

Иллюзия шара и алгоритмы ее порождения

О.Ю. Орлов

*Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича,
Российская академия наук (ИППИ РАН), Москва, Россия
graf@iitp.ru*

Поступила в редколлегию 09.12.2012

Аннотация—Представлен вариант зрительной иллюзии (выпуклости плоского кружка), которая является результатом обычной интерпретации вертикального градиента светлоты, присущего объемным телам (и их изображениям) в обычных условиях освещения; интерес и новизна иллюзии состоит в том, что этот вертикальный градиент светлоты сам является продуктом иллюзии – одновременного контраста с фоном специальной раскраски. Эффект объясняется комплексом присущих предметному зрению алгоритмов, связанных с разными уровнями обработки сетчаточного изображения объемных тел в реальном окружении.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: иллюзия, 3D, светотень

1. ВВЕДЕНИЕ

Зрительные иллюзии - продукт работы тех же механизмов, которые опосредуют наше повседневное зрение. В обычных условиях быстродействие зрительной системы оставляет недоступным для самонаблюдения работу промежуточных звеньев ее сложного ансамбля. Нужны специальные эксперименты, чтобы вычленив отдельные его компоненты и понять пути формирования конечного результата их работы – как нормального зрительного образа, так и иллюзии. Устойчивость и воспроизводимость иллюзий позволяет использовать их в экспериментах, направленных на понимание разных уровней переработки изображения.

Множественность уровней переработки сетчаточных изображений и их общность при “обычном зрении” и в ситуациях с иллюзиями наглядно иллюстрируется проблемой 3D кино и видео. Как и обычное кино (которое на заре его становления так и называли: иллюзион), 3D кино является инструментом технически совершенного построения зрительной иллюзии. Оно адресуется к свойственным человеку процессам стереосинтеза – каскаду операций по выявлению монокулярных и бинокулярных признаков пространственных соотношений между элементами видимой сцены [1]. Эти две группы признаков важны для “бессознательных и произвольных актов суждения” (Гельмгольц) касательно зрительно воспринимаемого окружения [2, 3], что включает подсознательную реконструкцию условий освещения, окраски и формы тел.

Присущий нашему зрению активный поиск признаков объемности тел на основе светотени, имеющих в монокулярных сетчаточных проекциях и в двумерных изображениях, лежит в основе ряда иллюзий, касающихся субъективной оценки окраски (“белизны”) того или иного участка предъявляемой монохромной картинки. Их связь с несколькими независимыми уровнями обработки изображений несомненна [4]. Это же показывает и предлагаемая для рассмотрения иллюзия, касающаяся важной составляющей предметного зрения – опознания формы по светотени.

2. ПОСТАНОВКА ВОПРОСА

Предлагаемая зрительная иллюзия, описания которой не встречено в литературе [4–6], состоит в устойчивом впечатлении выпуклости плоской фигуры – равномерно окрашенного кружка, если он расположен на фоне, имеющем градиент светлоты сверху вниз (рис. 1а).

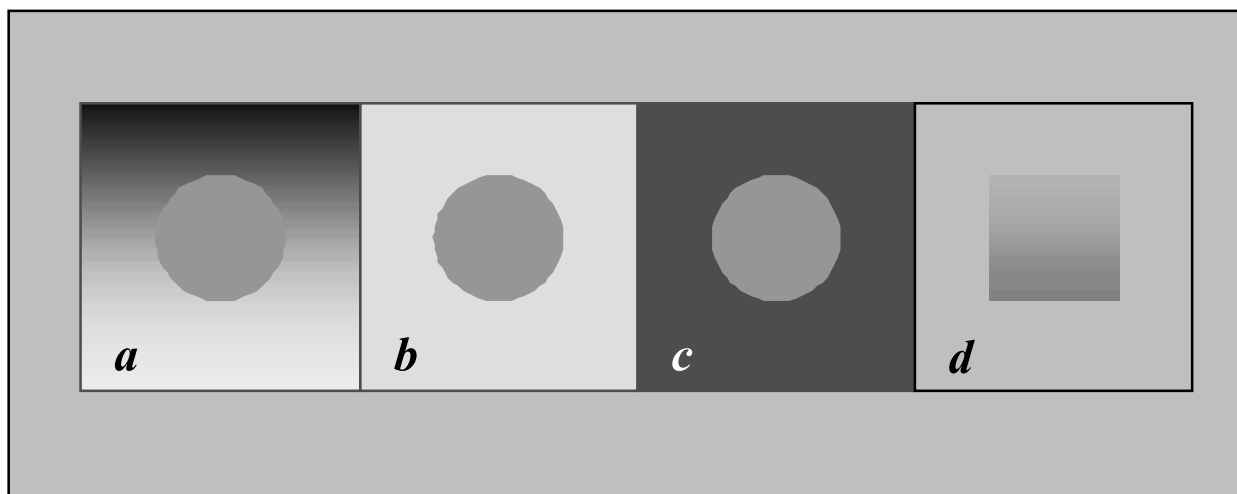


Рис. 1. “Иллюзия шара”: локальный контраст и светотень. Одинаковые равномерно окрашенные серые кружки (*a*, *b* и *c*) выглядят плоскими как на светлом (*b*) так и на темном (*c*) фоне, однако на фоне с градиентом светлоты сверху вниз (*a*) кружок кажется выпуклым.

Иллюзия шара отчасти является результатом того же одновременного контраста, из-за которого кружок выглядит темнее на светлом (*b*) и светлее на темном фоне (*c*). Они имеют противоположный по знаку, но постоянный на всем протяжении контура контраст с фоном. В отличие от них, локальный контраст сверху и снизу для кружка на фоне с градиентом (*a*) имеет противоположные знаки. В результате, **субъективные** различия кружков *b* и *c* для кружка *a* объединены в одной общей иллюзии большей светлоты верха одного и того же кружка (см. также рис. 5). Такое распределение светотени свойственно объемным телам в сценах с обычным освещением и их изображениям (*d*).

Зрительной системе, ориентированной на работу с объемными телами в трехмерном мире, присуща тенденция интерпретировать подобный фрагмент как *изображение телесного объекта*, независимо от того, имеет ли он реальный градиент светлоты (*d*), или же только иллюзорный (*a*). Таким образом, иллюзия выпуклости является продуктом алгоритмов разных уровней зрительной системы.

3. НАБЛЮДЕНИЯ И ОПЫТЫ

То, что иллюзия выпуклости кружка возникает именно из-за градиента фона, подтверждается его перемещением по фону, либо при размещении нескольких идентичных кружков на фоне с градиентом светлоты (рис. 2). Кружки верхнего (наклонного) ряда, расположенные на разных уровнях фона, имеют разное окружение и различные условия одновременного контраста. Два крайних, как и кружки *b* и *c* на рис. 1, по контрасту со своим окружением выглядят хотя и разными, но плоскими; средние же два производят впечатление выпуклых фигур (‘шаров’). Все четыре в действительности имеют одинаковую и равномерную по полю окраску.

Всем кружкам **нижнего** ряда, различным по средней светлоте, намеренно придана неравномерная заливка их полей (с градиентом светлоты снизу вверх). Иллюзорно выглядя объ-

емными благодаря этому градиенту, они дают возможность сравнения с ними тех кружков верхнего ряда, которые (благодаря иллюзорному градиенту) выглядят выпуклыми. Другими словами, это служит способом оценки чисто субъективного (иллюзорного) впечатления выпуклости путем сопоставления с образцами, допускающими физическую оценку их свойств.

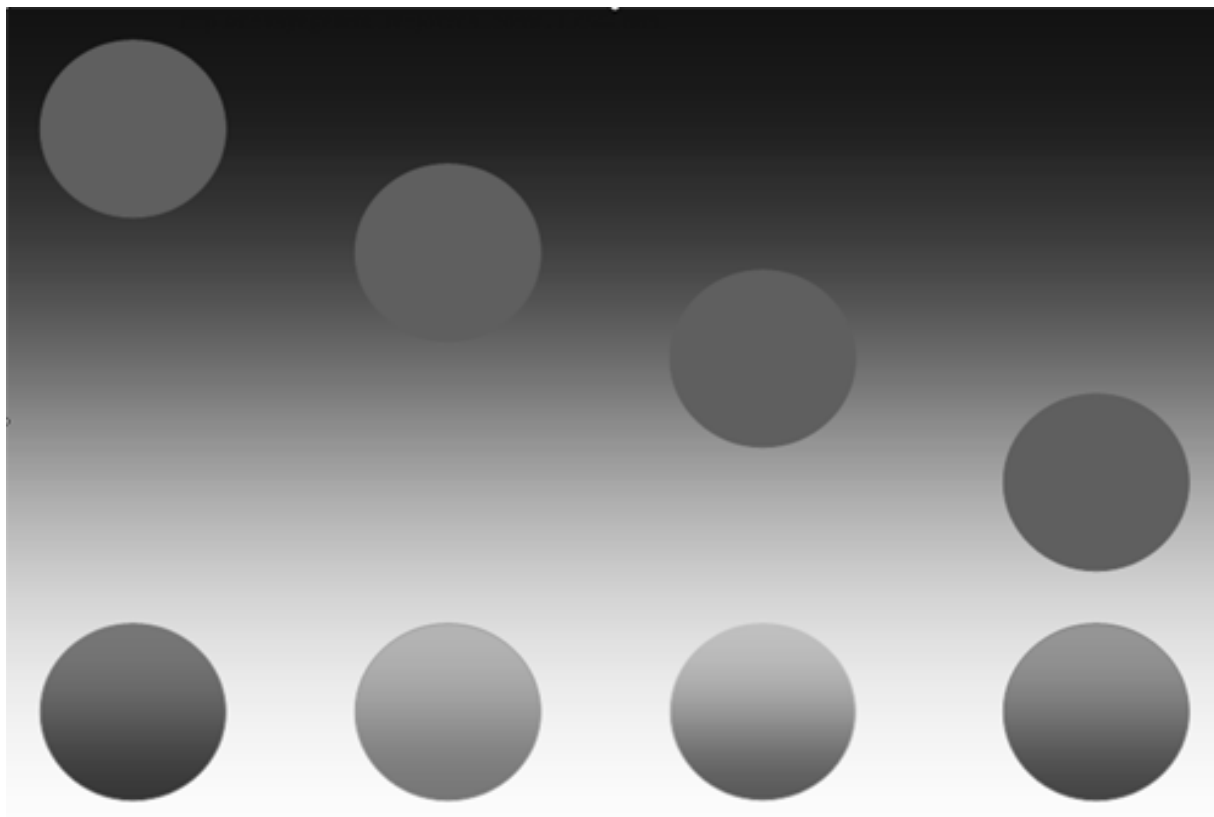


Рис. 2. Иллюзия выпуклости кружка зависит от положения на фоне с градиентом, как это видно из сравнения четырех одинаковых кружков верхнего (наклонного) ряда. Объективно все четыре имеют ровную по всему полю окраску, но вследствие различия знаков локального контраста с фоном (противоположного сверху и снизу), средние два выглядят более светлыми сверху и более темными снизу. Именно такой градиент светотени присущ объемным телам в привычных условиях освещения (солнцем, небом). Нижние четыре кружка, которым придан такой градиент, выглядят объемными, как и кружок d на рис. 1; они служат для сравнения впечатлений выпуклости, порождаемых иллюзорным (для верхних кружков) и объективным (у нижних) градиентом светотени, что делает возможным их шкалирование, т.е. количественную оценку субъективного феномена. Все они воспринимаются объемными потому, что рисунок осмысливается (“интерпретируется на когнитивном уровне”), как изображение сложной сцены, в отличие от фрагментов b и c рис. 1, воспринимаемых как плоские картинки, не являющиеся изображениями.

Другой подход к измерению иллюзии шара основан на компенсации иллюзорного градиента светотени путем придания кружку ему (его окраске) объективного градиента со знаком, противоположным иллюзорному. Этим путем удастся подавить возникающую иллюзию объемности, что отвечает требованиям классу опытов с применением нуля-метода, и допускает прямое физическое измерение (либо иную оценку) элементов картины на мониторе (рис. 3).

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Объяснение “иллюзии шара” выглядит простым. В её основе лежит тривиальный эффект одновременного контраста – источник ясно видимого отличия двух объективно тождественных

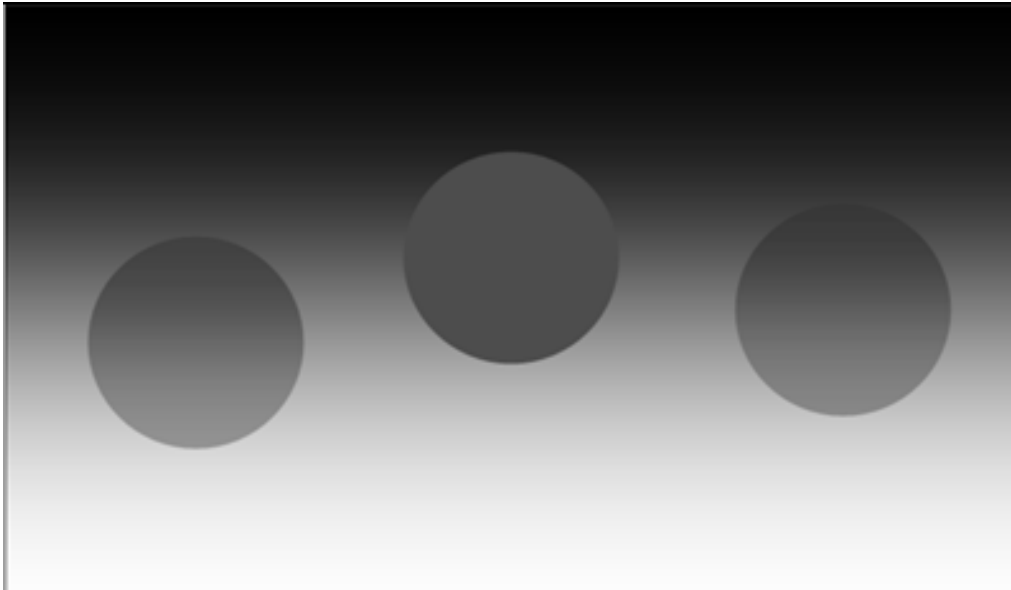


Рис. 3. Компенсация иллюзии градиента светлоты кружка “снизу вверх”, возникающей на фоне с градиентом (“сверху вниз”) путем придания ему градиента обратного по отношению к иллюзии знака (“сверху вниз”). Средний кружок, объективно равномерный сверху донизу, выглядит выпуклым, а два крайних, которым придан градиент “сверху вниз” – почти плоскими. Значения “RGB” элементов рисунка в оценках Adobe Photoshop (от 0 до 255): средний кружок – равномерно серый (сверху донизу = 77), при значениях фона 39 сверху и 186 снизу его. Левый кружок имеет градиент поля от 66 наверху до 147 внизу, при фоне 77 у верхнего края и 214 у нижнего. Правый имеет градиент поля от 60 сверху до 136 снизу, при фоне 59 у верхнего края и 198 у нижнего.

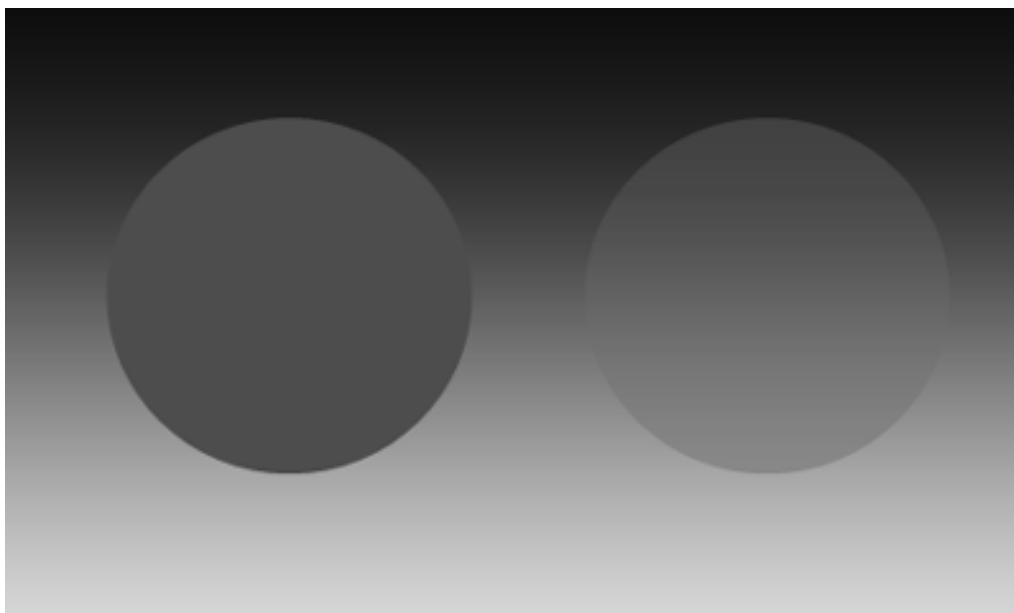


Рис. 4. Другой пример компенсации иллюзии “выпуклости” путем внесения градиента “сверху вниз” в правый кружок. Значения “RGB” элементов рисунка в оценках Adobe Photoshop (от 0 до 255): левый (“выпуклый”) кружок – 77 сверху донизу, правый (“плоский”) – от 65 сверху до 137 снизу, оба при фоне 34 сверху и 168 снизу.

кружков b и c , рис. 1. Каждый из них имеет свой, но постоянный по всему контуру локальный контраст своего поля с фоном. То же можно сказать и о верхнем левом и нижнем правом кружках наклонного ряда на рис. 2. Обратим внимание, что все они выглядят плоскими и равномерно окрашенными по всему полю, в то время как локальный контраст имеет место лишь на их границах с фоном. Не каемки по краям (светлая на границе диска с темным фоном и темная на границе со светлым), что следовало бы ожидать сообразно локальности контраста (и известно как “полосы Маха”), а равномерные поля целиком. Здесь мы имеем дело с “заполнением поля” продуктом предыдущей операции (подчеркнутым локальным контрастом); для всех этих кружков локальный одновременный контраст, свой для каждого из них, постоянен на всем протяжении его границы с фоном.

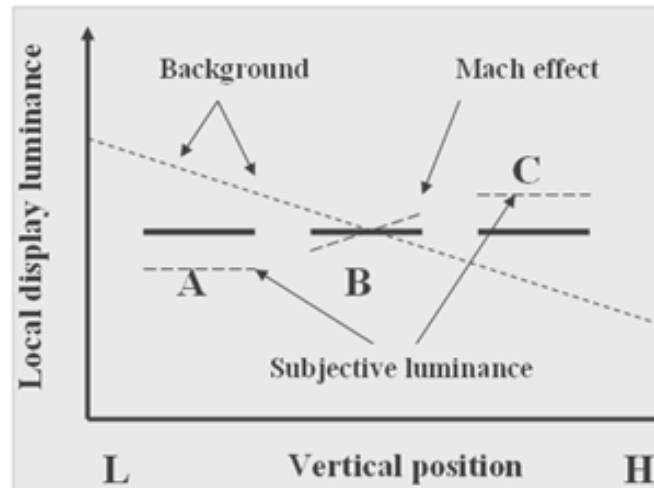


Рис. 5. Одновременный контраст – начальный этап иллюзии шара. Вертикальный градиент светлоты фона “сверху вниз” (от H к L) служит предпосылкой различия субъективной светлоты одинаковых кружков, лежащих на разных уровнях фона (как на рис. 2). Одновременный контраст преувеличивает темноту того из них (A), что лежит целиком на более светлом фоне, и светлоту другого (C), который окружен более темным; оба выглядят плоскими. Средний (B) имеет контраст разного знака с фоном в верхней и нижней части, что создает впечатление большей светлоты его верха. Этот простой алгоритм “нижнего уровня” служит материалом для шаблонной интерпретации данного фрагмента картинка более “высоким” уровнем как изображения объемного тела (шара).

Другое дело – все те “выпуклые” кружки, для которых локальный контраст с фоном имеет разные знаки в верхней и нижней их частях вследствие вертикального градиента светлоты фона: несмотря на безупречную равномерность окраски кружков, их верхняя половина выглядит светлее, нижняя – темнее (рис. 1а и другие). На первый взгляд, это представляется опять-таки тривиальным следствием разницы локального контраста для верхней и нижней частей кружка. Однако опыт показывает, что иллюзорное заполнение поля “с градиентом снизу вверх” (основу иллюзии выпуклости!) нельзя назвать тривиальным. Кружок на двуцветном фоне с четкой границей контрастных половин (рис. 6, слева) не обнаруживает никакого видимого различия верхней и нижней сторон. Хотя формально такой фон отвечает условиям “противоположности знака локального контраста для верха и низа кружка”, помещенный на него кружок выглядит равномерно серым, в отличие от того же кружка на фоне с градиентом (рис. 6, справа). Другими словами, условием “заполнения с градиентом” является наличие плавно-переменного контраста вдоль границы кружка.

Таким образом, иллюзия шара (точнее, выпуклости равномерно окрашенного кружка) складывается из последовательности операций разного уровня. Она начинается с подчеркивания

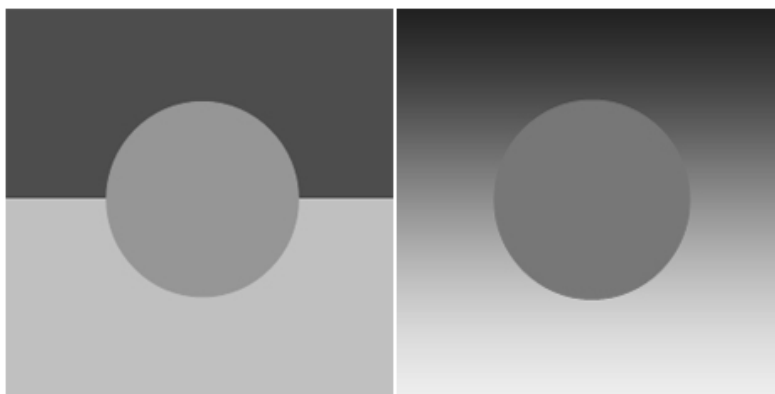


Рис. 6. Локальный контраст и заполнение поля кружка. Иллюзия шара, которая порождается различием знака контраста сверху и снизу кружка, зависит от плавности смены контраста вдоль контура. На фоне с плавным градиентом (справа) кружок выглядит выпуклым благодаря субъективной процедуре иллюзорного “заполнения с градиентом”, тогда как на фоне с резкой границей контрастных половин фона (слева) этой иллюзии не возникает.

локального контраста на границе полей. Это связывают с латеральным торможением, нередко наблюдаемым уже на периферии зрительной системы (на уровне сетчатки, вплоть до ее рецепторного уровня, как у лимулоса). Результат этой операции служит материалом для заполнения поля кружка вглубь от границы, и при постоянстве знака контраста по всему контуру, кружок выглядит равномерно окрашенным, независимо от знака контраста (+ или –) с фоном. В отличие от этого, “заполнение с градиентом”, наблюдаемое при различии знака контраста для верха и низа кружка, хотя и выглядит простым следствием той же процедуры, в действительности имеет существенное отличие. Оно состоит в том, что условием “заполнения с градиентом” является плавность изменения контраста по контуру: кружок, лежащий на стыке резко отличных полей, не заполняется ни двумя полуполями, каждое сообразно своему полуфону, ни вообще каким-либо продуктом локального контраста.

Но самой по себе иллюзии вертикального градиента светлоты кружка еще недостаточно для иллюзии его выпуклости. Этот феномен связан с шаблонной интерпретацией подобных картин как результата распределения светотеней на 3D объектах в обычных условиях освещения – сверху. Жесткость этого шаблона (алгоритма) наглядно иллюстрируется тем, насколько наше суждение об изображенном рельефе зависит от ориентации изображения (рис. 7).

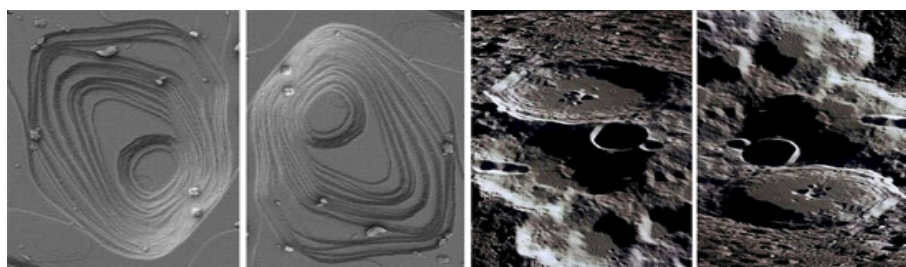


Рис. 7. Неоднозначность интерпретации изображения, зависящая от его ориентации. Две пары изображений (каждая – одну и то же в двух положениях). Левое, полученное на сканирующем электронном микроскопе, читается как углубление либо выпуклость, в зависимости от приписываемого нами шаблонного допущения об обычном положении источника света (сверху). В нем нет даже тех связанных с перспективой дополнительных признаков, которые есть в правом.

Было бы неверным, однако, преувеличивать непреложность подобных “жестких” шаблонов. Известно, например, как жесткий, казалось бы, стереопсис отказывается строить впечатление вогнутого изображения человеческого лица, когда наблюдателю предлагается соответствующая псевдо-стереопара. Нечто похожее мы видим, когда картинка с иллюзорным шаром предъ-является “вверх ногами” (Рис. 8).



Рис. 8. Так ли непреложны “жесткие” шаблоны? Перевернутая картинка с иллюзорным шаром не дает никакой устойчивой иллюзии вогнутости кружка. Может быть, иногда он выглядит круглым окошком в освещенной (как обычно, сверху) выпуклой поверхности, но не менее устойчиво – как пусть необычно освещенный, но все же выпуклый объект.

Присущая нам тенденция к реконструкции пространственных отношений трехмерного мира по его двумерным проекциям, и активный поиск их монокулярных признаков (основа пресловутой “Shape from Shading” [7, 8] как в машинном, так и в естественном зрении) объясняют легкость нашей адресации к плоским изображениям – картинам и фотографиям. Очевидна общность способов обработки зрительной информации, применяемых к реальным сценам и к изображениям, при полном игнорировании явных отличий того и другого. Вместе с тем, есть разница между восприятием картин, которые “являются изображениями” каких-либо 3D сцен, и теми, которые “ничего не изображают”; в этом смысле кружки *b* и *c* на рис. 1, как и, мондрианы или черный квадрат Казимира Малевича, не являются изображениями. В отличие от тех, что воспринимаются как *изображения* (*a* и *d*, рис. 1 и др.), они не апеллируют ни к какой пространственной интерпретации и остаются плоскими фигурами. Напротив, опознав в одном из фрагментов изображение объемного предмета (шара), мы трактуем картинку в целом как изображение 3D сцены, отделяя шар от “непредметного” фона (градиент светлоты которого, намного превосходящий иллюзорный градиент кружка, не порождает никакой предметной интерпретации: он практически игнорируется).

Интерпретация видимого на “когнитивном” уровне совершенно явным образом связана с тем, что мы вносим в плоскую картинку свои смысловые категории, почерпнутые из реальных физического мира [2, 3], то есть внешнюю по отношению к изображению информацию. Понятно, что подобные процедуры требуют иных ресурсов, нежели много более простые опе-

рации подчеркивания контраста на границе или заполнения контуров [4, 5]. Не углубляясь в психологию зрительного восприятия, мы можем и в иллюзии шара видеть подтверждение множественности уровней его организации. Русское название зрительных иллюзий – “обман зрения” – удачно содержит в себе прямое указание на то, что есть и более высокий уровень, способный формировать суждения о том, что зрению представляется несомненным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рожкова Г.И., Алексеенко С.В. Зрительный дискомфорт при восприятии стереоскопических изображений как следствие непривычного распределения нагрузки на различные механизмы зрительной системы. *Мир техники кино*, 2011, 3 (21), стр.12–21.
2. Гельмгольц Г. О зрении человека. Новейшие успехи теории зрения. В кн.: *Популярные речи профессора Гельмгольца*, ч. 2. Под ред. О.Д. Хвольсона и С.Я. Терешина. СПб: Изд. К.Л. Риккера, 1899, стр. 1–124.
3. Helmholtz H. *Helmholtz's Treatise on Physiological Optics. V. II. The Sensation of Vision*. Menasha: Georg Banta Publishing Company, 1924, <http://psych.upenn.edu/backuslab/helmholtz>.
4. Adelson E.H. Lightness perception and lightness illusions. In: *The New Cognitive Neurosciences*, 2nd ed. Ed. M. Gazzaniga. Cambridge: MIT Press, 2000, pp. 339–351, http://web.mit.edu/persci/people/adelson/checkershadow_illusion.html, <http://web.mit.edu/persci/gaz/gaz-teaching/index.html>.
5. Величковский Б.М. *Когнитивная наука. Основы психологии познания*. М.: Академия–Смысл. Т. 1, 2006.
6. Грегори Р.Л. *Разумный глаз*. М.: Мир, 1972.
7. Horn B.K. Shape From Shading: A Method for Obtaining the Shape of a Smooth Opaque Object From One View. *Technical Report 232*. Cambridge: MIT, 1970, <http://people.csail.mit.edu/bkph/AIM/AITR-232-OPT.pdf>.
8. Horn B.K. *Obtaining Shape from Shading Information. The Psychology of Computer Vision*. Ed. Winston H.H. New York: McGraw-Hill, 1975.

Illusory Shape from Illusory Shading

Orlov O. Yu.

Uniform grey flat circle seems to be convex or even looks like a sphere if disposed over the background having vertical downward luminosity gradient. This illusion is due to common interpretation of illusory gradual shading of the circle which itself results from an opposite simultaneous contrast for the upper and lower parts of the disk (Fig.1a).

KEYWORDS: contrast, illusion