

**А. Шадрин**

**УПРАВЛЕНИЕ  
ВИЗУАЛЬНЫМ ОБЪЕМОМ  
ФОТОГРАФИЧЕСКИХ  
ИЗОБРАЖЕНИЙ**

**(Вторая редакция)**

**Санкт-Петербург  
2010**



## ВВЕДЕНИЕ

Очевидно, что иллюзия объема (глубины пространства), возникающая при рассматривании изображений, выполненных на плоских носителях (например, бумаге, экране монитора и пр.), — это важнейший критерий качества этих изображений, поскольку при зрительном восприятии реальных сцен третья пространственная размерность — глубина — оценивается нашим зрением в полной мере.

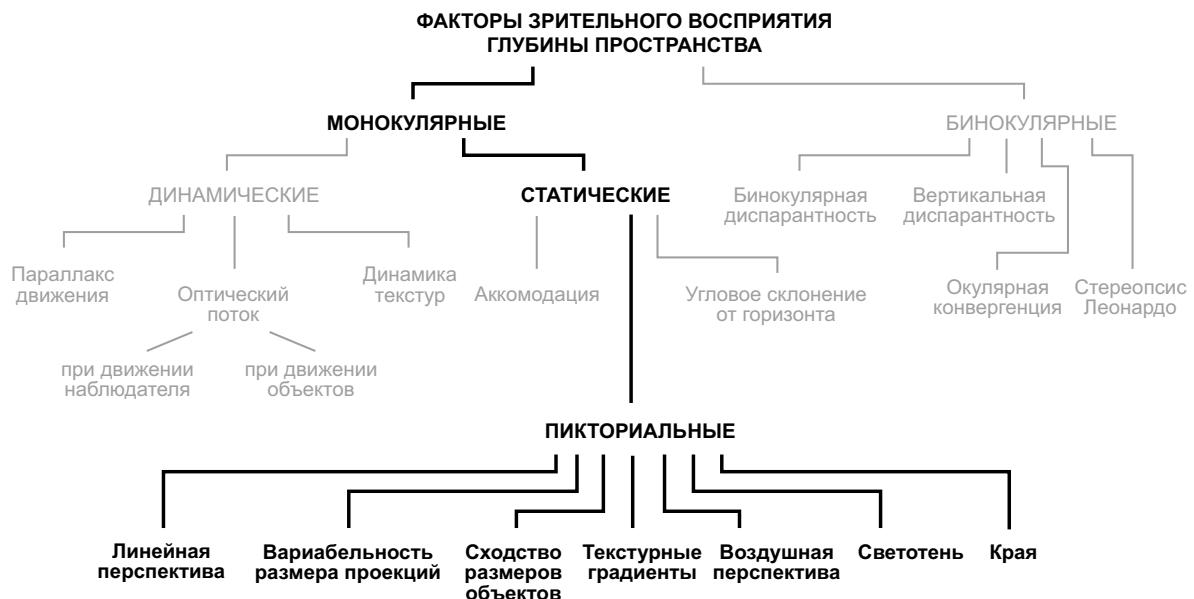
Реальные сцены предъявляют зренiuю наблюдателя целый комплекс т.н. *факторов зрительного восприятия глубины пространства*, которые можно разделить на две больших группы: *бинокулярные* (стереоскопические) и *моноокулярные* (нестереоскопические). Еще в 1838 г. британский физик и изобретатель Чарльз Витстон первым придал серьезное значение тому факту, что глаза наши смотрят на мир со слегка разных пространственных позиций:

«Ныне вполне очевидно, почему художники не в силах дать добротного представления близкорасположенных предметов, то есть рисунка, который был бы умом нашим неотличим от них. Когда и рисунок, и предмет рассматриваются обоими глазами, то, в случае рисунка, на сетчатках образуются две *почти одинаковых картинки*, а в случае реального объекта — эти картинки *разные*. Следовательно, в этих двух ситуациях имеется ощутимая разница между воздействиями на органы наших чувств и, соответственно, между формами перцептов в сознании. Таким образом, рисунок предмета никак не может отождествляться с самим предметом».

Развернутую современную классификацию факторов визуальной глубины мы рассмотрим чуть позднее, а сейчас отметим лишь то, что ясно априори: в плоских изображениях отсутствуют стереоскопические факторы объема, и, следовательно, визуальную глубину сцены передают лишь факторы моноокулярные. Легко догадаться также, что при обработке изображений мы обычно гиперболизируем последние, стараясь компенсировать нехватку стереоскопических факторов. К примеру, общеизвестно, что любое изображение — в том числе и цифровое — можно представить как совокупность яркостно-контрастных составляющих различных пространственных частот (см. рис. 27). Принято считать, что, деликатно повышая контраст на низких пространственных частотах, мы усиливаем визуальный объем изображения; на средних — несколько усиливаем его микропластику (микрообъемность, или, как еще говорят, — волюметричность); на высоких — визуальную резкость. Однако опытный цветокорректор знает, что даже самая искусная манипуляция контрастами может и не дать желаемого эффекта сразу и по всему полю картинки. Поэтому мы всегда помним о таких



Сэр Чарльз Витстон  
(1802 — 1875)



**Рис. 1.** Факторы зрительного восприятия глубины пространства. Серым отмечены факторы, присущие только реальным сценам; черным — факторы, присущие и сценам, и статическим изображениям сцен.

инструментах, как «History Brush» или «Eraser» (если работа велась в отдельном слое). Применение последних чаще интуитивно, а эффективность зависит от опыта и таланта оператора: каким именно элементам изображения вернуть их прежний вид, он решает, опираясь на свой опыт наблюдения за сценами, профессиональное чутье и... вдохновение.

Задача данной статьи в том, чтобы на основе современного научного взгляда на восприятие зрением человека элементов различных пространственных частот, выработать системный подход к манипулированию монокулярными факторами визуального объема изображений и научиться работать осмысленно, добиваясь предсказуемых и стабильных результатов.

## 1. ФАКТОРЫ ЗРИТЕЛЬНОЙ ГЛУБИНЫ ПРОСТРАНСТВА

Итак, давайте в общем виде познакомимся с современным научным представлением о том, какие факторы зрительного восприятия глубины пространства предлагаются нашему зрению реальными сценами, а какие — изображениями сцен. Обратимся к схеме рис. 1 (Palmer, 1999; Schwartz, 2005, 2009) и сразу отметим, что факторы глубины, предъявляемые нашему зрению изображениями сцен (т.н. *пикториальные факторы*), — это лишь подмножество факторов, присущих реальным сценам (поскольку изображения сцен *двухмерны* — плоски, а реальные сцены *трехмерны* — объемны). Коль скоро в данном случае нас интересует манипулирование именно двухмерными изображениями, на схеме выделены только пикториальные факторы.

Как видим, в сравнении с реальными сценами у изображений радикально меньше возможностей вызвать в сознании наблюдателя ощущение глубины пространства,

вернее сказать, — иллюзию этой глубины. В самом деле, из рис. 1 видно, что в нашем распоряжении остается всего лишь семь факторов:

- линейная перспектива;
- вариабельность относительного размера проекций;
- сходство размеров объектов сцены;
- текстурные градиенты;
- воздушная перспектива;
- светотень;
- картина краев.

Коротко рассмотрим каждый из них, взяв за основу современную классификацию факторов визуальной глубины пространства, выработанную на научной базе университета Беркли — одного из ведущих вузов США, в стенах которого сегодня активно исследуется зрение человека (Palmer, 1999).



Стивен Пальмер, профессор психологии и vision science университета Беркли, США.

## 1.1. Линейная перспектива (конвергенция параллелей)

Начнем с цитаты из фундаментальной работы профессора психологии и vision science Стивена Пальмера «Наука о зрении. От фотонов к феноменологии»:

«Свет, отраженный от объектов сцены, по прямым падает на сетчатку наблюдателя. Геометрия, описывающая этот процесс, именуется *перспективной проекцией* и демонстрирует принципиальное отличие между предметами реального мира и их

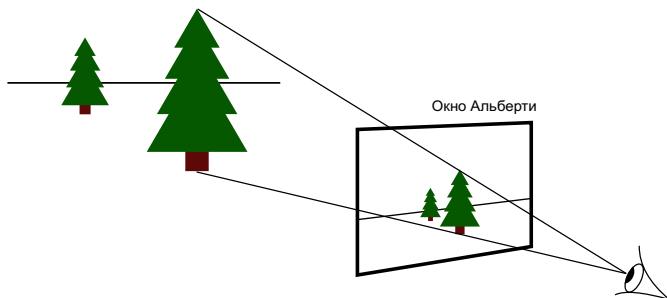
оптическими изображениями. Наиболее очевидные из этих отличий касаются пространственной мерности: трехмерные объекты дают лишь двухмерные проекции. Утраченная (третья) размерность — глубина. Однако было показано, что, к счастью, двухмерные изображения, сформированные перспективной проекцией, все же несут в себе определенную визуальную информацию об этой “потерянной” разномерности, и это позволяет хотя бы частично восстановить ее.

Значимость перспективной проекции в зрительном восприятии глубины пространства осознали несколько веков назад, когда живописцы стали пытаться как можно реалистичнее передать глубину пространства на плоскости холста. В 1436 итальянский живописец Леон Альберти<sup>1</sup> описал технику письма в т.н. *собственной перспективе*, что произвело революцию в живописном представлении глубины. Основная идея довольно про-



Леон Баттиста Альберти  
(1404 — 1472)

<sup>1</sup> Леон Баттиста Альберти (1404 — 1472) — итальянский ученый, гуманист, писатель, один из зачинателей новой европейской архитектуры и ведущий теоретик искусства эпохи Возрождения. — Прим. пер.



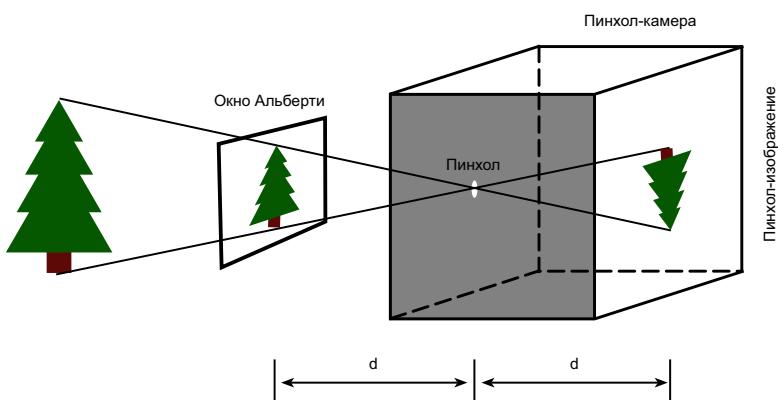
**Рис. 2.** Окно Альберти. Перспективный фактор глубины, заложенный в трехмерную сцену, можно сохранить на двухмерной поверхности, если отрисовать контуры предметов на стекле, рассматривая сцену через это стекло с определенной точки.

глубине, заключенную в контурах. Сей метод достижения собственной перспективы в рисунке именуется *окном Альберти*. Спустя полвека Леонардо, время от времени занимавшийся вопросами перспективы в живописи, отстаивал аналогичные идеи.

Наиболее интересной особенностью перспективной проекции является то, что с помощью окна Альберти мы можем вызвать у наблюдателя весьма убедительную иллюзию глубины. Подобное происходит в камере обскура при проекции экспонирующего изображения на плоскость листовой фотопленки (рис. 3): проекция сцены на плоскость окна Альберти — это всего лишь прямая версия перевернутого изображения в камере обскура, в которой плоскость изображения расположена на таком же расстоянии от отверстия, как глаз наблюдателя от окна Альберти. Сказанное означает, что если мы старательно отрисуем картинку на окне Альберти, она явится полным эквивалентом перевернутому изображению, созданному пинхолом. <...>

Одной очень важной особенностью перспективных проекций является то, что параллельные линии сцены проецируются на двухмерную плоскость не-

ста (рис. 2): чтобы точно перенести трехмерную сцену на двухмерный холст, нужно организовать изображение так, как будто оно проходит через плоское окно, расположенное на холсте. Если мы отнесемся к этой идеи буквально, то можем воссоздать вполне реалистичный контурный рисунок сцены, рассматривая ее через оконное стекло одним глазом (в фиксированной позиции) и отрисовывая контуры восковым карандашом или мелком непосредственно на стекле. Если затем положить это стекло на равномерную белую поверхность и рассматривать монохромно примерно с той же позиции, то наш рисунок выдаст всю пикториальную информацию о



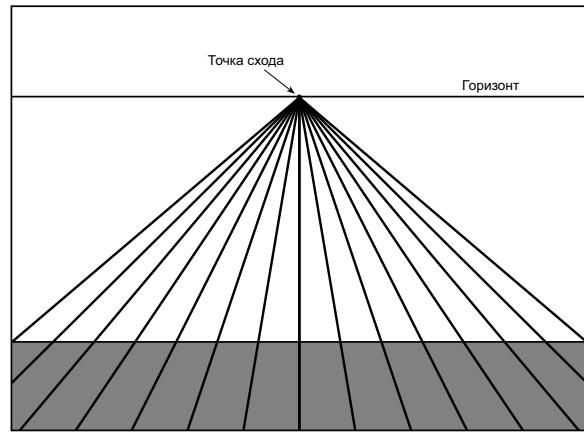
**Рис. 3.** Окно Альберти и пинхол-камера. Изображение в окне Альберти — это прямая версия перевернутого изображения сцены, сфокусированного на задней поверхности камеры обскура. Отверстие камеры расположено в точке наблюдения, а расстояние до задней поверхности равно расстоянию от точки наблюдения до окна Альберти.

параллельными и пересекаются в т.н. *точке схода* на линии горизонта. На рис. 4 показано, что все параллели, лежащие в сцене на одной плоскости, в изображении этой сцены сходятся в одной общей точке. Конвергенция линий возникает из-за того, что зрительный угол между двумя ближними к наблюдателю отрезками этих линий оказывается очень большим, а по мере удаления — падает, сходя в ноль по бесконечно удаленным отрезкам.

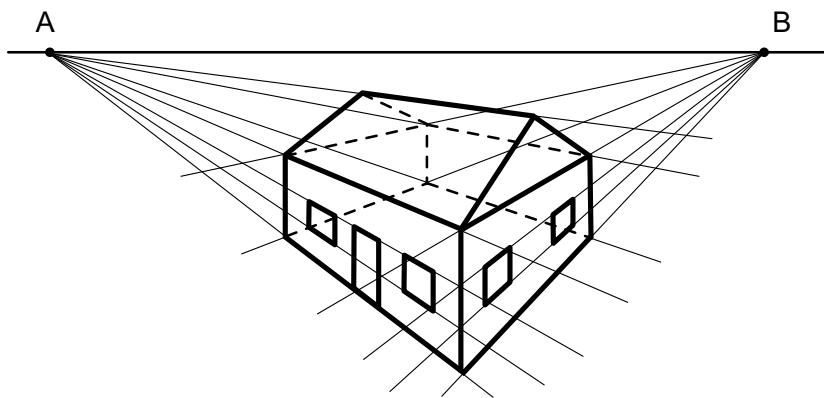
Сие свойство перспективной проекции часто именуют *линейной перспективой*, но мы назовем его *конвергенцией параллелей*, подчеркивая тем особый характер заключенной в нем визуальной информации. Возможно, наиболее эффектным примером конвергенции параллелей является уменьшение визуального расстояния между рельсами железнодорожного полотна или обочинами дороги, уходящей вдаль.

Давайте теперь внимательно посмотрим на рис. 5 и прикинем точки схода для реалистичной передачи глубины. В данном рисунке две таких точки, поскольку имеются два отдельных множества параллельных линий, лежащих на т.н. плоскости земли. Убедиться в существовании точек схода на линии горизонта (соответственно, тоже лежащей на плоскости земли), достаточно легко, однако существует бесконечное множество точек схода, лежащих на “линиях горизонта” в других плоскостях трехмерного пространства. К примеру, вертикальная линия, проходящая

через точку В на рис. 5, — это линия горизонта для вертикальной плоскости, несущей на себе правую фронтальную поверхность изображеного предмета. Все параллельные линии этой плоскости будут конвергировать в точке схода, расположенной где-то вдоль этой линии, также как в случае “истинного” горизонта на плоскости земли».



**Рис. 4.** Конвергенция параллелей (линейная перспектива). В перспективной проекции трехмерной сцены на двухмерную плоскость линии, параллельные на исходной плоскости сцены, пересекаются в т.н. *точке схода*, расположенной на линии горизонта.



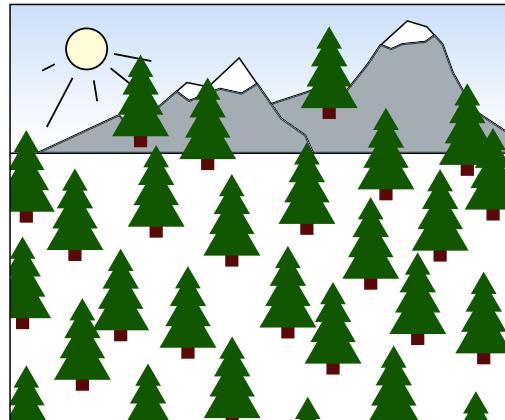
**Рис. 5.** Пример двухточечной перспективной проекции. Линии параллельных краев домика пересекаются в двух точках на линии горизонта.



**Рис. 6.** Одна и та же сцена, сфотографированная в один формат кадра ( $4 \times 5''$ ) объективами разных фокусных расстояний — первое (слева) вдвое больше другого (справа). Наклон передней доски фотоаппарата на несколько градусов вперед позволил исключить из сравнения паразитный фактор нерезкости заднего плана. При этом обратим внимание на то, насколько разнятся наши впечатления о глубине пространства одной и той же сцены.

Итак, как видим, линейная перспектива является собой важнейший пикториальный фактор, влияющий на силу иллюзии глубины пространства (рис. 6), который, однако, почти не поддается управлению при постобработке. Или же управление это вызывает такие затруднения и отнимает столько времени, что становится ясно: манипулирование перспективой в изображении — это прерогатива этапа *создания* изображения, т.е. подбора должного фокусного расстояния объектива фотокамеры при захвате сцены.

Таким образом, мы вынуждены исключить этот фактор из списка управляемых при постобработке.

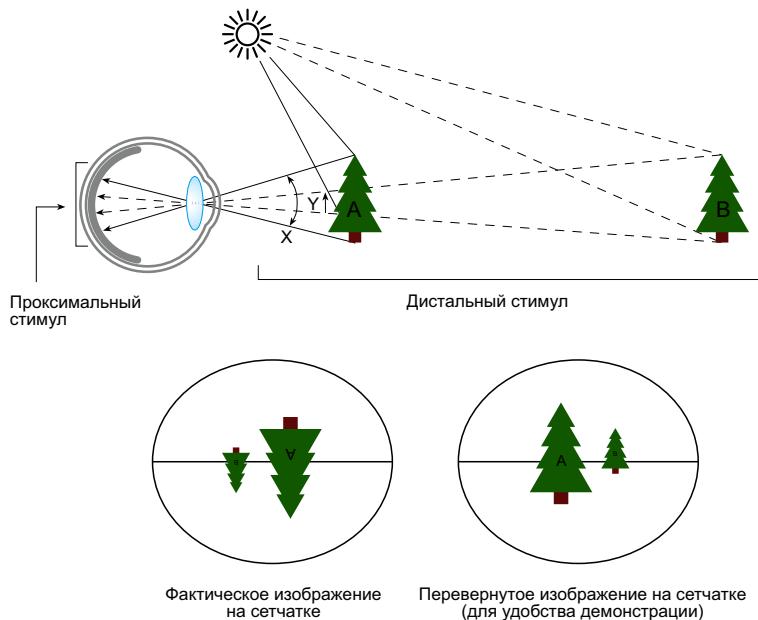


**Рис. 7.** Необычный вид рисунка объясняется тем, что из него исключен наиважнейший фактор визуальной глубины пространства — вариабельность относительного размера проекций разноудаленных объектов, т.е. габариты всех елок в изображении одинаковы.

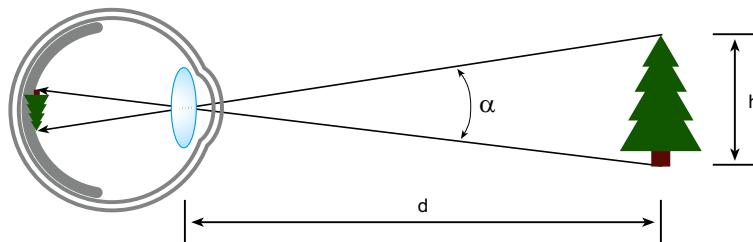
## 1.2. Вариабельность относительного размера проекций

Опять же, начнем с цитаты из «Науки о зрении»:

«Давайте посмотрим на рис. 7 и обратим внимание на некоторую странность: “ближние” елки на нем того же размера, что и “далние”. Действительно, деревья



**Рис. 8.** Формирование на сетчатке оптического изображения сцены. Свет, отраженный от объемных (трехмерных) объектов (дистальный стимул), попадает в глаз и формирует двухмерное изображение на сетчатке (проксимальный стимул). Пространство между объектами сцены в ее двухмерной проекции на сетчатку напрямую не отражено, но разноудаленные от наблюдателя объекты обретают на этой проекции разный размер.



**Рис. 9.** Соотношение размера и расстояния. Геометрия перспективной проекции демонстрирует то, что расстояние до объекта можно определить из высоты этого объекта ( $h$ ) и тангенса его зрительного угла ( $\alpha$ ).

на рисунке не соответствуют очевидному факту: если два объекта реальной сцены равны по размеру, то проекция дальнего объекта на сетчатку окажется мельче проекции ближнего. По рис. 8 четко видно, что, когда свет от двух объектов одинакового размера, расположенных на разных расстояниях от наблюдателя, падает на сетчатку этого наблюдателя, *зрительный угол* (угловой размер) ближнего предмета оказывается больше, чем дальнего.

Простейшая тригонометрия поможет нам определить угловой размер изображения предмета на сетчатке как функцию от расстояния до самого предмета в сцене. На рис. 9 дан прямоугольный треугольник, образованный зрительными осями на верх и низ объекта справа (елка), расположенного своей нижней частью на уровне глаз. Если высоту объекта обозначить  $h$ , а охватываемый им зрительный угол —  $\alpha$ , то расстояние до объекта ( $d$ ) можно выразить через тангенс этого угла:

$$\tan(\alpha) = \frac{h}{d},$$

то есть:

$$d = \frac{h}{\tan(\alpha)}.$$

Отношение высоты объекта к расстоянию до него, то есть угловой размер ретинальной проекции этого объекта ( $\alpha$ ), позволяет нам оценить его удаленность ( $d$ ) от наблюдателя.

Вместе с тем имеется и проблема. Чтобы решить вышеприведенное уравнение, должна быть известна фактическая высота объекта ( $h$ ), однако эту информацию невозможно извлечь из изображения на сетчатке, поскольку размер объекта и его удаленность как раз и определяют размер проекционного изображения. Следовательно, по данной проекции мы никак не можем определить, почему ее размер именно таков: то ли это проекция мелкого, но близкорасположенного предмета, то ли крупного, но далекого. Существует бесконечное число логически возможных габаритов, которые дадут проекцию такого размера. Если, к примеру, мы заранее знаем, что какие-либо два объекта одинаковы, то, исходя из относительных размеров их проекций, мы можем вывести то, что один предмет ближе, а другой дальше. Но, чтобы правило это сработало, объекты обязательно должны быть одинакового размера. Однако мы не можем этого знать, не зная их удаления от наблюдателя. Образуется заколдованный круг. Эвристически зрительная система в силах разорвать его, предположив, что два сходных по всем прочим параметрам объекта одинаковы и по размеру. Тогда по относительным размерам проекций этих объектов на сетчатку можно “вычислить” и относительные расстояния до них.

Блестящий пример того, как размер проекции объекта на сетчатку может послужить источником информации о его удалении от наблюдателя, дан на рис. 10: у спортсменов примерно один и тот же рост, однако их изображения уменьша-



**Рис. 10.** Относительный размер как фактор зрительной глубины пространства. Изображение интересно тем, что прочие пикториальные факторы в нем практически отсутствуют, но наше зрение однозначно воспринимает глубину пространства сцены: мы сходу и бессознательно предполагаем, что рост трех ныряльщиков примерно одинаков, но коль скоро их проекции на плоскость изображения (и, соответственно, на сетчатку глаза) уменьшаются в размере по мере удаления от фотокамеры, нашему зрению удается восстановить соотношения расстояний в сцене.

ются в размере, потому что стоят ныряльщики на разных расстояниях от точки съемки. Наша зрительная система интерпретирует их рост как более или менее одинаковый, поэтому прогрессивное уменьшение габаритов мы воспринимаем как прогрессивное удаление.

Описанная ситуация — пример того, как бессознательное умозаключение может помочь определить глубину пространства из относительных размеров изображений на сетчатке. Информация, несомая стимулом, логически недоопределенна, но, присовокупив к ней дополнительные эвристические предположения (в данном случае то, что изображения на сетчатке сходны во всем за исключением размеров их проекций, т.е. что это фактически два одинаковых по размеру объекта сцены), приходим к выводу, что объекты эти расположены на разном удалении от наблюдателя. То есть, допустив, что размер объектов одинаковый и взяв за основу разность их проекций на сетчатку, зрительная система делает верное заключение. Не приняв тезис о равенстве габаритов исходных объектов, мы получили бы зрительную иллюзию расстояния».

Итак, как мы теперь видим, управление относительным размером проекций — это, по сути, управление контентом изображения, осуществимое лишь при фотографическом захвате сцены, и любая попытка внесения изменений *post factum* — это фактически перерисовка, т.е. создание нового изображения. Поэтому данный фактор тоже исключается из нашего списка.

### 1.3. Сходство размеров объектов сцены

Вновь цитата:

«Относительный размер проекции на сетчатку как параметр зрительной стимуляции вполне самостоятелен. Однако габариты многих объектов, относимых нами к той или иной категории, лежат в таком диапазоне, что ощущения наблюдателя оказываются в целом весьма сходны: рост взрослых людей, разумеется, вариабелен, но у большинства он лежит между 1.5 и 2 м; столы возвышаются над полом примерно на 60 — 80 см, автомобили примерно на 1.5 м, потолки на 2.5 — 3 м и т.д. Значимость сего обстоятельства в том, что ежели размер объекта заранее известен наблюдателю, то зрение в силах решить приведенное ранее уравнение, соотносящее размер проекции объекта на сетчатку с расстоянием до этого объекта и вывести величину этого расстояния. При этом подчеркнем, что осведомленность о размере объекта — это не осознанное знание, а решение уравнения — не осознанная символическая манипуляция. Напротив — это скоростные бессознательные процессы, проходящие автоматически, без какого-либо обдумывания.

Экспериментально эффект сходства размеров в восприятии глубины пространства впервые продемонстрировал американский исследователь Вильям Иттлесон (1951), показавший, что человек может довольно точно оценить расстояние до игральной карты, чья высота (3.5 дюйма) заранее известна зорнию — хотя, вероятно, и неосознанно.

Еще один вполне убедительный экспериментальный результат был получен В. Эпштайном (1965), который предъявлял своим испытуемым высококачественные фотографии десятицентовой, двадцатипятицентовой и полудолларовой монет в условиях монокулярного показа в затемненном помещении, где специальным точечным источником были освещены лишь эти изображения. Испытуемых просили оценить

расстояние до каждой из монет. Показ был организован так, что все три монеты имели одинаковый диаметр и были равноудалены от наблюдателей. Однако же испытуемые воспринимали десятицентовую монету как ближнюю, а полудолларовую — как дальнюю, поскольку “опирались” на их оригинальный размер, хорошо известный им из повседневной жизни».

Как видим, и фактор сходства размеров объектов сцены поддается управлению только на стадии захвата, являясь фактически плодом ее постановки, режиссуры. Поэтому и его мы исключим из списка управляемых факторов визуальной глубины пространства.

#### 1.4. Текстурные градиенты

«Еще одним важным свойством перспективной проекции в контексте восприятия глубины пространства является то, что в свое время выдающийся американский исследователь физиологии зрительного восприятия Джеймс Джером Гибсон (1904—1979) окрестил *текстурными градиентами* — это систематически меняющиеся в размере и по форме мелкие текстурные элементы, коих на поверхностях естественных объектов великое множество. Примеров естественных текстур предостаточно — это и травинки на лугу, галька, ковровая пряжа, узор кафеля в ванной и пр. Три примера даны на рис. 11 (сл. стр.), и, глядя на них, мы уже догадываемся, что помимо информации о глубине пространства текстурные градиенты дают наблюдателю сведения об ориентации поверхности в глубину и о ее



Джеймс Джером Гибсон  
(1904 — 1979)

кривизне. Отметим, что текстурными вариациями можно весьма реалистично изобразить поверхности замысловатых, сложных форм.

Американец Кент Стивенс (1979) показал, что два аспекта текстурных вариаций — размер элементов и их форма — являются независимыми источниками информации об ориентации поверхностей во внешнем мире. Общий размер текстурных элементов уменьшается по мере увеличения расстояния благодаря падению по всем трем пространственным размерностям. Следовательно, размер элементов можно использовать в определении относительного расстояния до различных частей текстурированной поверхности и тем самым реконструировать ориентацию этой поверхности. (Однако отметим, что сказанное справедливо только в том случае, если размер текстурных элементов более или менее постоянен.)

Сие, разумеется, пример эвристического допущения в восприятии глубины, поскольку перцепционный вывод о расстоянии до текстурных элементов (основанный на данных, полученных из размеров их проекций на сетчатку глаза) окажется верным, только если размеры этих элементов более или менее одинаковы. Если же



**Рис. 11.** Естественные текстурные градиенты. Многие поверхности естественного происхождения состоят из текстурных элементов, сходных по габаритам и форме, что позволяет зрительной системе реконструировать глубину пространства из систематических изменений размера и формы проекций этих элементов на сетчатку. В данном примере глубина пространства читается устойчиво, несмотря на то, что кроме текстурных градиентов прочие факторы глубины почти не представлены (особенно в верхнем примере).

нет, то исходом станет *иллюзия глубины и ориентации*. К примеру, глубина и изменения в ориентации поверхности, воспринимаемые нами в рис. 10 и 11 фактически иллюзорны, поскольку текстурные элементы в самих картинках на самом деле меняются. Когда мы смотрим на реальные сцены, изображениями которых являются эти снимки, то аналогичное предположение (т.е. что все текстурные элементы примерно одного размера) в целом дает верное восприятие. Однако же при рассмотрении изображения эти же догадки ведут к ощущению глубины, которой фактиче-

ски нет. То есть, тот факт, что мы воспринимаем глубину пространства на изображениях, несущих в себе текстурированные поверхности, — это следствие того, что, несмотря на ложность предположения о равенстве размеров элементов самой картинки, в целом такое допущение верно в отношении изображенной сцены».

Как видим, текстурные градиенты поверхностей — практически никак не регулируемый фактор даже при захвате (при условии неизменности прочих факторов, в частности, линейной перспективы). Предлагаемое обстоятельство. Исключается из списка.

### 1.5. Воздушная перспектива

«Воздушная (атмосферная) перспектива относится к прогрессивным изменениям в яркостном контрасте и хроматике объектов, когда те оказываются удаленными от наблюдателя на большое расстояние. Каждый из нас замечал, что здания и прочие крупные предметы становятся все более “замутненными” и “выбеленными” по мере удаления от них. Действительно, их контраст снижается за счет увеличения слоя атмосферы между нами и этими объектами, поскольку воздух содержит рассеивающие свет частички пыли и воды (туман, дымка), к которым порой примешиваются и различные загрязняющие агенты (например, смог от промышленных выбросов и автомобилей). Частички эти добавляют шум в процесс формирования изображения на сетчатке, эффективно размывая его. В результате контуры изображения становятся менее проработанными (“мутными”) и с меньшим контрастом (“выбеленными”). Пример находим на рис. 12.



**Рис. 12.** Воздушная перспектива как фактор восприятия глубины пространства. Понижение контраста и нарастание синевы заднего плана вызваны толстым слоем атмосферы, через который свет пробивается к наблюдателю. Наряду с прочими данный фактор усиливает ощущение глубины, которое, разумеется, сугубо иллюзорно.

Мы также знаем, что, например, поросшие лесом горы на большом удалении выглядят синеватыми или даже слегка фиолетовыми, хотя вблизи те же самые горы смотрятся совершенно зелеными. Дело в том, что толстый слой атмосферы, сквозь который мы смотрим на далекий объект, слегка подкрашивает этот объект синим, и это трактуется зрением как факт большой удаленности (рис. 12). Причина появления синевы в том, что атмосферные частицы больше рассеивают фотоны высоких частот, нежели низких, вызывая систематический спектральный сдвиг в сторону коротких волн. А это значит, что наше зрение стимулируется с относительным перевесом “коротких” фотонов (воспринимаемых синими).

Живописцы с незапамятных времен пользовались воздушной перспективой, имитируя удаленность изображенных ландшафтов. При этом отметим, что падение контраста и хроматики само по себе не является сакральным носителем информации о глубине пространства, но в связке с прочими факторами восприятия глубины усиливает впечатление».

Итак, мы видим, что управление воздушной перспективой в изображениях хоть и возможно на стадии постобработки, относится скорее к ретуши, нежели к собственно цветокоррекции.

**Стратегия управления:** понижение контраста заднего плана изображения и добавка синевато-голубоватого хроматического компонента (подкрашивание).

**Тактика:** произвольна, но обычно локальное выделение заднего плана и манипулирование двумя управляющими слоями «Curves» в режимах «Normal» (понижение контраста заднего плана за счет плавного подъема черной точки и понижения наклона кривой) и «Color» (добавка сине-голубого хроматического компонента). Затруднений не вызывает.

## 1.6. Светотень

Вновь цитата:

«Еще одним весьма эффективным источником информации о расположении поверхностей в глубину пространства является т.н. *светотень* (шейдинг) — колебания количества света, отраженного от поверхности, как результат вариаций положения поверхности относительно источника этого света. Чтобы интуитивно оценить характер такой информации, рассмотрим шар (рис. 13), “изготовленный” из

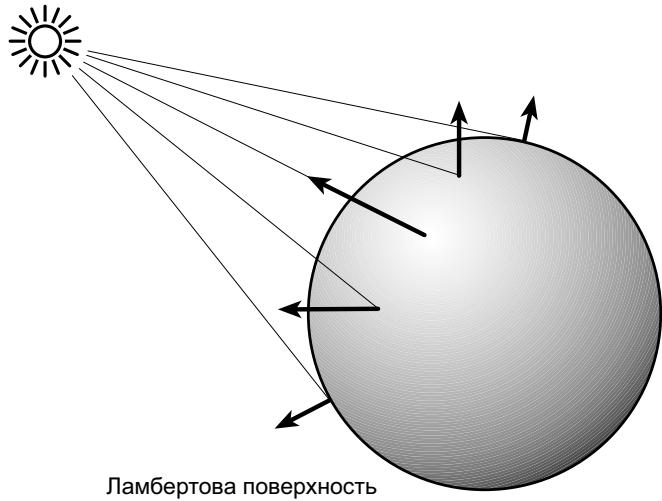


Рис. 13. Реконструкция ориентации поверхности из светотени. Паттерн яркостей световых потоков, отраженных от матовой поверхности, дает зрению информацию о локальном наклоне и локальном повороте этой поверхности.

гомогенного матового материала, равномерно отражающего свет по всем направлениям (т.н. *ламбертова поверхность*) и освещенного единичным точечным источником, удаленным на некоторое расстояние. Мы видим, что наиболее освещенная часть поверхности шара — это место, на которое свет падает по нормали к этой поверхности. По мере отклонения от перпендикуляра количество отраженного света снижается, создавая некий паттерн яркостей. Последний и поставляет зрению информацию о структуре и положении освещенной поверхности.

### 1.6.1. Оценка ориентации

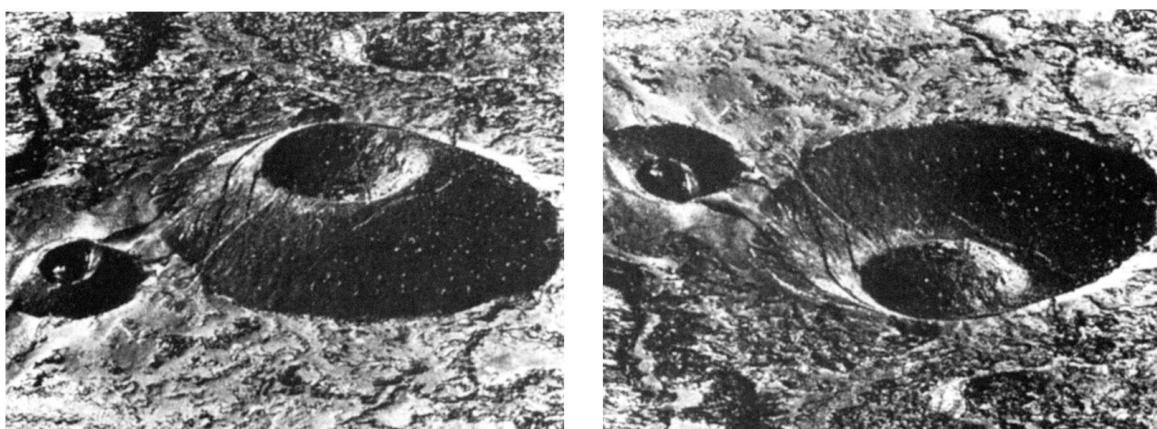
Способность человеческого зрения к реконструкции из яркостных перепадов ориентации поверхности и ее удаления от наблюдателя активно изучалась в конце прошлого века голландцами Жаном Кёндеринком, Андреа ван Дорн и Астрид Капперс (Уtrechtский университет, 1992, 1996). <...>

Исследователи обнаружили, что у разных наблюдателей на удивление схожи качественные визуальные оценки поверхностей, но существенно отличаются количественные, т.е. степень воспринимаемой ими глубины.

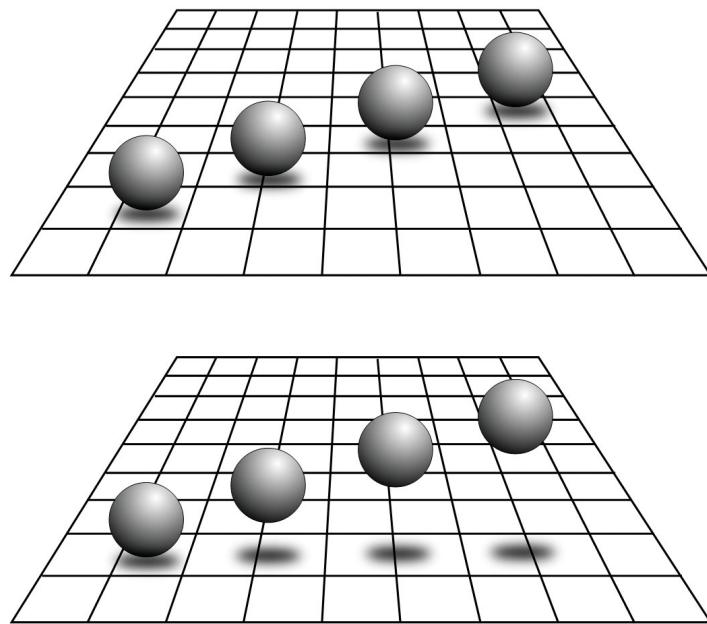
Другим важным выводом явилось то, что зрительная система испытуемых в своем отклике не использует строго локальной информации, но интегрирует данные по крупным областям поверхности объекта.

Оказалось также, что результаты поставленных учеными экспериментов не зависят от узнаваемости предмета, потому что ровно те же реакции испытуемые выдали по абстрактным, неидентифицируемым предметам.

Подобно анализу прочих факторов визуальной глубины пространства и ориентации поверхностей, зрительный анализ светотени в основном строится на эвристических предположениях. И, вероятно, в первую очередь наш мозг имплицитно (неявно) исходит из того, что свет всегда падает сверху. На рис. 14 дан пример поверхности с двумя рядами круглых фигур: фигуры верхнего ряда явно воспринимаются



**Рис. 14.** Направление освещения и восприятие выпуклости/вогнутости. Фигуры на левой картинке смотрятся бугорками, на правой — выемками, поскольку зрительная система всегда предполагает, что источник света сверху. Если мы перевернем страницу, картина изменится на противоположную: выемки справа (переехавшие налево) «превратятся» в бугорки и наоборот.



**Рис. 15.** Демонстрация влияния характера тени на ощущение глубины: верхний и нижний рисунки отличаются только положением теней от шариков.

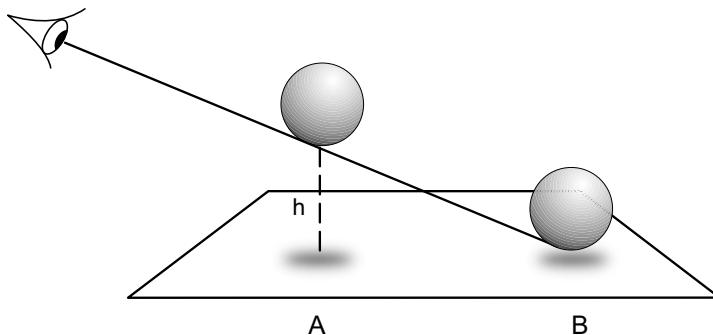
как бугры (выпуклости), а нижнего — как выемки (вогнутости). Фактически такое восприятие адекватно реальности только тогда, когда свет падает сверху (условный источник расположен вверху, но не изображен). Убедиться в этом очень легко, перевернув страницу вверх ногами: это сразу “перевернет” и наше предположение о направлении “освещения”, инвертировав воспринимаемую выпуклость/вогнутость.

Версия о свете, падающем всегда сверху, критична, потому что естественные сцены всегда освещены именно сверху. Следовательно, перед нами еще один пример использования зрительной системой скрытых догадок. <...>

### 1.6.2. Характер теней

Очередным источником информации о глубине пространства является характер наведения тени одного объекта на поверхность другого. На рис. 15 дан пример: пространственные позиции четырех шариков и текстурированной поверхности на первом и втором полях совершенно одинаковы — отличие состоит лишь в положении теней (Kersten, Knill, Mamassian & Bulthoff, 1996). На рис. 15 А тени “приклеены” к низу шариков, указывая на то, что шарики лежат на поверхности. В этом случае они смотрятся диагонально уходящими в глубину — крайний правый явно дальше, чем крайний левый. Однако на рис. 15 В тени по нарастающей убегают от низа шариков, указывая на разную высоту этих шариков над поверхностью. Теперь они воспринимаются диагонально по высоте, но при этом в одной вертикальной (фронтальной) плоскости: крайний правый выше всех, левый — ниже.

Таким образом, характер теней, отбрасываемых одними объектами на поверхность других, несет в себе информацию об удалении этих объектов от наблюдателя: позиция проекции шарика на сетчатку (ретинальная позиция) задает направление от



**Рис. 16.** Визуальная геометрия сцены из рис. 15. Высота ( $h$ ) шарика над его тенью дает зрению информацию о высоте низа шарика над плоскостью, на которую падает тень, характеризуя тем самым позицию шарика на зрительной оси.

наблюдателя (зрительная ось на рис. 16), а расстояние между шариком и его тенью на поверхности дает зрению информацию о высоте низа шарика над поверхностью (которое равно нулю, когда шарик лежит на поверхности и не равно, когда он приподнят над нею). Этих данных достаточно для зрительной диагностики разного расположения шариков по отношению к наблюдателю».

**Стратегия управления светотенью:** повышение визуального контраста изображения до уровня полноценного и оптимизация его визуальной контрастности.<sup>1</sup>

**Тактика** обычно реализуется управляющими слоями «Levels» (управление контрастом изображения) и «Curves» (управление контрастностью).

## 1.7. Края

Если все сказанное ранее о пикториальных факторах в той или иной мере знакомо читателю (мы лишь постарались систематизировать материал и подать его в логике зрительного восприятия глубины пространства), то беседа об экологической классификации краев — это совершенно новый для русскоязычного цветокорректора разговор. Нам предстоит выяснить, на какие категории зрение раскладывает двухмерные контуры в изображениях и тем самым извлекает визуальную информацию о глубине пространства изображенной сцены. Вместе с тем наша цель довольно скромна — во-первых, ввести читателя в курс дела, осветив самою проблематику; во-вторых, подсказать простейшие приемы манипуляции краевой информацией; в-третьих, подтолкнуть к дальнейшему самостоятельному изучению вопроса и самостоятельной работе по созданию индивидуальных алгоритмов этого манипулирования.

Итак, современная экологическая классификация краев как факторов зрительно-го восприятия глубины пространства выглядит следующим образом:

«Еще один важный вид пикториальной информации, на основе которого зрение в том числе делает вывод о глубине пространства, — это информация, извлекаемая посредством краевой интерпретации контуров. Простейший пример мы рассмотрели ранее — это *окклюзия*, или, как еще ее называют, — *интерпозиция*: блок световых потоков, отраженных от одного объекта другим — непрозрачным объектом,

<sup>1</sup> Подробнее о понятиях «контраст» и «контрастность» см. А. Шадрин. «Воспитание по доктору Маргулису. Работа над ошибками».

расположенным ближе к наблюдателю. К примеру, рис. 17 мы однозначно воспринимаем как квадрат позади круга, частично этим кругом закрытый. Все, что фактически представлено в стимуле, — это некая конфигурация двухмерных областей, ограниченных контурами. Но контуры эти мы воспринимаем еще и как указание на отношения по глубине: круг перед квадратом.

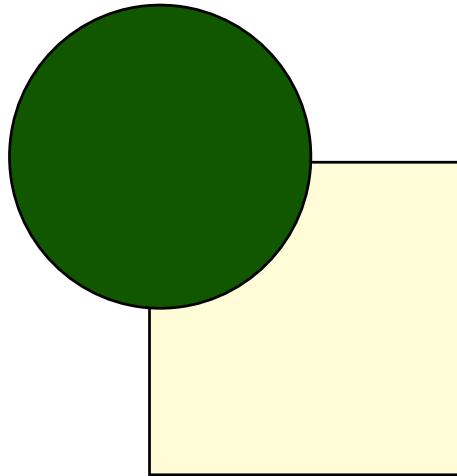
Как источник информации о глубине края имеют сильные и слабые стороны.

Слабая сторона заключается в том, что краевая информация — относительна, а не абсолютна; а также качественна, но не количественна. То есть края информируют наше зрение только о *порядковых* отношениях по глубине: мы видим, что квадрат дальше круга, но при этом не знаем насколько.

Сильная же сторона в том, что краевая информация доступна зрению практически в неограниченном диапазоне расстояний. Единственное требование при этом, чтобы предметы находились в поле зрения и чтобы ближний (кроющий) был непрозрачен.

Итак, вопрос, который мы задаем себе в этом разделе, звучит так: “Откуда в контурах двухмерного изображения на сетчатке берется информация о глубине сцены и каким образом зрение извлекает ее?”

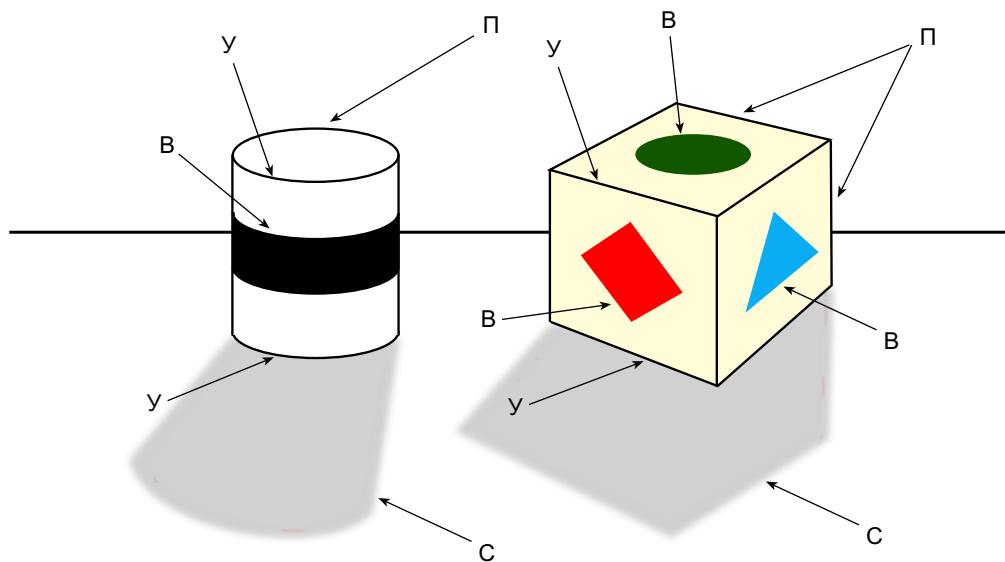
Вспомним концепцию краевой интерпретации в рамках *блочного мира (мира из кубиков)*, применяемой в машинном зрении. Цель этой концепции — найти оптимальную интерпретацию всех контуров в изображении блочной сцены. Контуры формируются на сетчатке разными путями, и выходной продукт алгоритма контурной интерпретации — это сортировка краев в логике их источников во внешней среде: некоторые образуются в результате окклюзии одной поверхности другой поверхностью, некоторые — в результате стыка поверхностей, третий — от тени, падающей на поверхность, и т.д. Эти отличия весьма важны в контексте трактовки пикториальной информации в размерность глубины пространства, поскольку некоторые варианты этой трактовки могут оказаться весьма специфичными. К примеру, если край А частично закрывает край В, то А неизбежно окажется ближе к наблюдателю, чем В.



**Рис. 17.** Частичная окклюзия (перекрытие) как фактор визуальной глубины пространства. Когда один объект частично закрывает другой, кроющий объект воспринимается как расположенный ближе к наблюдателю.

### 1.7.1. Типы краев

Вспомним, что на ранних этапах зрительного акта на сетчатке формируется оптическое изображение, в котором контуры — то есть выраженные перепады фотометрической яркости — четко идентифицированы. Проще говоря, что входные данные



**Рис. 18.** Четыре вида краев. В данной сцене наличествуют яркостные края четырех типов: угловые края (У), возникающие из-за смены направления поверхности; пространственные края ( $\Pi$ ), образующиеся благодаря зазору между поверхностями; вещественные края (В), происходящие из смены коэффициента отражения поверхности; световые края (С) — плод светотени.

алгоритма краевой интерпретации — это идеальное контурное представление всех краев сцены. Наша задача состоит в том, чтобы интерпретировать их в логике экологической ситуации, породившей эти края.

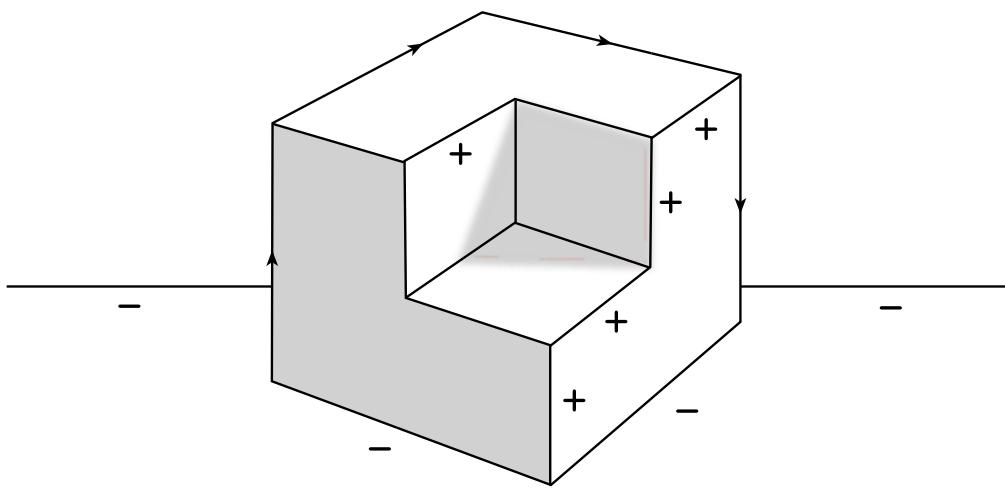
Вначале выделим четыре основных варианта возможной краевой интерпретации:

**1. Угловые края.** Относятся к участкам сцены, в которых имеет место смена положения (ориентации) поверхности. Такие края образуются, когда две поверхности разных ориентаций стыкуются в пространстве. Обычно это собственные края каких-то объектов (например, кубика) или линии соприкосновения предметов (например, кубика, стоящего на столе). Примеры угловых краев даны на рис. 18 (отмечены “У”).

**2. Пространственные края.** Относятся к тем участкам сцены, где имеется разнос поверхностей по глубине, то есть когда одна поверхность закрывает другую, но при этом находится перед нею на некоем расстоянии. Если поверхности соприкоснутся, то пространственный край превратится в край угловой. Пример пространственных краев на рис. 18 с меткой “ $\Pi$ ”.<sup>1</sup>

**3. Световые края.** Образуются там, где имеется отличие в количестве света, падающего на гомогенную (равномерно окрашенную) поверхность. Световые края могут появиться там, где на поверхность ложится тень, где есть рефлексы от глянцевых поверхностей, направленные световые пятна (скажем, на театральной сцене), либо же при смене ориентации поверхности. Примеры световых краев даны на рис. 18 с меткой “С”.

<sup>1</sup> Отметим, что угол между гранью куба и поверхностью, на которой он находится, — это угловой край, но не пространственный, даже несмотря на то, что поверхности принадлежат разным объектам и что поверхность стола частично закрыта этим кубом. Причина в том, что между кубом и столом нет собственно пространства — они *соприкасаются*, образуя угол.



**Рис. 19.** Выпуклые и вогнутые угловые края. Выпуклые края (помечены “+”) появляются, когда две поверхности образуют внутренний угол меньший  $180^\circ$ . Вогнутые края (помечены “-”) возникают, когда поверхности образуют угол больший  $180^\circ$ . Стрелки указывают на то, что ближняя к наблюдателю поверхность, образующая пространственный край, — справа.

**4. Вещественные края.** Результат изменения в отражательной способности поверхности. Вещественные края образуются тогда, когда поверхности состоят из разных материалов или по-разному покрашены. Наиболее простой пример — полоса, проведенная маркером на листе бумаги. Примеры вещественных краев даны на рис. 18 с меткой “B”.

### 1.7.2. Подвиды краев

Угловые и пространственные края в объектах с плоскими поверхностями — суть взаимное исключение. Если контур на сетчатке — это плод соприкосновения двух поверхностей разной ориентации в реальной сцене, — сие угловой край; если край образован за счет того, что одна поверхность закрывает другую, но с неким пространственным зазором, — это край пространственный. Следовательно, в контурном представлении каждый край является либо угловым краем, либо пространственным и может быть однозначно отнесен либо к первому, либо ко второму. Цель концепции краевой интерпретации — исследовать процесс, приводящий каждый контур оптического изображения на сетчатке в соответствие фактическим краям реальной сцены.

При этом нам понадобится деление угловых и пространственных краев на два подвида.

**Выпуклые и вогнутые угловые края.** Угловые края делятся на два подвида — *выпуклые* и *вогнутые* — и несут важную информацию о глубине края относительно поверхностей.

*Выпуклые угловые края* появляются тогда, когда две поверхности, соприкасаясь, образуют заполненный объем, соответствующий двугрannому углу меньшему  $180^\circ$ . Краевой угол направлен к наблюдателю, как, скажем, угол куба снаружи. Выпуклые углы показаны на рис. 19 линиями, отмеченными “+”.

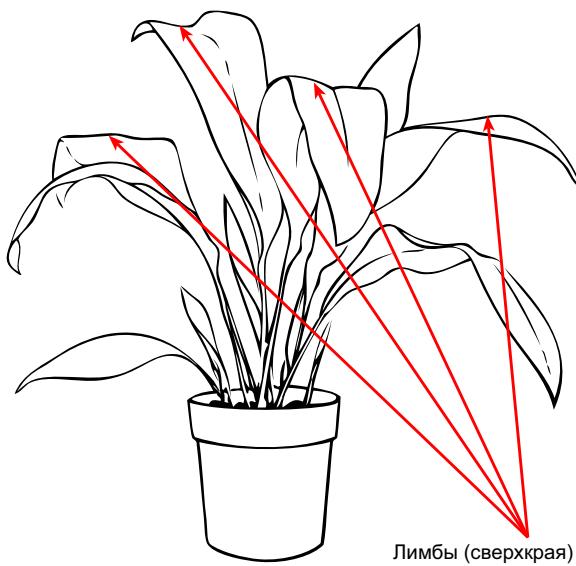


Рис. 20. Пример естественных лимбов (отмечены красными стрелками).

рных подчиняется правилу правой руки: кроющая (ближняя поверхность) всегда расположена справа, а кроемая (далняя) — слева. Сии два возможных варианта деления пространственных краев взаимоисключающие, поскольку кроющий контур может располагаться только с одной стороны. Отметим, что правильное деление несет очень важную информацию о глубине, т.к. устанавливает, какая поверхность ближе, какая дальше.

До уровня искривленных объектов наше понимание краевой интерпретации продвинул американец Джинтендра Малик (университет Беркли, США). Его анализ потребовал выделения нового вида пространственных краев, именуемого *сверхкрайем* или *лимбом*. Лимб образуется тогда, когда искривленная поверхность частично закрывает сама себя (рис. 20). Лимбы мы отмечаем двойными стрелками, опять же по правилу правой руки. Искривленные объекты весьма усложняют алгоритм краевой интерпретации, поскольку физически один и тот же край может по-разному толковаться на различных своих участках. Пространственный край, к примеру, может перейти в выпуклый угловой край, что четко видно по верхнему контуру объекта на рис. 21.

### 1.7.3. Отличие световых краев от вещественных

Несмотря на сказанное выше, в цепочке наших рассуждений по-прежнему отсутствует

*Вогнутые угловые края* появляются тогда, когда две поверхности, соприкасаясь, образуют заполненный объем, соответствующий двугрannому углу большему  $180^\circ$ . Краевой угол направлен от наблюдателя, как внутренние края полого куба при рассматривании его изнутри. Вогнутые края отмечены на рис. 19 знаком “—”.

В простых трехгранных планарных объектах каждый угловой край — либо выпуклый, либо вогнутый. Но никогда вогнуто-выпуклый.

**Правые и левые пространственные края.** Пространственные края также делятся на два подвида: у одних кроющая поверхность находится на одной стороне угла, а у вторых — на другой. Пространственные края помечены на рис. 19 стрелками, направление которых подчиняется правилу правой руки: кроющая (ближняя поверхность) всегда расположена справа, а кроемая (далняя) — слева.

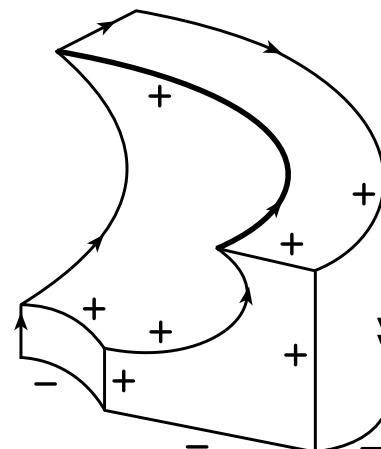


Рис. 21. Интерпретация краев искривленных объектов. Переход пространственного края в выпуклый угловой отмечен утолщенной линией; лимб (сверхкрай), образуемый искривленными поверхностями, кроющими сами себя, — двойной стрелкой.

одно звено, а именно ответ на вопрос: “Каким образом зрительная система определяет, какой край в сцене образован отличиями в освещенности поверхности, а какой отличиями в отражательной способности двух поверхностей?”. Существует несколько эвристических посылов, позволяющих реализовать сие критично важное отличие: *нерезкость, планарность, краевой контраст и хроматика*.

**Нерезкость.** Световые края, образованные тенями или световыми пятнами, обычно слегка размыты. В отсутствие обратной информации зрительная система предполагает, что острый край между соплоскостными областями — это край вещественный. К примеру, если неподвижное световое пятно с острым краем положить на равномерно окрашенную поверхность, зрительная система автоматически интерпретирует его как область с повышенным коэффициентом отражения на фоне с пониженным коэффициентом.

**Планарность.** Если информация об удалении объектов от наблюдателя указывает на то, что две области не кoplanарны, т.е. лежат в разных плоскостях, — край между ними воспримется скорее как световой, а не вещественный, даже если окажется острым. (Поскольку плоскости разной глубины расположения и/или ориентации обычно по-разному освещены.)

**Краевой контраст** — величина отношения фотометрических яркостей на крае. Световые края обычно дают намного больший перепад яркостей, нежели края вещественные: поверхность высокой белизны, как правило, отражает не более 90% падающих на нее фотонов, а глубоко черная не менее 10%. Следовательно, соотношение коэффициентов отражения обычно не превышает 10:1. При этом перепад освещенностей поверхностей при их затенении может составлять 1000:1 и более. Таким образом, если соотношение яркостей на крае порядка 10:1 и выше, то эвристика срабатывает в пользу отличий по освещенности.

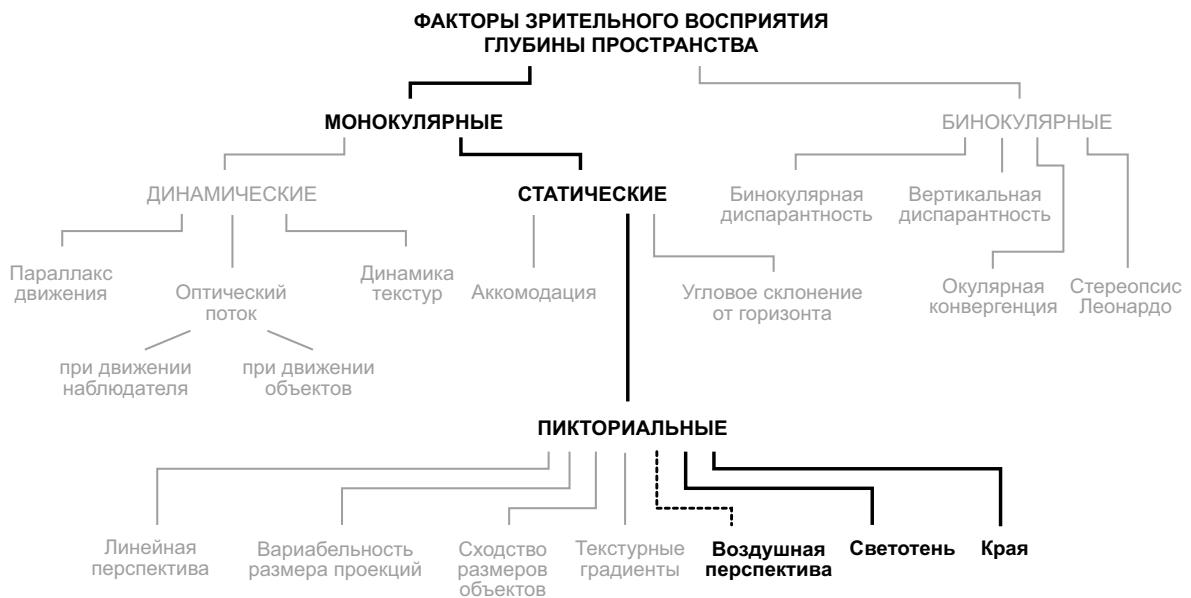
**Хроматика** также помогает зрительной системе различать световые и вещественные края. Главным фактором, вероятнее всего, является то, что отличия в освещенности всегда оставляют неизменными цветовой тон и отчасти насыщенность, тогда как отличия в коэффициентах отражения обычно влекут за собой и хроматические отличия (т.е. отличия и по цветовому тону, и по насыщенности). В целом, если цветовой тон или насыщенность варьируются по сторонам края, то, вероятнее всего, — это вещественный край; если меняется только светлота, то это скорее край световой».

**Стратегия управления:** управление краями в изображении — это управление яркостными контрастами. Много реже — контрастами хроматическими. Обычно корректор стремится несколько повысить яркостный контраст на краях того или иного типа с целью усиления зрительной стимуляции и, следовательно, усиления ощущения объемности изображения.

**Тактика:** управление осуществляется либо с помощью инструмента «Unsharp Mask», либо силами специальных плагинов (например, «Topaz Detail 2.0»). Подробно стратегию и тактику манипуляции краями мы рассмотрим в разделе 3.2.

## 1.8. Что остается?

Теперь, когда наше краткое знакомство с пикториальными факторами визуальной глубины пространства завершено, давайте подытожим, какие из них поддаются управлению post factum, то есть постобработке в графическом редакторе. Просмотрев



**Рис. 22.** Факторы зрительного восприятия глубины пространства, поддающиеся редакции при обработке изображения (отмечены черным).

концовки параграфов текущего раздела, обнаружим, что из списка были исключены линейная перспектива, вариабельность размера проекций, сходство размеров объектов и текстурные градиенты — четыре фактора из семи.<sup>1</sup>

Осталось три: воздушная перспектива, светотень и края (рис. 22).

Стратегия и тактика манипулирования воздушной перспективой очень просты, в целом нами уже описаны (см. конец раздела 1.5), и что-либо существенное добавить сложно. Стало быть, мы сосредоточимся на последних двух факторах: *светотени и краях*.

В контексте управления светотенью и краевой (контурной) информацией, мы говорим о **манипулировании яркостным контрастом** как главным фактором зрительной стимуляции. Казалось бы, раз речь идет об управлении одним и тем же параметром, то и инструментарий этого управления должен быть одним и тем же или, по крайней мере, может быть одним и тем же. Однако имеется обстоятельство, принципиально отличающее светотень как фактор глубины при восприятии изображения от картины контуров в этом изображении. Это обстоятельство — *пространственная частота*, по

<sup>1</sup> Обратим внимание на то, что в списке изначально не значился такой популярный у современных фотографов и кинематографистов «фактор» зрительной глубины пространства, как нерезкость заднего плана (боке). Действительно, боке никоим образом не рассматривается наукой о зрении как фактор визуальной глубины. Однако если сосредоточить взгляд на ближнем объекте, скажем пальцах вытянутой вперед руки, а внимание — на объектах удаленных, то легко обнаружить мощное оптическое размытие последних. Чем объяснить очевидное противоречие? Дело в том, что зрительный акт — процесс динамический, процесс, в котором имеет место постоянная перефокусировка с одних объектов на другие, в результате чего участки нерезкости никак не фиксируются в сознании. Более того, даже на ранних, бессознательных этапах зрительного акта, нерезкость используется, судя по всему, лишь как пусковой механизм аккомодации, то есть — наводки на резкость (Wandell, 1995).

которой проходит яркостно-контрастная зрительная информация. Таким образом, прежде чем переходить к разговору о тактике и собственно методике манипулирования светотенью и картиной контуров в изображении (напомним: с целью усиления эффекта визуального объема этого изображения), два слова о пространственно-частотном анализе изображений и о взаимосвязи пространственных частот с интересующими нас оставшимися двумя факторами визуальной глубины пространства.

## 2. ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ

Принято считать, что любое изображение (в том числе и проекционное изображение сцены на сетчатке глаза) можно разложить на пространственно-частотные составляющие, т.е. представить его как совокупность т.н. *синусоидальных решеток*. В данном контексте синусоидальная решетка рассматривается нами как элементарная составляющая изображения — его *примитив*. Вот какова по этому поводу позиция официальной науки — науки о зрении человека и животных (Palmer, 1999; Wandell, 1995):

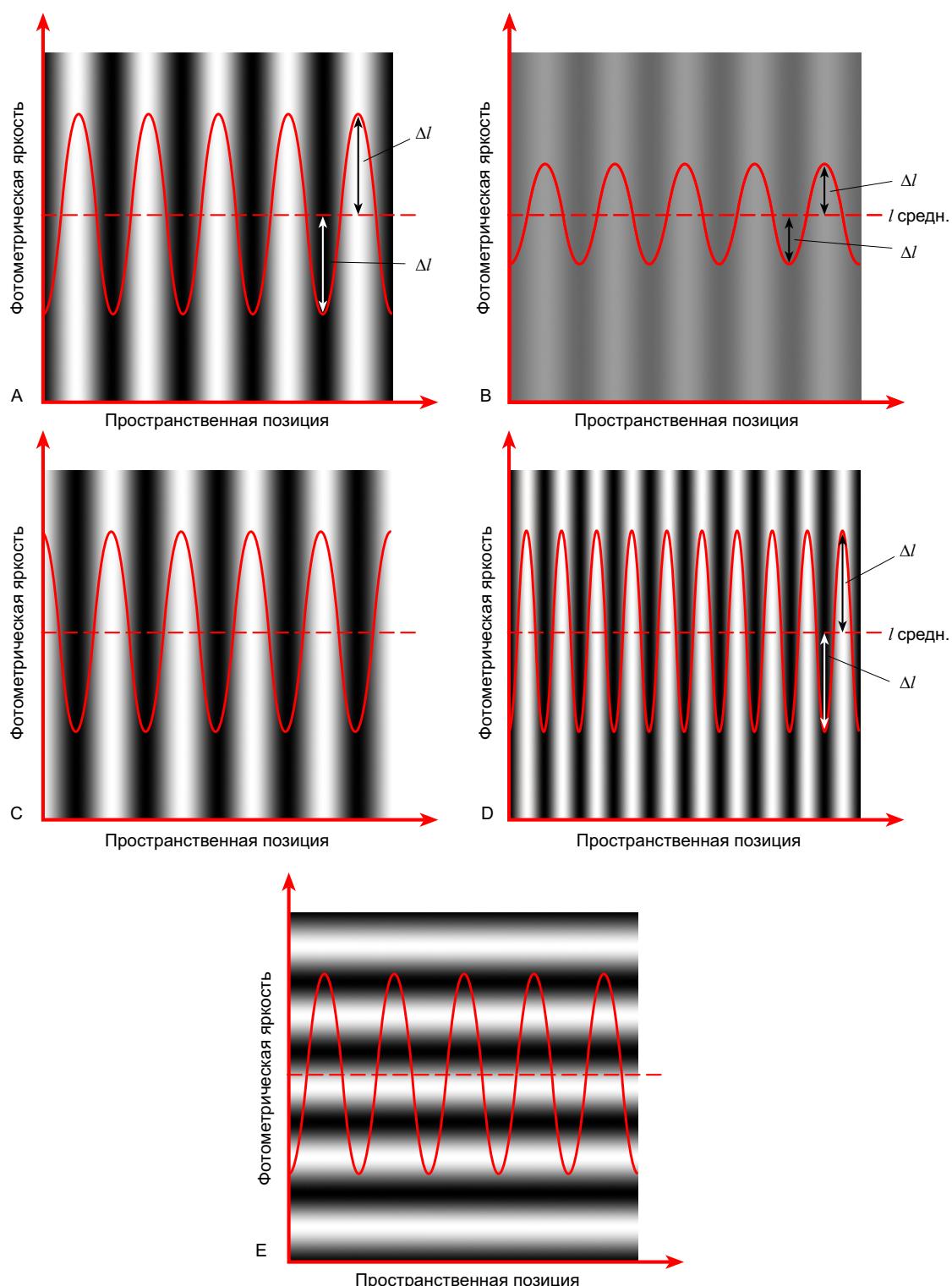
«<...>изучая пространственное зрение человека и животных, мы для собственного удобства берем примитивные стимулы, которые могут послужить кирпичиками в конструкции стимула комплексного, сложного. К роли таких кирпичиков годны т.н. *синусоидальные волновые решетки*. На рис. 23 (сл. стр.), показано несколько решеток параллельно с их яркостными профилями. Каждая решетка состоит из чередующихся темных и светлых прутьев. Отметим, что пики яркостного профиля соответствуют светлым прутьям, а впадины — темным. Переход от светлых прутьев к темным мы назовем *градуальным*, т.е. плавным. При этом для полной характеристики синусоидальной решетки необходимо определить ее частоту, контраст, фазу и ориентацию.

Также как и гипотеза о клетках-детекторах краев и линий, теория пространственных частот в контексте оптического этапа зрительного восприятия базируется на том атомистическом предположении, что представление любого изображения на сетчатке, каким бы сложным оно ни было, есть совокупность множества пространственных примитивов — “атомов”. Однако примитивы в теории пространственных частот весьма отличны от краев и линий, рассмотренных нами в предыдущем разделе. Здесь мы говорим о синусоидальных решетках — двухмерных пространственно протяженных стимулах, фотометрическая яркость которых синусоидально меняется по одной пространственной размерности, но постоянна по перпендикулярной (рис. 23). Сразу обратим внимание на то, что темные и светлые штрихи выглядят расфокусированными из-за плавного изменения яркости по мере продвижения по решетке (на что указывают плавные волны кривой графика).

Итак, каждая синусоидальная решетка характеризуется четырьмя параметрами: *пространственной частотой, ориентацией, контрастом и фазой*.

**Частота.** Сравним две решетки во втором ряду рис. 23: в правой явно больше вариаций, чем в левой, и мы говорим, что пространственная частота правой решетки выше. Т.е. пространственная частота синусоидальной решетки — это показатель, определяющий ширину светлых и темных штрихов (при низкой частоте штрихи шире; при высокой — уже). <...>

**Контраст.** На рис. 23 В показана решетка низкого контраста параллельно со своим яркостным профилем; слева (рис. 23 А) дана решетка той же пространственной час-



**Рис. 23** Синусоидальные решетки и соответствующие им яркостные профили. А — исходная решетка; В — решетка той же частоты, но меньшего контраста; С — решетка той же частоты, но другой фазы; Д — решетка большей частоты, но того же контраста; Е — решетка той же частоты, того же контраста, но иной ориентации.

тоты, но большего контраста. Пунктирной линией обозначена средняя фотометрическая яркость решетки (среднее арифметическое между верхним и нижним экстремумами). Несмотря на то что средняя яркость ( $l_{ave}$ ) у обеих решеток одинакова, у левой больше разница между пиками и средним значением, что указывает на больший контраст этой решетки.

Итак, контраст можно определить следующим уравнением:

$$contrast = \frac{\Delta l}{l_{ave}}$$

где  $\Delta l$  — отличие между пиковым и средним значениями, а  $l_{ave}$  — средняя фотометрическая яркость решетки (среднее арифметическое между максимальной и минимальной яркостями).

Несмотря на то что приведенное уравнение весьма удобно в определении понятия “контраст”, оно непрактично в измерении контраста. Практичнее замерять максимальное ( $l_{max}$ ) и минимальное ( $l_{min}$ ) значения яркости. Общепринятая формула выглядит так:

$$contrast = \frac{l_{max} - l_{min}}{l_{max} + l_{min}}$$

где:

$$\begin{aligned} l_{max} &= l_{ave} + \Delta l \\ l_{min} &= l_{ave} - \Delta l \end{aligned}$$

Кстати говоря, заменив  $l_{max}$  и  $l_{min}$ , получим:

$$\frac{(l_{ave} + \Delta l) - (l_{ave} - \Delta l)}{(l_{ave} + \Delta l) + (l_{ave} - \Delta l)} = \frac{\Delta l}{l_{ave}}$$

**Фаза и ориентация.** О фазе синусоидальной решетки говорят в контексте ее сравнения с другой решеткой, к примеру: если две решетки одинаковой пространственной частоты *синфазны* — верхние и нижние экстремумы их яркостных профилей совпадут; если решетки находятся в *противофазе* — верхний экстремум одной решетки совпадет с нижним другой решетки. <...>

Решетка С на рис. 23 отличается от решетки А своей фазой.

*Ориентация решетки* — это угол поворота штрихов решетки против часовой стрелки от вертикали.

На рис. 23 решетка Е отличается от всех остальных горизонтальной ориентацией.

**Анализ Фурье.** Через математический процесс, именуемый *анализом Фурье*, синусоиды определенной частоты, контраста, фазы и ориентации можно использовать для построения гораздо более сложных зрительных стимулов, чем собственно яркостная синусоида. Хотя сие и неочевидно, но любую сцену — дом, лес, лицо чело-



Жан Батист Жозеф Фурье  
(1768 — 1830)

дать стимул, визуально не отличимый от квадратно-волнового (а добавив бесконечное число нечетных гармоник, можно построить даже физически идентичную квадратную волну). Создание квадратной волны и создание, скажем, изображения лица человека — бесконечно далеки друг от друга, но оба принципа применимы и в первом, и во втором случаях.

Итак, мы договорились полагать синусоидальные решетки примитивами (атомарными элементами) пространственного зрения. Однако же мы не оцениваем что-либо нами увиденное как состоящее из синусоидальных решеток. Если бы осознание было необходимым условием придания зрительным элементам статуса примитивов, то оно в первую очередь касалось бы линий и краев, а не синусоидальных решеток, поскольку линии и края мы осознанно воспринимаем в естественных сценах. Однако нет никаких оснований предполагать, что на ранних этапах пространственного зрения примитивные элементы должны осознаваться.<...>

У выбора синусоидальных решеток в качестве примитивов существует прочное теоретическое ос-

тавление и т.д. — можно представить как совокупность синусоид определенной частоты, контраста, фазы и ориентации.

Рассмотрим квадратно-волновую решетку рис. 24: ее яркостный профиль демонстрирует резкий переход от черных прутьев к белым, что часто называют *шаговым изменением* фотометрической яркости. Подобно любому другому пространственно сложному стимулу квадратную волну можно построить, собрав вместе соответствующие синусоиды — рис. 25 (сл. стр.). Синусоида той же пространственной частоты, что и у самой квадратной волны, именуется *базовой*. Синусоиды больших частот — *гармониками* (у третьей гармоники частота в три раза больше базовой, а контраст составляет одну третью; у пятой гармоники частота в пять раз больше базовой и в пять раз меньший контраст и т.д.). Добавляя к базовой волне только нечетные гармоники, можно создать

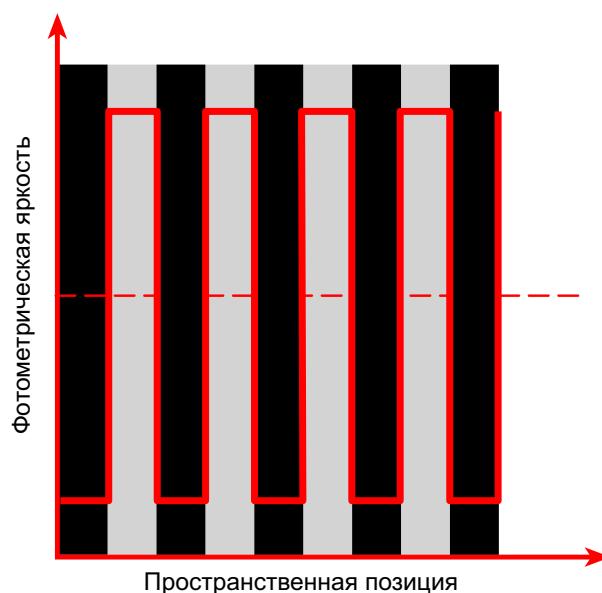
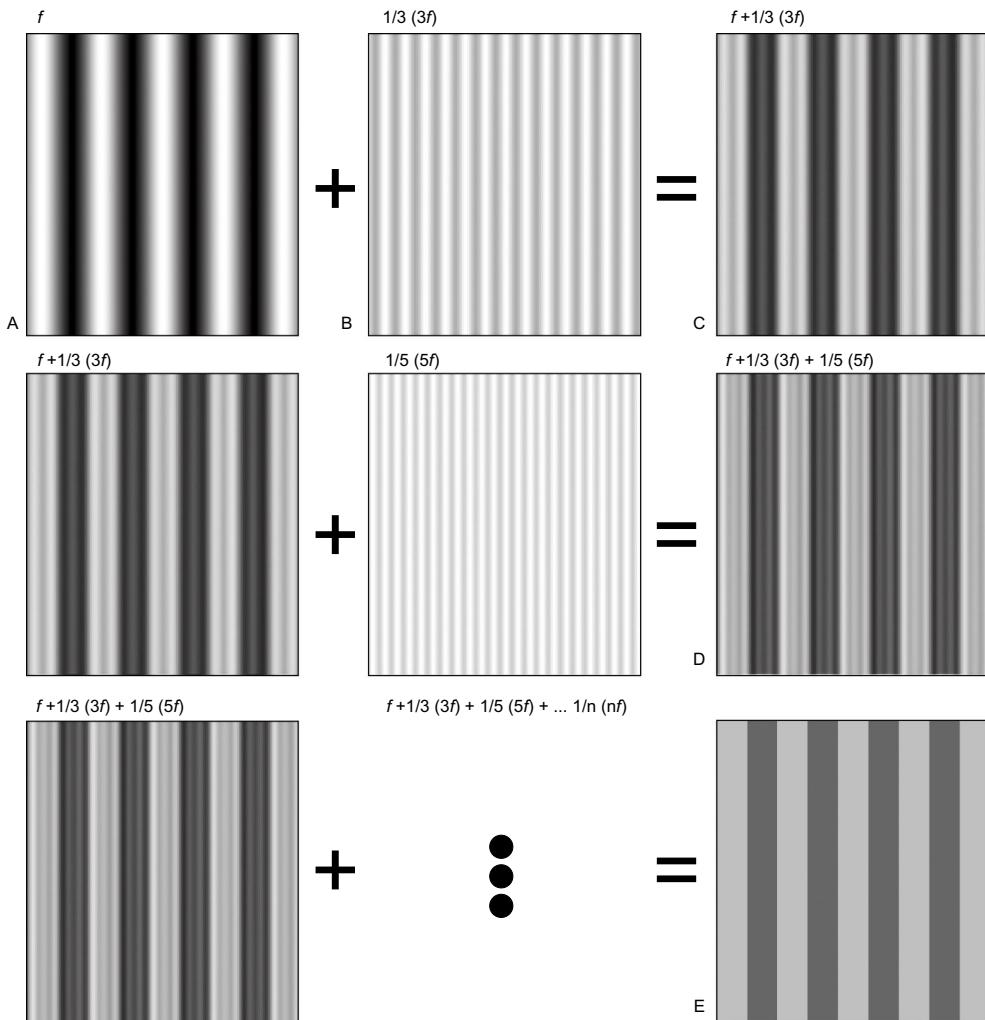


Рис. 24. Квадратно-волновая решетка (серо-черные полосы) и ее яркостный профиль (красная линия).



**Рис. 25.** Создание квадратной волны из синусоидальных компонент. А — синусоидальная решетка с базовой частотой ( $f$ ) квадратной волны. В — решетка с частотой третьей гармоники ( $3f$ ) и одной третьей контраста. Сложив решетки А и В, получаем решетку С. Добавив пятую гармонику ( $5f$ ) на одной пятой контраста получаем решетку D. Сложив все нечетные гармоники с соответствующими амплитудами и фазами, получим квадратную решетку Е.

нование, но оно скорее формально математическое, нежели экспериментальное. Логика рассуждений здесь основана на хорошо известной и широко применяемой математической *теореме Фурье*, названной так в честь выдающегося французского математика и физика Жана Батиста Жозефа Фурье, сформулировавшего эту теорему в 1822 г. в работе “Аналитическая теория тепла”.<...>

В приложении к вопросу обработки изображений:

⇒ *Фурье-анализ* (или, как его еще называют, *гармонический анализ*) — это основанный на теореме Фурье метод, с помощью которого любое двухмерное оптическое изображение можно рассматривать как совокупность синусоидальных решеток, отличающихся по частоте, ориентации, контрасту и фазе.



Рис. 26. Образование клетчатой решетки из двух решеток разных ориентаций.

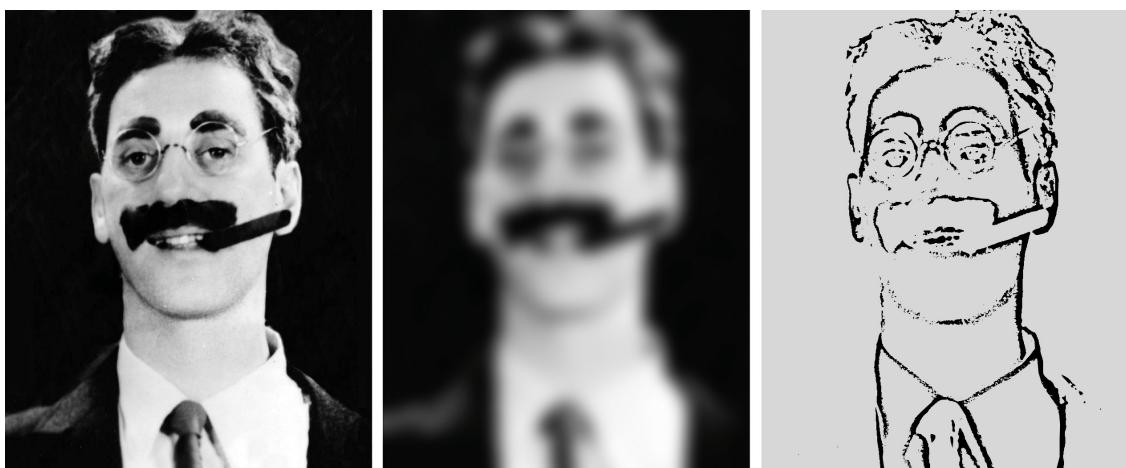


Рис. 27. Пространственно-частотное содержимое сложного изображения: портрет Гручо Маркса (слева) разложен на низкочастотную составляющую (в середине) и высокочастотную (справа). Низкие частоты несут в себе общую картину светов и теней; высокие — информацию о локальных контрастах на краях объектов.

Два простых примера проиллюстрируют то, как синусоидальные решетки, объединяясь, образуют более сложные стимулы: на рис. 25 серия синусоидальных решеток одной ориентации и пространственных частот  $f$ ,  $3f$ ,  $5f$  и т.д. собраны вместе при определенных соотношениях амплитуды и фазы, дабы получить прямоугольную волну с острыми краями (а не с размытыми, как у исходных решеток); на рис. 26 показано, как две таких волны в разных ориентациях образуют клетчатый паттерн.

Разумеется, Фурье-анализ не ограничивается этими простыми, регулярными паттернами — его можно применить к сложным изображениям объектов, людей и даже полноценных сцен. Хотя мы не можем показать, как строятся такие сложные изображения из отдельных синусоидальных компонент (потребуется очень большое число решеток), мы можем продемонстрировать, какой вид пространственной информации передается различными пространственными частотами. На рис. 27 дан портрет Гручо Маркса<sup>1</sup> вместе с двумя версиями этого портрета: одна не-

<sup>1</sup> Гручо Маркс (Groucho Marx) знаменитый американский кинокомик первой половины XX века. Настоящее имя Джюлиус Генри Маркс. — Прим. пер.

сет только низкие пространственные частоты, другая — только высокие. Четко видно, что низкие частоты в центре изображения передают его грубый пространственный компонент (светлые и темные области), тогда как высокие пространственные частоты на правом изображении несут информацию о тонких элементах портрета (таких, как острые края и мелкие детали).

Фурье-анализ изображения слагается из двух частей: из спектра мощности и фазового спектра. Спектр мощности характеризует контраст каждой слагающей изображение решетки, а фазовый спектр — фазу. Когда все эти решетки собраны вместе, они воссоздают оригинальное изображение.

Таким образом, Фурье-анализ — это универсальный метод декомпонирования сложных изображений на примитивные составляющие, поскольку доказано, что он приложим к любому изображению». <...>

### ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ

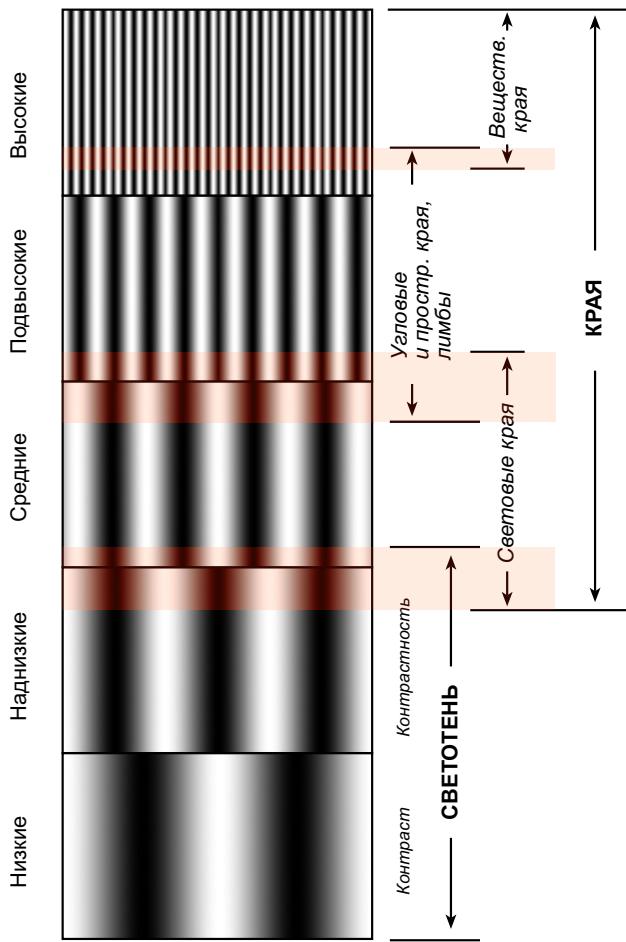


Рис. 28. Распределение управляемых факторов визуальной глубины по пространственным частотам. Красными полосами отмечены зоны возможного конфликта при управлении.

## 2.1. Иерархия пространственных частот и факторы визуальной глубины

Теперь, когда мы в общих чертах познакомились с концепцией пространственно-частотного анализа изображений, постараемся понять, к какой группе пространственных частот относятся еще два фактора зрительной глубины, что поддаются редакции при постобработке.

На рис. 27, заимствованном из книги С. Пальмера, портрет Груcho Маркса разложен всего лишь на две составляющих — низко- и высокочастотную. Однако столь примитивное деление подходит скорее для академической иллюстрации вопроса, но явно недостаточно для производственных нужд. На наш взгляд, пространственные частоты в фотопрералистичных изображениях можно (и нужно) разложить как минимум на пять групп: *низкие, наднизкие, средние, подвысокие и высокие* (рис. 28).

Разумеется, предлагаемая классификация сугубо относительна, интуитивна и в

приложении к практическим задачам цветокоррекции не может формулироваться в абсолютных показателях — у корректора нет ни времени, ни технической возможности оценивать элементы изображений в циклах на градус зрительного угла.

По низким пространственным частотам проходит информация об общем фотометрическом контрасте изображения (не считая лишь самых крайних его позиций — черной и белой точек, которые, как правило, оказываются в зоне более высоких частот).

По наднизким частотам идет тоновая информация, обычно относимая нами к контрастности — перепадам яркости в зоне средних тонов.

Разумеется, нет жесткой границы между тональной информацией, идущей по низким и наднизким пространственным частотам, более того: и первую, и вторую мы относим к категории светотеневого рисунка изображения — светотени — и говорим, что светотень (как фактор глубины) ложится на низкие и наднизкие пространственные частоты.

В чём распоряжении оказываются оставшиеся три группы пространственных частот: средние, подвысокие и высокие? Судя по всему, нет альтернатив тому соображению, что на этих частотах властуют края: световые занимают область средних пространственных частот, вероятно, отчасти захватывая частоты наднизкие и частично подвысокие; на подвысоких частотах доминируют края угловые и пространственные, а также лимбы; область высоких частот — царство вещественных краев (рис. 28).

### 3. УПРАВЛЕНИЕ ФАКТОРАМИ ВИЗУАЛЬНОЙ ГЛУБИНЫ ПРОСТРАНСТВА

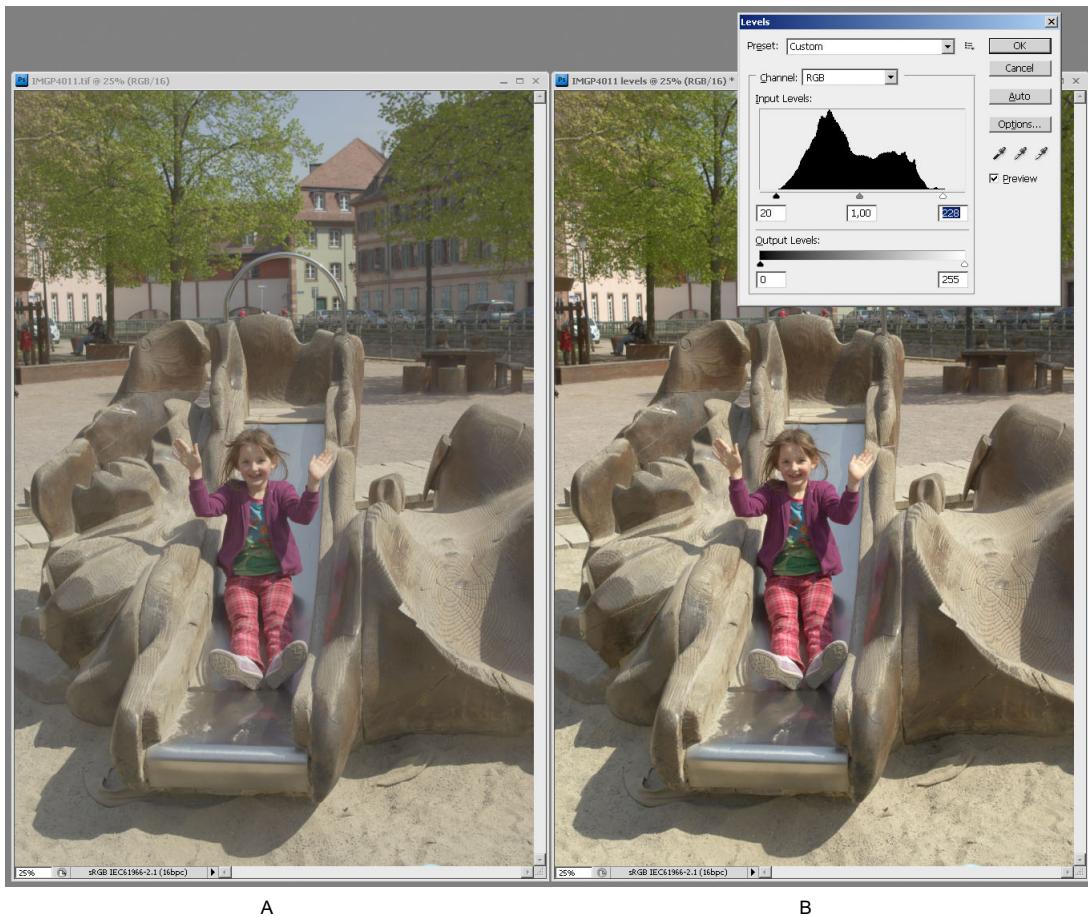
Итак, мы успешно добрались до момента, когда можно применить полученное знание на практике. Разумеется, разговор о манипуляциях факторами визуальной глубины пространства мы поведем на конкретном примере — фотографическом захвате зарядной уличной сцены, выполненном простейшей цифровой фотокамерой Pentax K10 с зум-объективом 28-70/2.8 AL.

RAW-файл, записанный камерой, был дебайеризован, пересчитан в стандартное трихроматическое пространство sRGB и сохранен в виде TIFF-файла программой Capture One 5.x.x при полностью отключенных «улучшайзерах», отключенном шаринге и в линейном режиме тоновой кривой (рис. 29 А). Словом, «as shot». ICC-описание сцены не применялось. Хроматический баланс изображения объявим идеально нейтральным (по Эвансу).

#### 3.1. Светотень

Восприятие яркостных контрастов на низких и наднизких пространственных частотах является базисом зрения и проходит на ранних этапах зрительного акта. Поэтому грамотно определить тональные взаимоотношения на этих частотах — первейшая задача цветокорректора. Стало быть, мы говорим о манипулировании фотометрическим/визуальным контрастом изображения (обычно реализуется инструментом «Levels») и его фотометрической/визуальной контрастностью (обычно реализуется инструментом «Curves»).

В реальной сцене захват зрительной системой визуальной информации по низким и наднизким пространственным частотам осуществляется всей поверхностью сетчатки и задействует весь арсенал фоторецепторов — колбочек (палочки в условиях днев-

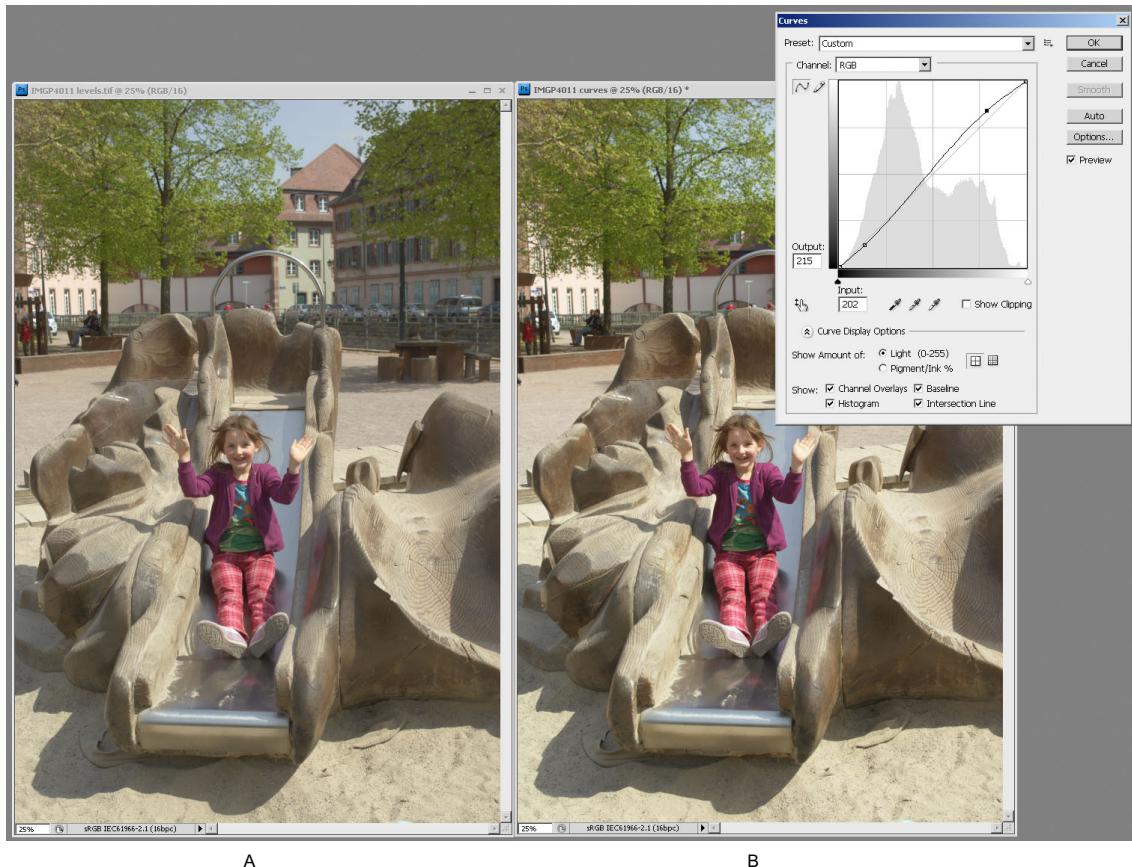


**Рис. 29.** А — исходное изображение после RAW-конверсии. В — изображение, контраст которого усилен по низким пространственным частотам. Подтягивание ползунков инструмента «Levels» к краям яркостной гистограммы обеспечивает заполнение диапазона яркостей, приводя изображение к полноценному визуальному контрасту. Достижение изображением полноценного визуального контраста — первый шаг в повышении визуального объема картинки.

ногого зрения заторможены), а следовательно, в анализатор поступает максимально возможный сигнал.<sup>1</sup>

Изображение же сцены является лишь *фрагментом* другой сцены — сцены, в которой это изображение рассматривается. Поэтому при разглядывании картинки весь колбочковый ресурс не задействуется, и относительная мощность сигнала оказывается ниже (если только изображение не воспроизведено в натуральную величину и не освещено потоком сопоставимой яркости). Плюс к тому, в подавляющем большинстве случаев, изображение рассматривают в условиях низкой освещенности, т.е. много меньшей, чем освещенность исходной сцены. И первое, и второе ведет к нехватке зрительной стимуляции и, следовательно, к необходимости ее усиления при коррекции. Нехватка стимуляции видна на примере сырого, необработанного изображения (рис. 29 А): его визуальный контраст недотягивает до уровня полноценного, его визуальная контрастность неадекватна нашим представлениям о *подобных* сценах (Hunt, 2004).

<sup>1</sup> При данном уровне световой адаптации, разумеется.



**Рис. 30.** А — изображение, взятое к сравнению из рис. 29 В. В — применение S-образной тоновой кривой позволяет поднять контрастность изображения, т.е. усилить зрительную стимуляцию на наднизких пространственных частотах. Сие второй шаг в усилении визуального объема.

Из сказанного следует, что усилия цветокорректора чаще всего направлены на подъем визуального контраста изображения до полноценного, а также оптимизацию его визуальной контрастности. И первое, и второе — чувственные, зрительные показатели, но управление ими идет за счет изменения параметров физических: фотометрического контраста и фотометрической контрастности.

Общим фотометрическим контрастом изображения мы управляем посредством инструмента «Levels», аккуратно подтягивая границы диапазона к краям яркостной гистограммы (рис. 29 В).

Фотометрической контрастностью (обычно говорят просто — «контрастностью») мы манипулируем посредством инструмента «Curves», чаще всего S-образно изгибаю общую RGB-кривую (рис. 30 В). Отметим, что смысловым ядром автоматического «улучшайзинга» в RAW-конвертерах является именно S-образная кривая, сходу применяемая к изображениям. Выраженность S-образности сугубо контекстна и определяется корректором интуитивно. Единственная рекомендация: когда визуальный оптимум, казалось бы, достигнут — отвлечься от изображения не менее чем на 60 секунд и вновь оценить его по критерию визуальной контрастности. Практически всегда потребуется легкая доработка кривой.

Стоит сказать также, что регулировка контрастности L-кривой (LAB-представление) выполняется редко: дело в том, что на низких пространственных частотах зрение

высокочувствительно к хроматическому компоненту изображений и манипуляция одной лишь L-составляющей часто приводит к непоправимой утрате этого компонента в тенях. Далее мы покажем, что при работе на средних и высоких частотах ситуация обратна — работа чаще всего идет именно в L-канале.

Итак, обратим внимание на то, насколько усилился визуальный объем изображения после его оптимизации по контрасту и контрастности, то есть после усиления зрительной стимуляции по низким и наднизким пространственным частотам (рис. 29 В, рис. 30 В). Однако это лишь начало общего процесса редакции изображения по фактограммам визуальной глубины.

Сказанное о тональной работе на низких и наднизких пространственных частотах,казалось бы, не ново, но когда мы перейдем к разговору о манипулировании краевой информацией на средних пространственных частотах, станет ясно, какие опасности угрожают светотеневому фактору визуальной глубины, вроде бы уже оптимизированному.

### 3.2. Края

Следующим этапом наше зрение обрабатывает стимуляцию на средних, подвысоких и высоких пространственных частотах. Сие ничуть не менее важная стадия зрительного акта: на данном этапе проекционное изображение на сетчатке анализируется в логике контуров, интерпретируя их в края объектов сцены. Напомним, что взаимоотношения краев в сцене — это один из столпов монокулярного (нестереоскопического) восприятия глубины пространства, а поскольку ранее он не обсуждался на страницах русскоязычных руководств, — главный предмет нашего сегодняшнего разговора.

Итак, прежде всего давайте проанализируем наш пример в логике краев (рис. 31). За основу возьмем рис. 30 В, то есть изображение, в котором завершена тональная обработка по низким и наднизким пространственным частотам.

#### 3.2.1. Световые края

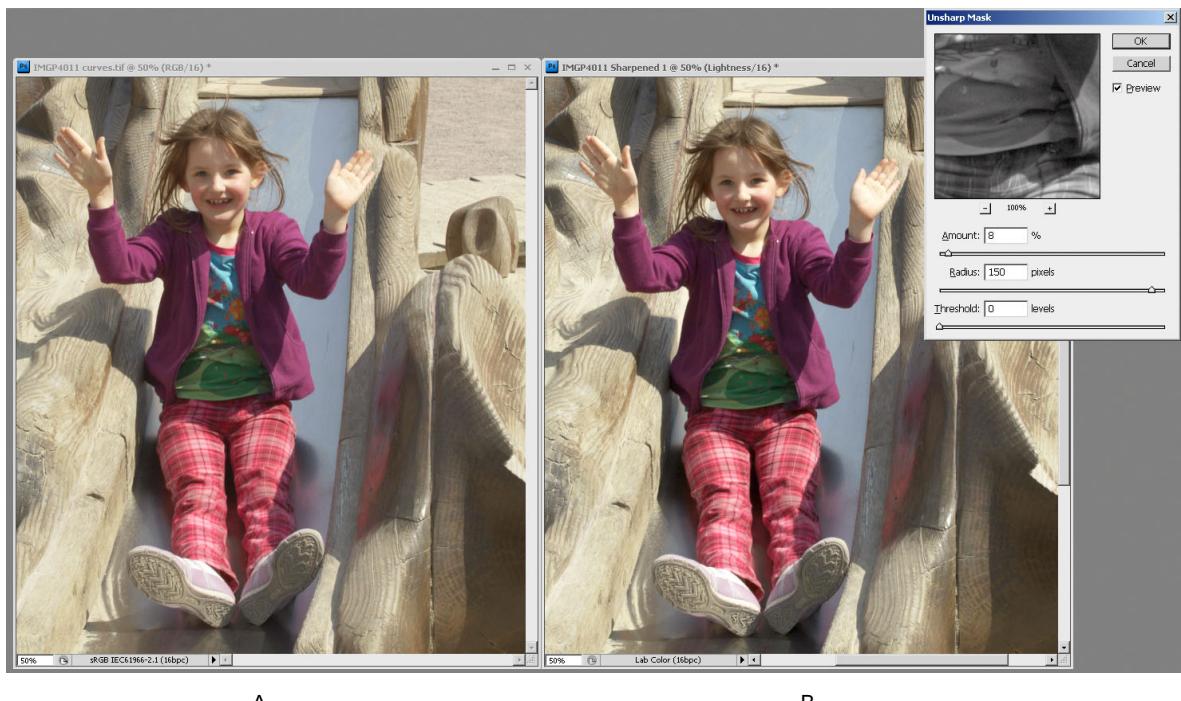
Как уже было сказано ранее, световые края занимают область средних, а также, частично, наднизких и подвысоких пространственных частот (см. рис. 28). Здесь, также как и по низким частотам, для адекватной передачи зрительного впечатления требуется некоторое увеличение контраста, то есть — усиление зрительной стимуляции.

**Управление.** Яркостными взаимоотношениями на средних и подвысоких частотах корректор обычно манипулирует посредством инструмента «Unsharp Mask», деликатно «играя» соотношением величин «Amount» и «Radius», реже — порогом «Threshold» — его значение обычно равно нулю (рис. 32 на стр. 37). Общая тактика такова, что мера усиления контраста остается невысокой и лежит в диапазоне от 5 до 20%, тогда как сама пространственная частота (зашитая в величину радиуса) варьируется в пределах от 50 до 250 px и зависит от пространственного разрешения и размера изображения. Таким образом, конкретные значения подбираются интуитивно и всегда контекстно. Главный же принцип таков, что усиление («Amount») должно быть весьма деликатным: в реальных сценах стимулы средних пространственных частот воздействуют не на всю сетчатку, а лишь на ее околосентральную часть и сам центр. Следовательно, и контрастный сигнал не столь велик, как в случае низких и наднизких частот. При этом, за счет непрерывных глазных движений проекции объектов средних пространственных частот все время двигаются по сетчатке наблюдателя.

Работа со средними частотами обычно ведется в L\*-канале Lab-представления изображения, но возможна также манипуляция в отдельном слое, включенном в ре-



Рис. 31. Картина краев типичной сцены в ее реалистичном изображении. «С» — световые; «У» — угловые; «П» — пространственные; «В» — вещественные; «Л» — лимбы.



A

B

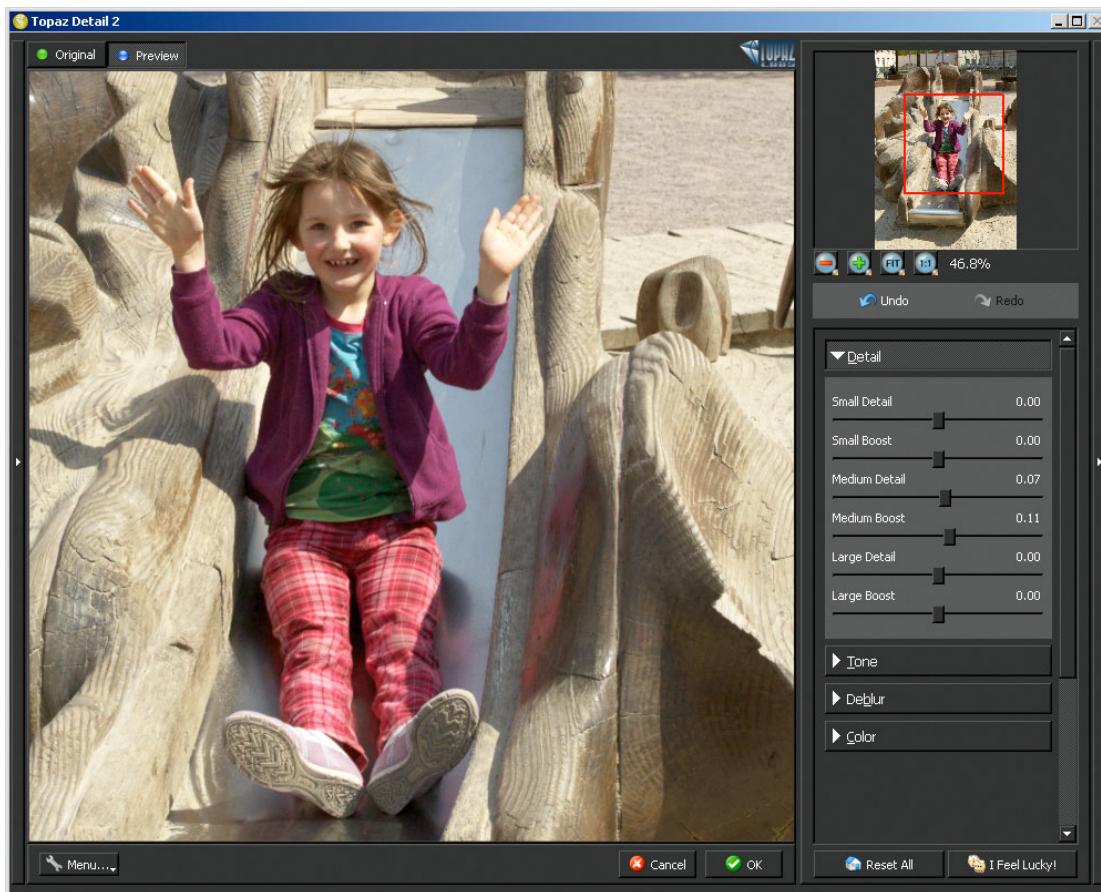
**Рис. 32.** А — изображение, взятое к сравнению из рис. 30 В. В — применение инструмента «Unsharp Mask» к L\*-каналу изображения в его CIELAB-представлении. Небольшое повышение контраста на средних пространственных частотах ведет к мягкому усилению световых краев и повышению визуальной пластики картинки.

жим «Luminosity». Особо искушенный и опытный корректор может позволить себе данную процедуру в обычном трихроматическом представлении (RGB), если хочет наряду с контрастом яркостным слегка поднять на средних частотах и хроматические контрасты.

В нашем примере в качестве исходного (рис. 32 А) используется изображение с рис. 30 В (в котором уже выполнено усиление контраста по низким и наднизким частотам). Поскольку речь идет о средних частотах, то для большей иллюстративности мы используем увеличенный фрагмент оригинала (но не весь оригинал). Обратим внимание на то, как усилилась пластика картинки и насколько объемными стали предметы среднего калибра.

Отметим, что существенным недостатком инструмента «Unsharp Mask» является появление паразитного гало при усилении контраста по контурам любых пространственных частот. Этого крайне досадного недостатка лишен сторонний плагин «Topaz Detail 2.0» (рис. 33 на сл. стр.), который мог бы целиком заменить стандартный «Unsharp Mask», когда б не встречные недостатки — неспособность работать с изображением в LAB-представлении и неспособность обрабатывать «тяжелые» файлы (от 300 Мб и выше), что критично в средне- и широкоформатной фотографии.<sup>1</sup> Однако в

<sup>1</sup> К примеру, слайд 4×5", оцифрованный с пространственным разрешением 3000 dpi и тональным разрешением 16 бит на канал, «весит» около 1 Гб.

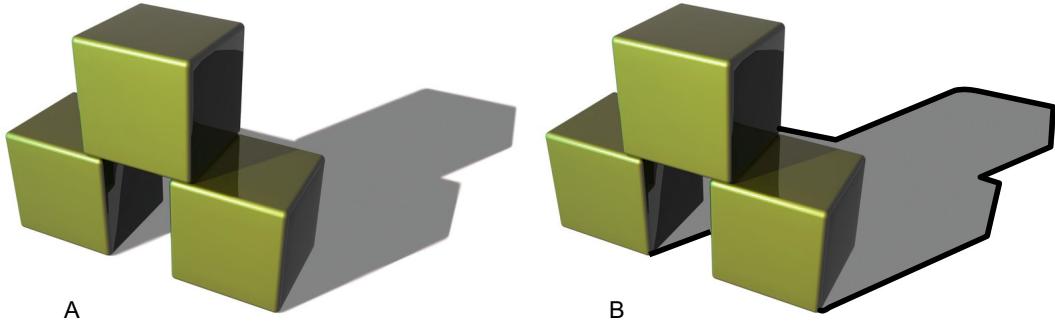


**Рис. 33.** Усиление яркостного контраста на средних пространственных частотах с помощью плагина «Topaz Detail 2.0».

большинстве ситуаций плагин является очень серьезной и толковой альтернативой «Unsharp Mask», и цветокорректору следует обязательно познакомиться с ним.

**Предостережения.** Теперь несколько слов о том, что произойдет, если корректор, воодушевленный стремлением выжать из картинки все, что можно, по визуальной пластике на средних частотах, завысит величину усиления контраста сверх допустимого. Априори ясно, что изображение огрубеет, но, главное, что наше зрение начнет ошибочно интерпретировать контуры: световые края могут «превратиться» в края пространственные или даже вещественные, полностью исказив восприятие картинки (рис. 34 на сл. стр.). Тени перестанут быть тенями, став темными противоестественными кляксами. Изображение *потеряет* визуальный объем. Словом, корректор должен быть предельно осторожен, манипулируя контрастом на средних частотах, и всегда помнить о том, что существуют зоны конфликта (отмечены красным на рис. 28 [стр. 31]) и что, усиливая зрительную стимуляцию на контурах, он легко может выскочить из коридора верной зрительной интерпретации их в края того или иного типа.

Наконец, отметим, что в отношении средних пространственных частот зон конфликта две — есть еще нижняя, из-за которой излишний контраст на средних пространственных частотах может повредить визуальной информации, проходящей по



**Рис. 34.** Восприятие теней. А — обычная тень воспринимается как отличие в уровнях освещенности поверхности, но не как окрашенный участок. В — искусственная обводка радикально меняет восприятие: поверхность выглядит темнее и специально окрашенной.

наднизким частотам, то есть оказать отрицательное влияние на общую контрастность изображения.

### 3.2.2. Угловые и пространственные края

Вопрос о том, следует ли повышать контраст на подвысоких пространственных частотах, усиливая тем самым читаемость угловых и пространственных краев, судя по всему, не имеет однозначного ответа — слишком велика опасность превратить эти края в вещественные, если ненароком угодить в верхнюю зону возможного конфликта (рис. 28 на стр. 31). Как правило, необходимость в повышении контраста на подвысоких частотах возникает редко и обычно при обработке крупноформатных пейзажных снимков, т.е. захваченныхых в формат сенсора от 6×7 см (и выше) и предназначенных к печати при десятикратном увеличении. Дело в том, что при захвате сцены в столь крупный формат сенсора, изображение несет всю полноту яркостных градаций вплоть до подвысоких пространственных частот этой сцены, и, стало быть, даже самые мелкие детали сохраняют свою визуальную объемность, или, как еще говорят, — волюметричность. Эти детали не станут плосче, если несколько повысить их яркостный контраст — напротив, легкое усиление стимуляции лишь подчеркнет визуальный эффект глубины. Попытка же повысить контраст на подвысоких частотах в изображениях, полученных с кремниевых сенсоров (даже крупных) может привести к выхолащиванию яркостных градаций из мелких деталей изображения и, как следствие, визуальному уплощению этих деталей (и без того не слишком объемных)<sup>1</sup>. Ну, а в нашем примере, то есть в изображении, полученном с кроп-сенсора, усиление на подвысоких частотах однозначно окажется вредным.

### 3.2.3. Вещественные края

Как уже было сказано ранее, высокие пространственные частоты в изображении — это царство вещественных краев. Если следовать принятой нами логике, то получает-

<sup>1</sup> Подробнее см. А. Шадрин. «CANON 1DS MARK III против форматного слайда EKTACHROME 100 G 4x5 по критерию микропластики изображения».

ся, что на высоких частотах усиления контраста вообще не требуется, поскольку суммарный сигнал, поступающий от фоторецепторов по высоким частотам должен оказаться весьма и весьма слаб. Однако на самом деле все обстоит, как говорят, «с точностью до наоборот».

Зрительная информация, проходящая по высоким пространственным частотам, т.е. информация в том числе и о вещественных краях сцены, обладает очень высокой биологической значимостью (если смотреть на проблему в эволюционном аспекте). Способность на расстоянии (т.е. без непосредственного контакта) отличить одно вещество от другого, например тухлое мясо от свежего, может в ряде ситуаций оказаться критичным эволюционным преимуществом.<sup>1</sup> С другой стороны, эта же информация требует высокой пропускательной способности нервных путей, идущих от сетчатки в кору головного мозга, а также серьезных «вычислительных» ресурсов центральной нервной системы.

Тысячи лет эволюции отшлифовали зрение позвоночных до такой степени, что зрительные системы, в том числе зрительная система человека, обладают максимальной эффективностью при максимальной экономичности. Экономия достигается за счет всего, чего только можно, начиная с механического строения (анатомия), клеточной организации тканей (гистология) и заканчивая функционалом — физиологией, в частности, нейрофизиологией.

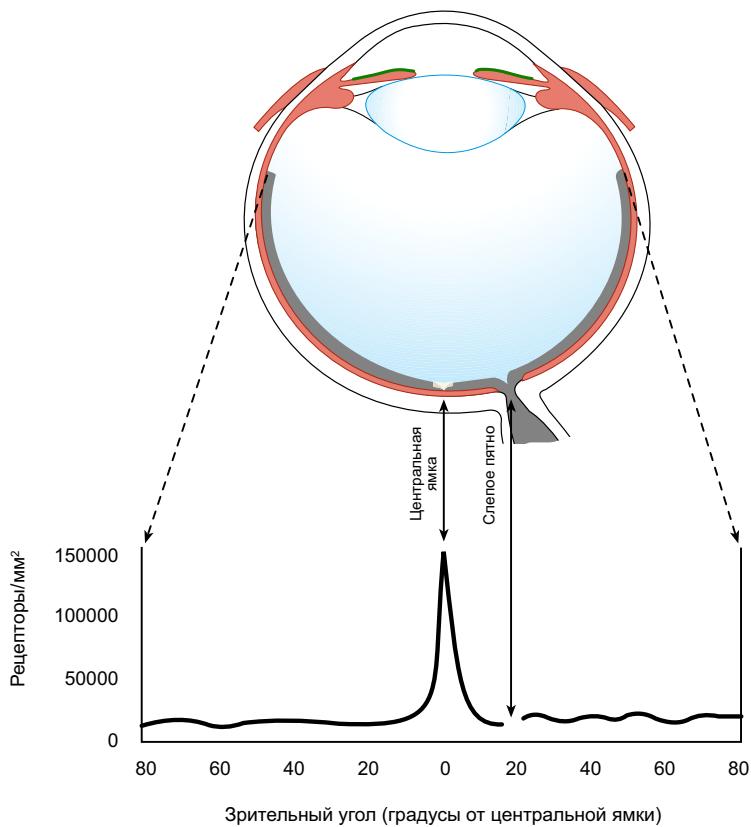
Анатомо-гистологический компонент экономии ресурсов в зрительной системе человека построен на том, что лишь в самой середине сетчатки глаза имеется участок (т.н. *центральная ямка* — *fovea*), в котором колбочки упакованы очень и очень плотно, что и позволяет адекватно воспринимать стимуляцию на высоких пространственных частотах (рис. 35 на сл. стр.). Мы говорим при этом, что по центральной ямке острота нашего зрения максимальна (Wandell, 1995; Schwartz, 2009).

Физиологический компонент экономии таков, что при зрительном акте из сцены извлекается только актуальная на данный момент высокочастотная информация, то есть далеко не вся, заключенная в этой сцене. Достигается сие за счет непрерывных глазных движений — саккад, как бы «ощупывающих» поле зрения: пятно высокого разрешения прыгает и мечется от объекта к объекту, поставляя данные *фрагментарно*. При этом в сознании, разумеется, картина высоких частот сливается в единый, не разделенный во времени паттерн.

Любопытно и то, что и эта сугубо выборочная информация подвергается затем дискретизации, фактически — оцифровке: плавный первичный сигнал колбочек моментально этими же колбочками преобразуется в импульсный сигнал постоянной амплитуды, но переменной частоты (т.е. подвергается частотному кодированию), затем вспомогательными клетками сетчатки из трехканального преобразуется в яркостно-контрастный (и два хроматических), после чего подвергается дальнейшей компрессии (кстати, удивительно схожей с JPEG-компрессией и с тем, что происходит при экономии полосы пропускания в телевизионных системах). В таком сверхусеченном и дискретном виде данные идут в зрительную кору головного мозга.

Отметим, что если бы зрение работало по принципу кремниевой матрицы фотоаппарата, то есть, если бы паковка фоторецепторов по всей сетчатке была плотной и равномерной, а глазное яблоко — неподвижным, то высокочастотная информация по

<sup>1</sup> В данном примере потому, что особи удается избежать возможного смертоносного инфицирования при обнюхивании и/или облизывании.



**Рис. 35.** Распределение колбочковых фоторецепторов в сетчатке глаза человека (выделена се-рым).

нервным путем продвигалась бы в разы (если не в десятки раз) медленнее. Со всеми вытекающими отсюда катастрофическими для биологического вида последствиями.

Стоит отметить также, что благодаря высокой плотности залегания фоторецепторов в центральной ямке, результирующий контрастный сигнал, поступающий в зрительную кору, хоть и усечен качественно, весьма велик количественно. Более того, ввиду исключительной биологической значимости высокочастотной визуальной информации, в зрительной коре головного мозга сигналам из центральной ямки удалено наибольшее «внимание» — большая часть нейронов коры обслуживает зрительные потоки, пришедшие именно из fovea (Palmer, 1999; Wandell, 1995).

**Стратегия и тактика управления.** Теперь вспомним, что изображение сцены, выполненное даже в сравнительно крупный размер, чаще всего — лишь фрагмент другой сцены. Следовательно, высокие пространственные частоты фотографируемой сцены ложатся на сверхвысокие частоты в ее изображении, иногда оказываясь на пороге различимости даже центральной ямкой.<sup>1</sup> Все перечисленное выше логически подводит нас к тому, что при обработке изображений однозначно требуется усиление зрительной стимуляции по высоким пространственным частотам, т.е. повышение фотометрического контраста на вещественных краях. Причем повышение существенное.

<sup>1</sup> Подробнее см. А. Шадрин. «О резкости и детализации в художественной фотографии».

Психологически повышение яркостного контраста на вещественных краях ведет к усилению ощущения прорисовки этих краев, то есть к росту *визуальной резкости* изображения. Усиления визуальной пластиности мелких деталей картинки при этом, как правило, не происходит. Исключения если и бывают, то касаются только hi-end-изображений сцен, захват которых был выполнен крупным сенсором, обычно не меньше чем 9×12 см (фотопленка), а оцифровка — сканерами высшего класса, в первую очередь — барабанными.

Итак, как видим, стратегия работы на высоких пространственных частотах принципиально отлична от стратегии работы на частотах подлежащих и состоит в усилении стимуляции сугубо по вещественным краям (с целью повышения визуальной резкости этих краев, но не визуального объема мелких деталей изображения). При этом сохраняется опасность угодить в зону конфликта, зацепив угловые и пространственные края и «превратив» их тем самым в вещественные. Последнее в буквальном смысле слова убивает изображение, поскольку ведет к некорректной интерпретации зрением краевой информации на подвысоких частотах. Исход — потеря микропластики изображения, т.е. утрата визуальной объемности мелких деталей.

Стратегия мощного усиления зрительной стимуляции на высоких пространственных частотах определяет нашу тактику, традиционным базисом которой является работа в L\*-канале CIELAB-представления изображения, либо в отдельном слое, включенном в режим «Luminosity» (второе несколько хуже, что убедительно показано Дэном Маргулисом). Далее возможны варианты.

**«Sharpen Tool (Δ)».** Совершенно непопулярный у цветокорректоров инструмент, позволяющий, однако, селективно «проходить» по вещественным краям, усиливая их яркостный контраст, но не затрагивая при этом краев угловых и пространственных. Непопулярность вызвана трудоемкостью применения и неудачным исполнением самого механизма: инструмент оставляет после себя паразитные гало и пикселизацию. Однако в версии Adobe Photoshop CS5 ситуация несколько подправлена: появился флагок «Preserve Details», включение которого избавляет контуры от появления паразитного ореола.

В целом, если корректор располагает временем и терпением, а также вооружен растровым редактором как минимум названной версии, применение «Sharpen Tool» позволит избежать потенциальных неприятностей при повышении визуальной резкости изображений, то есть — не попасть в зону конфликта вещественных краев с краями угловыми и пространственными, а также лимбами.

**«Unsharp Mask».** Применение данного инструмента при высоких значениях «Amount» (порядка 150 — 500) и совсем низких величинах «Radius» (0.3 — 0.9 px) — это наиболее распространенная тактика повышения яркостного контраста на высоких пространственных частотах до уровня адекватной визуальной резкости изображения.

Недостатком метода является то, что неизбежно оказываются задетыми тонкие лимбы, угловые и пространственные края (со всеми вытекающими отсюда визуальными последствиями). Корректор вынужден либо недотягивать по усилению, жертвуя при этом визуальной резкостью картинки, либо жертвовать ее микропластикой, если последняя сюжетно не критична. Или же проходить по угловым пространственным краям исторической кистью (либо резинкой, если работа велась в отдельном слое). Последнее столь же трудоемко, как и работа с «Sharpen Tool» (если не более).

Разумеется, существуют весьма удачные сторонние плагины, позволяющие селективно повышать яркостный контраст на высоких пространственных частотах. В первую очередь, к ним относится «FocalBlade», располагающий богатым арсеналом на-

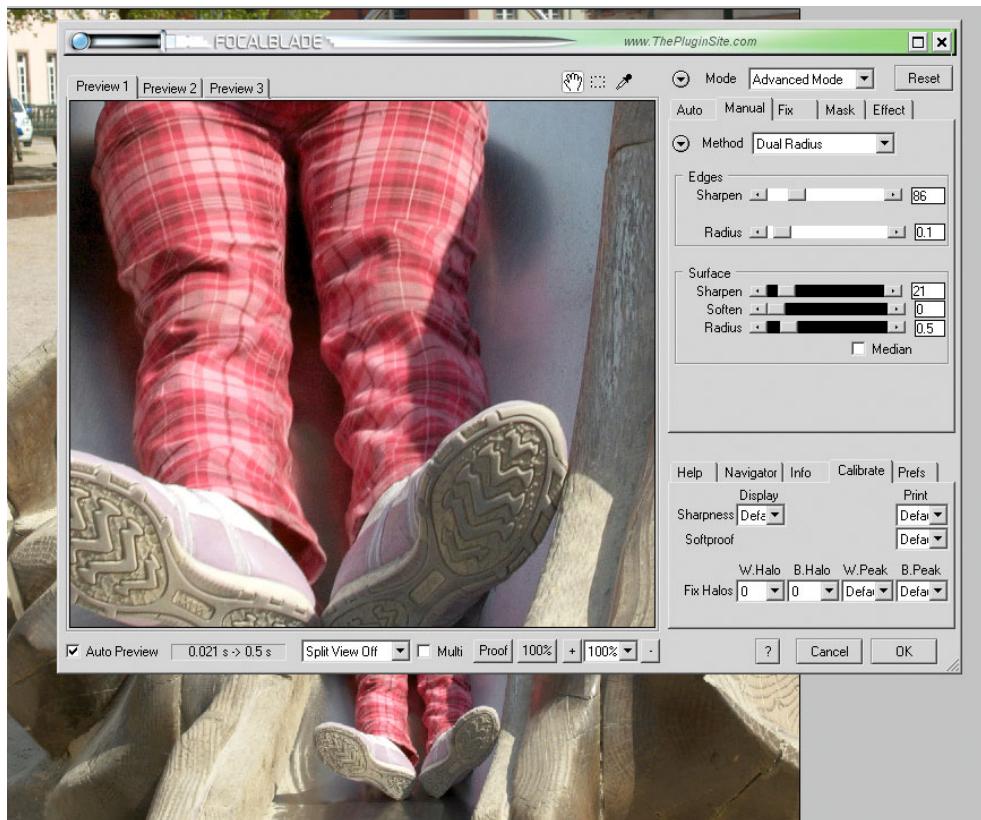


Рис. 36. Интерфейс фотошоп-плагина «FocalBlade».

строек, которые позволяют утонченно работать с контрастом на вещественных краях, избегая при этом возможных краевых конфликтов (рис. 36).

**«Intelligent Sharpen 2».** Экшн, написанный Павлом Косенко (компания «Фотопроект») и предназначенный для повышения визуальной резкости изображений при их подготовке к WEB-публикации. Механизм работает весьма и весьма деликатно и при рекомендованном его автором размере изображений не вылетает в зону краевых конфликтов, щадя края угловые, пространственные и лимбы.

### 3.2.4. Трешины

Итак, в разговоре о регулировке контраста на различных пространственных частотах остался, на наш взгляд, еще один немаловажный момент: к какой категории краев относить трещины в поверхностях? Скажем, в нашем примере их великое множество (структура дерева). На сегодняшний день официальная точка зрения такова, что трещины в поверхностях мы относим к категории угловых краев строго на  $180^\circ$ . И хоть велик соблазн отнести их к краям вещественным, все же наш опыт свидетельствует о том, что трещины в поверхностях лежат на верхней границе подвысоких пространственных частот и как раз попадают в зону возможного конфликта с вещественными краями. Практика показывает, что трещины, попавшие под усиление при попытке повышения визуальной резкости изображения, смотрятся скорее противоестественно, как некие артефакты, а опытному глазу выдают некоторую небрежность в обработке по высоким пространственным частотам.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная статья — плод текущих размышлений над текстом трех фундаментальных и самых современных монографий по физиологии и психологии зрительного восприятия. Объединенный перевод этих трудов на русский язык выполняется автором статьи в интересах российской индустрии визуализации — главным образом ее фотографического и полиграфического секторов.

Сегодня, когда переведено чуть более трети материала, становятся понятными минимум две вещи: во-первых, что основой зрительного восприятия сцен и их изображений является т.н. *пространственное зрение* — восприятие яркостных контрастов на различных пространственных частотах; во-вторых, что базисом успешной работы с изображениями мы, в первую очередь, полагаем умелое управление этими контрастами, т.е. обеспечение грамотной конверсии тональных взаимоотношений сцены в тональные (но уже несколько иные) взаимоотношения в изображении этой сцены. Смысловым фундаментом этой конверсии является тезис о раздельном усилении контрастов на различных пространственных частотах, поскольку изображения сцен не обеспечивают всей полноты зрительной стимуляции, присущей самим сценам. Общая схема действий, подытоживающая материал статьи, дана на рис. 37.

Наконец, отметим то, что помимо своей основной задачи — рассказа о научных принципах и практических методах управления визуальным объемом изображений — статья призвана дать пример анализа отвлеченного, на первый взгляд, академического материала и эффективного претворения его в производственную практику.

При этом, разумеется, приведенные в статье практические приемы не претендуют на истину в высшей инстанции, но лишь иллюстрируют возможную тактику действий: читатель, опираясь на полученное знание, может выработать индивидуальные алгоритмы управления визуальным объемом изображений, а также их визуальной резкостью, помня при этом, что резкое и одновременно пластичное изображение имеет все шансы называться высококачественным даже несмотря на легкие недочеты в передаче хроматических отношений. И, наконец заметим, что резкое и одновременно пластичное изображение — это еще один пример контраста, но уже на высших уровнях психологического обобщения.

## ЛИТЕРАТУРА:

- В. Железняков. Цвет и контраст. Технология и творческий выбор. М.: ВГИК, 2000.
- М.Д. Фершильд. Модели цветового восприятия. 2-ая редакция. (Перевод А. Шадрин).
- Р.В.Г. Хант. Цветовоспроизведение. 6-ая редакция. (Перевод А. Шадрин).
- А.Е. Шадрин. О резкости и детализации в художественной фотографии. СПб., 2009.
- А.Е. Шадрин. Воспитание по доктору Маргулису: работа над ошибками. (Вторая редакция). СПб., 2008.
- А.Е. Шадрин. Canon 1DS Mark III против форматного слайда Ektachrome 100 G 4x5" по критерию микропластики изображения. СПб., 2010.
- S.E. Palmer. Vision Science: Photons to Phenomenology. MIT Press, Cambridge (1999).
- B.A. Wandell. Foundations of Vision. Sinauer, Sunderland, Mass (1995).
- S.H. Schwartz, Visual Perception, 3th Ed. McGraw-Hill (2005).
- S.H. Schwartz, Visual Perception, 4th Ed. McGraw-Hill (2009).

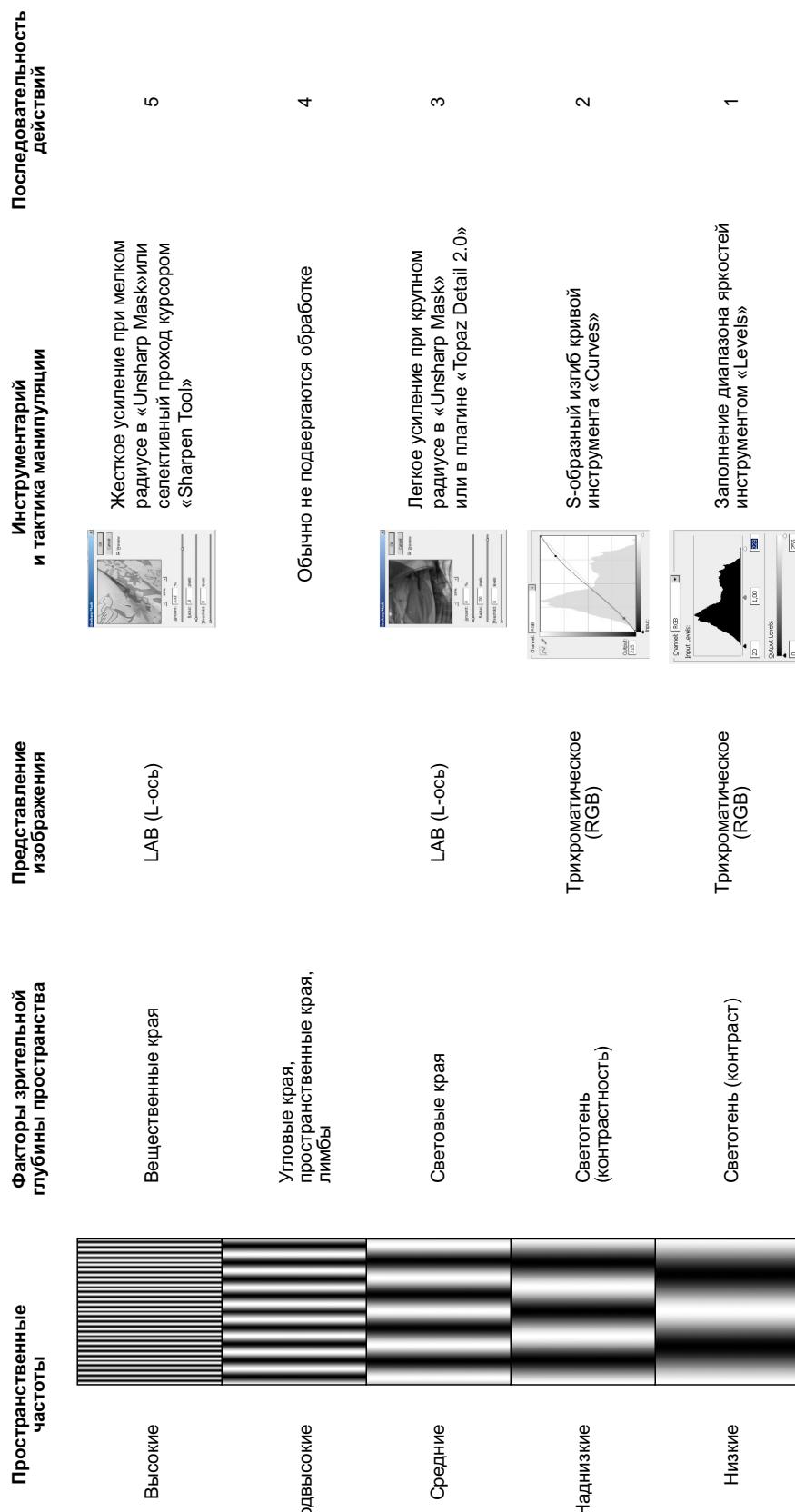


Рис. 37. Общая схема управления факторами визуальной глубины пространства в изображениях.

© Алексей Шадрин, 2010