытуемых, кривизна траектории движения объекта зависит от времени его пребывания в трубе, и чем это время больше, тем более изогнутой будет и траектория. Правильный ответ на обе задачи непосредственно вытекает из *закона инерции, или первого закона Ньютона: движение тела изменяется только под воздействием приложенного к нему внешнего усилия. Если тело находится в покое, оно будет оставаться в покое. Если оно находится в движении, оно будет продолжать двигаться с постоянной скоростью до тех пор, пока к нему не будет приложено внешнее усилие.*