

ИНФОРМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 519.7

В.А. Утробин

МОДЕЛИ ОРГАНИЗАЦИИ ПОЛЯ РЕЦЕПТОРОВ СЕТЧАТКИ ГЛАЗНОГО ЯБЛОКА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматриваются способы организации поля рецепторов сетчатки глазного яблока с позиций теории активного восприятия. Выделяется два типа упорядоченных структур – решетки колбочек и решетки палочек. Вводится понятие картографических направлений на решетке. Исследуются варианты взаимодействия выделенных классов решеток между собой.

Ключевые слова: зрительные рецепторы, сетчатка, модель организации поля рецепторов.

Введение

Поскольку глаз – система, то и сетчатка, понимаемая в узком смысле как поле рецепторов (в широком смысле – это пирамида нейронов над полем рецепторов), должна функционировать как единое целое. Поэтому дальним зонам рецепторов сетчатки необходимо поставить в соответствие рецептор (или рецепторы) из ближних зон. В результате плотность рецепторов в этих зонах должна возрастать не по закону 2^n , а быстрее. Именно это и наблюдается в сетчатке глаза человека (с точностью до усредненных данных). Например, по данным, приведенным в работе [1], имеем: общее число палочек (125÷130) млн, колбочек – (6÷7) млн; плотность колбочек в центральной ямке (где палочек нет) порядка (113÷147) тыс./мм²; палочки появляются на расстоянии 130 мкм от центральной ямки небольшими скоплениями, а затем образуют как бы частокол, окружающий каждую колбочку; наибольшая плотность палочек до 170 тыс./мм² наблюдается на расстоянии (5÷6) мм от центральной ямки (порядка 20°); к периферии их становится меньше в три-четыре раза.

На рис. 1 показана примерная зависимость распределения числа (n) палочек и колбочек (на 10^{-3} мм) по углу отклонения от зрительной оси (φ) [2].

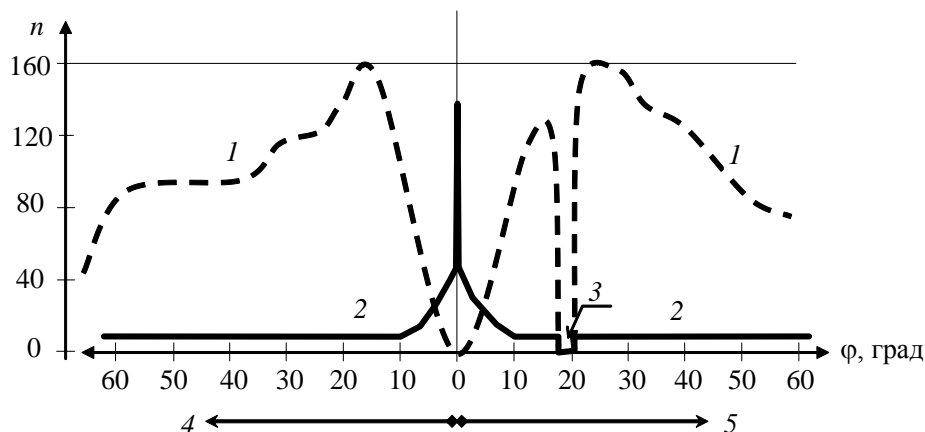


Рис. 1. Схема распределения рецепторов на сетчатке:

1 – палочки; 2 – колбочки; 3 – слепое пятно; 4 – височная сторона; 5 – носовая сторона

Если в центре *fovea* число колбочек (плотно упакованных так, что их размеры уменьшаются примерно в два раза, т.е. если колбочки – круговые цилиндры, то они сплющиваются в шестигранные цилиндры) порядка 2000 [3], то в области желтого пятна (где нет палочек) их порядка 50000 [4].

С позиций существования «двух зрений» – центрального и периферического, – известно следующее: максимальная чувствительность периферической части сетчатки к восприятию света соответствует углу $10^{\circ} \div 12^{\circ}$ от центра [1]; уже на расстоянии 10° от центральной ямки острота зрения равна 0,2 и быстро спадает к периферии [5].

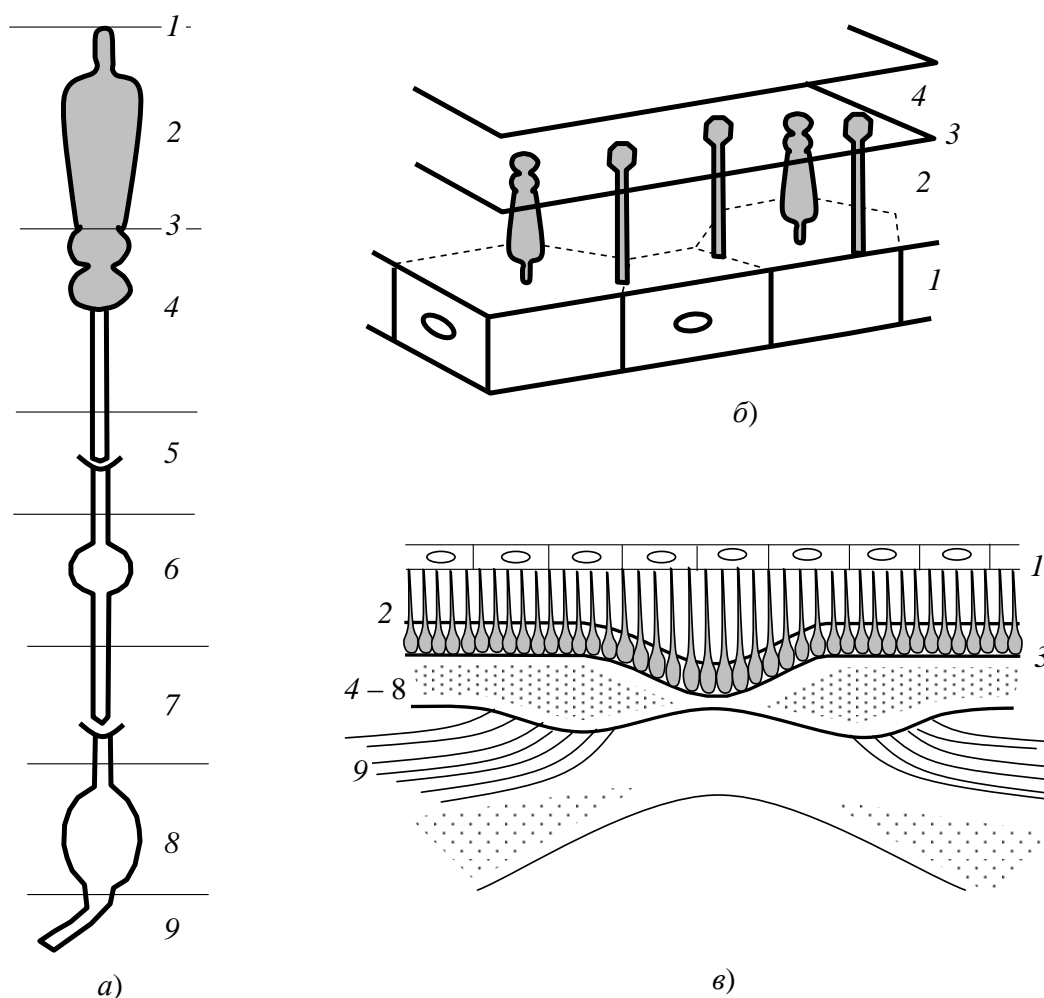


Рис. 2. Схемы слоев сетчатки (а), «установки» рецепторов (б) и поперечного разреза сетчатки на участке центральной ямки желтого пятна (в):

1 – пигментный слой; клетки имеют форму шестигранных призм, расположенных в один ряд; тела клеток заполнены зернами пигмента – фусцина; 2 – фоторецепторный слой, состоящий из палочек и колбочек; 3 – наружная пограничная мембрана; 4 – наружный зернистый слой, образованный ядрами;

5 – наружный сетчатый слой синапсов; 6 – внутренний зернистый слой, образованный телами и ядрами биполярных эритроцитов (второй нейрон); 7 – внутренний сетчатый слой синапсов;

8 – ганглиозный слой третьего нейрона; 9 – слой нервных волокон

Изложенное подтверждает развиваемые модельные представления и, в частности, утверждение о том, что часть рецепторов в составе периферийных полей находится в центральных областях, т.е. «далеко» расположены относительно периферийной зоны. Это определяет «длинные» аксоны в направлении от этой зоны к центру сетчатки. Для частичного устранения этого «дефекта» (т.е. выравнивание длин путей) необходимо «поднять» по оси глубины z нервные клетки. Именно это и наблюдается в реальной сетчатке над полем рецеп-

торов. Хотя изменение толщины сетчатки связано еще с одним процессом, заключающимся в исчезновении части нейронов над рецепторами при движении к центру *fovea*.

Известно следующее:

- в области желтого пятна строение сетчатки изменяется: по мере приближения к центральной ямке пятна (*fovea centrales*) *исчезает* слой нервных волокон, затем слой ганглиозных клеток и внутренний сетчатый слой; далее исчезает внутренний зернистый слой ядер и наружный сетчатый слой (рис. 2). На дне центральной ямки сетчатка состоит лишь из колбочек, а остальные элементы как бы сдвинуты к краю пятна [5];

- в области ямки наблюдается утончение слоя нервных тканей, в которой к тому же нет кровеносных сосудов (создающих тень на сетчатке) [4]: толщина сетчатки около зрительного нерва порядка 0,4 мм; в области пятна – 0,1 мм; у зубчатой линии (на краю рабочей части сетчатки) – порядка 0,1 мм. Следует отметить также то, что «нервные волокна направлены к слепому пятну *по кратчайшему пути*, за исключением случаев, когда, идя по такому пути, им пришлось бы пересечь желтое пятно».

Итак, сетчатка – сложно организованная система как в «плоскости», так и по глубине. Имеющийся материал об ее организации носит описательный характер, а большая часть количественных оценок – статистические оценки – часто противоречивы (например, в одном источнике число колбочек до 7 млн, палочек до 130 млн, а в другом колбочек до 8 млн, палочек до 140 млн). Поэтому далее будем исходить из концепции подобия организации сетчатки на положения теории активного восприятия.

Правило 1. Область *fovea* – большая точка, отображаемая в центр обработки; колбочки – рецепторы дневного видения, образующие относительно палочек – рецепторов сумеречного видения (условно), независимую систему, упорядоченную в поле рецепторов; поле рецепторов разбито на области интересов *A, B, C*.

Картографические направления на сетчатке

Пусть вокруг большой точки A_0 упорядочены колбочки, образуя матрицу 4×4 на планигоне. Относительно этой точки имеем, кроме диагональных, восемь направлений, образующих четыре конуса (или два полных конуса в плоскости) с углом при вершине 2φ , где $\varphi \approx 18,43^\circ$, $\operatorname{tg} \varphi = 1/3$ (рис. 3, *a*). В результате получаем базовую меридиональную сетку поля сетчатки относительно полюса A_0 , на которую с некоторым шагом (регулярным или нет) можно нанести линии параллелей. Полученная сетка – *картографическая сетка* на планигоне.

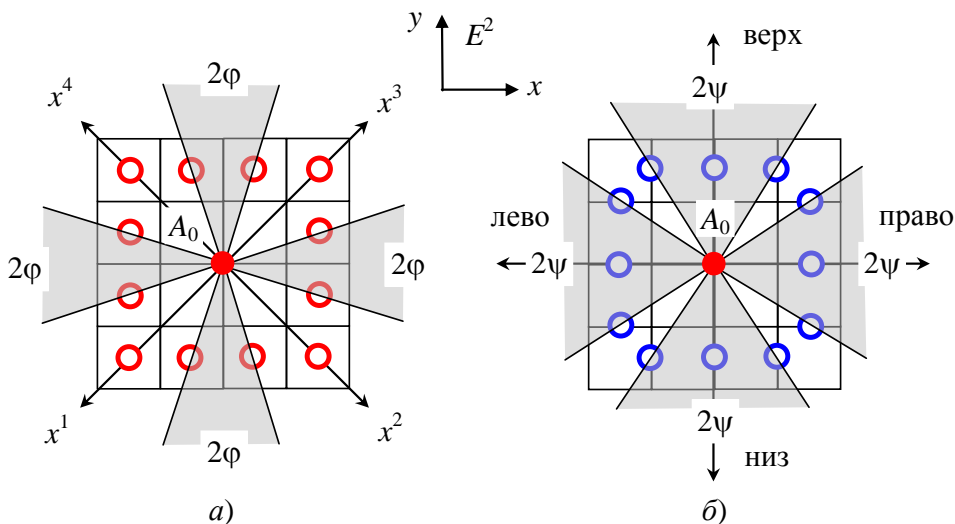


Рис. 3. Картографические линии меридианов:

a – для колбочек; *б* – для палочек

Далее, поскольку дендриты палочек имеют радиальную ориентацию и располагаются между отростками пигментного эпителия сетчатки [6], то, считая клетки планигона (рис. 3) клетками эпителия (в реальной сетчатке такие клетки имеют шестиугольную форму), получаем новую сетку меридианов для палочек (рис. 3, б). Такая сетка имеет базовыми координатными направлениями оси x , y декартовой системы координат, каждой из которых можно поставить в соответствие пару конусов (в плоскости) с углом при вершине 2ψ , где $\psi \approx 33,69^\circ$, $\operatorname{tg}\psi = 2/3$.

Полученные системы координат и картографических меридиональных линий удовлетворяют:

- положениям теории активного восприятия на ориентационные свойства системы полных групп по углам $\varphi = \operatorname{arctg}1/3$, $\psi = \operatorname{arctg}2/3$;
- известным положениям дифференциации свойств колбочек и палочек, где последние отвечают за ориентацию в пространстве;
- системе пропорциональных шкал на базе U -граммы.

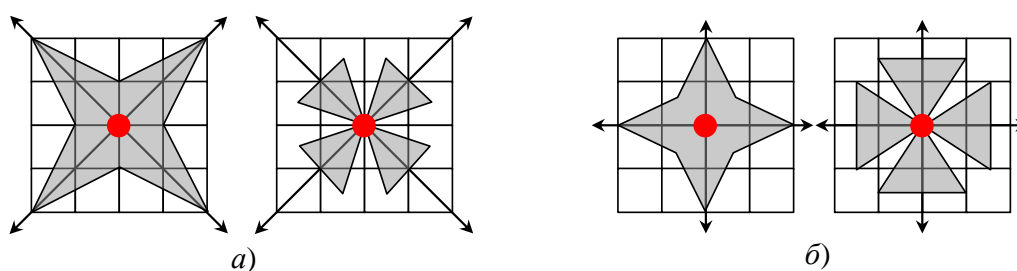


Рис. 4. Интерпретации координатных направлений на диагональную и прямую розы U -граммы:
а – для системы колбочек; б – палочек

Последнее свойство поясняется на рис. 4, а на рис. 5 показана общая система меридиональных линий сетчатки относительно полюса – большой точки A_0 (стрелками выделены базовые направления). Рассмотрим эту систему линий, представленную на квадратном планигоне, с позиций симметрии.

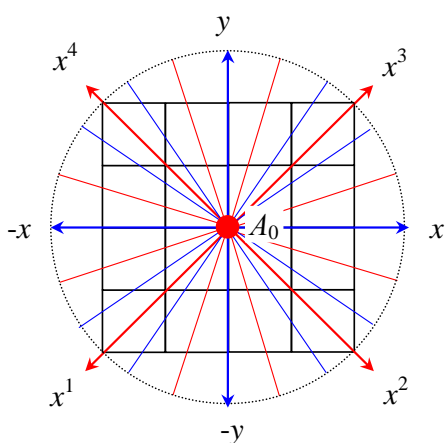


Рис. 5. Меридианы полюса

Во-первых, поскольку базовые координатные направления (x^1, x^2, x^3, x^4) , $(x, -x, y, -y)$ при вершине A_0 имеют прямые углы, то они отражают симметрию четвертого порядка – квадратного планигона. Во-вторых, так как угол «конуса зрения» для колбочек, равный $2\varphi \approx 36,86^\circ$, по порядку значения числа близок к 36° , а в «расширенном» варианте – 72° , то имеем отражение симметрии пятого порядка (квазисимметрия). Аналогично для «угла зрения» палочек получаем: $\psi \approx 33,69^\circ \sim 30^\circ$, что соответствует в «расширенном» варианте углу 60° , т.е. имеем отражение симметрии шестого порядка (напомним, что палочки «растут из ребер» шестигранных призм).

Следовательно, квадратный планигон, наделенный «естественной» симметрией четвертого порядка, на меридианах колбочек и палочек наделяется дополнительными симметрическими свойствами, отражающими симметрии пятого и шестого порядков (пусть даже квази).

Выделим одну произвольную колбочку на планигоне, например, ту, которая находится на меридиане $18,43^\circ$ относительно координатной оси y (рис. 6, а). Отложим от этого нулевого меридиана в ту и другую стороны угол 72° , получим линии с углами относительно оси,

равными $90,43^\circ$ и $53,57^\circ$, что по порядку близко к меридианам палочек -90° и $56,31^\circ$. Откладывая далее линии по углам $\pm 144^\circ$, получаем «деформированную» пентаграмму, в вершинах которой находится три палочки и две колбочки; только одно ребро такой пентаграммы «истинно правильное» – это то, которое наблюдается в первом квадранте планигона (позиция палочки отличается от «правильной» на $0,43^\circ$).

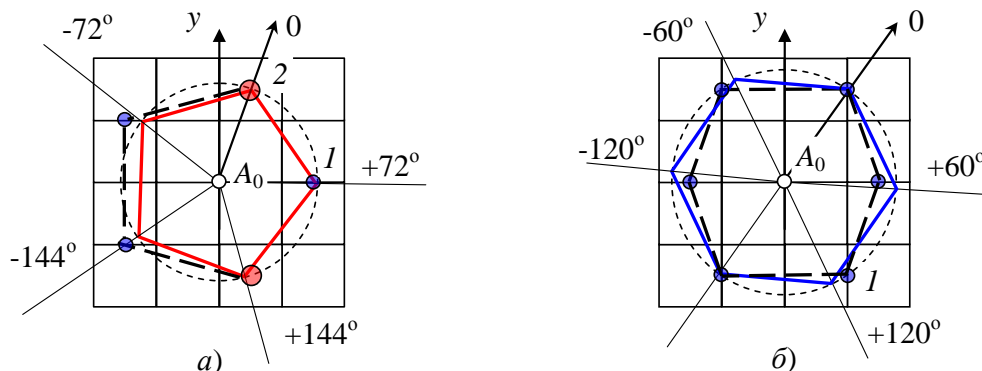


Рис. 6. Планигон с дополнительными симметрическими свойствами:
a – пятого порядка; *б* – шестого порядка; *1* – координатно упорядоченные палочки;
2 – координатно упорядоченные колбочки

Если проделать аналогичные процедуры для системы меридианов палочек на предмет выявления симметрии шестого порядка, то получим полностью «деформированный» шестиугольник, но такой, который, в отличие от пентаграммы на своих вершинах полностью состоит из палочек (рис. 6, б). Следовательно, пентаграмма (деформированная на планигоне) – отражение взаимодействия палочек и колбочек между собой.

Свойство 1. На планигоне с упорядоченными на нем рецепторами существует квазисимметрия пятого и шестого порядков.

Алгебра изображения над полем рецепторов

Рецепторы – палочки и колбочки – точечные элементы, и поэтому для их представления на планигоне необходима реализация Q -преобразования. Если для колбочек, упорядоченных на решетке 4×4 , решение однозначно, т.е. нейроны над этим полем изначально реализуют Q -преобразование, а далее U -преобразование, то для палочек, расположенных «в щелях пигментного эпителия» матрицы, вопрос открыт.

Как известно [7, 8], Q -преобразование, применяемое к пикселям изображения, определенного в конечной области, отображает это изображение в абсолютно гладкое многообразие. В это случае:

- планигон – инструмент, позволяющий выявлять на изображении его структурные элементы и их связи;
- каждый структурный элемент – визуальная масса, которая либо «размазана» однородно в области определения (вариант замкнутой области), либо локализована в центре области, как гравитационная масса (или электрический заряд), образуя область изменения потенциала по логарифмическому закону (вариант открытой двумерной области).

Поэтому уже на уровне первого слоя нейронов над полем колбочек можно получить представление на планигон, т.е. каждая колбочка – центр в своей области определения и эта область представлена (на выходе нейрона) визуальной массой. Для того, чтобы такая модель преобразований работала для палочек, «окружающих колбочки частоколом» (рис. 7, а, б), им необходим соответствующий планигон. Такой планигон (а точнее, решетку на уровне рецепторов) можно получить, если его строить смещенным на половину клетки планигона колбо-

чек (рис. 7, в, г). В этом случае сразу же возникают варианты организации полей палочек и колбочек, определяющие *направление смещения* выделяемого планигона:

1) если каждая колбочка окружена *ромбом* палочек (рис. 7, а), то смещение можно реализовать по декартовым осям x, y ;

2) если же имеем *квадрат* палочек (рис. 7, б), то смещение должно реализоваться по диагональным направлениям.

В первом случае каждой пятерке палочек для их представления соответствует (после Q -преобразования) один нейрон (рис. 7, д).

Во втором случае имеем взаимно однозначное соответствие.

Предложение 1. Область сетчатки, где требуется высокая чувствительность при низком разрешении, имеет *ромбическую* укладку палочек относительно *квадратной* укладки колбочек. В противном случае (при низкой чувствительности и высоком разрешении) имеем *квадратные* укладки как палочек, так и колбочек.

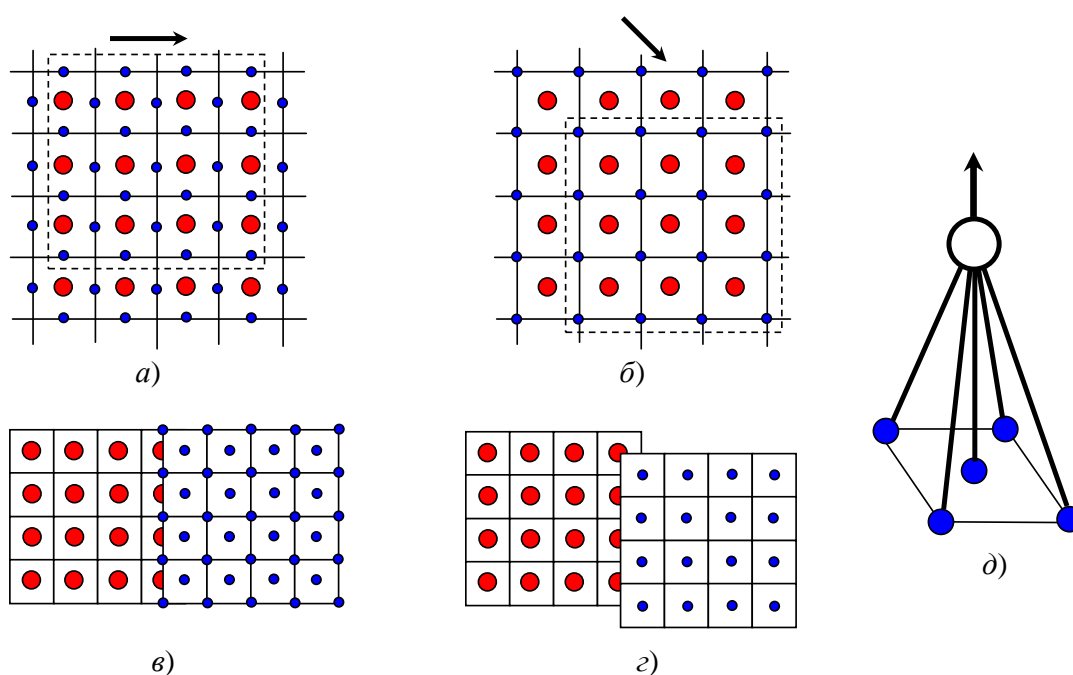


Рис. 7. Варианты организации решеток:

а – палочек; б – колбочек; в, г – варианты смещенных полей рецепторов;

д – для варианта горизонтального (или вертикального) смещения нейрон должен «обрабатывать» сразу пять рецепторов

Поскольку имеем два типа планигонов (палочек и колбочек) и между ними существует связь по варианту рис. 6, а, то допустимо существует третий, их общий планигон, построенный над планигонами палочек и колбочек. Определим эти три планигона для отличия от планигона, используемого для анализа и синтеза в теории активного восприятия, *рецепторным R-планигоном*. Функционирование рецепторного планигона соответствует функционированию обычного планигона. Пусть рецепторный планигон колбочек (RK) покрыт рецепторным планигоном палочек (RP , без какого-либо смещения), пусть такой планигон – замкнутая область определения, тогда каждая колбочка в пространстве обобщенного рецепторного планигона (RR) «засвечивает» свою клетку планигона, а каждая палочка – пару соседних клеток планигона; результатом представления является образ изображения на общем рецепторном планигоне.

Определение 1. Подрешетке колбочек размером 4×4 после реализации Q -преобразования соответствует RK -планигон; подрешетке палочек с *ромбической* организа-

цией, совмещенной с подрешеткой колбочек размером 4×4 , после реализации Q -преобразования соответствует RP -планигон; (RK, RP) планигоны образуют RR -планигон.

Примеры

1. Пентагону по рис. 6, а, представленному «реакциями» колбочек и палочек, соответствует образ $\bar{V}_4 V_9 + \bar{V}_8 \bar{V}_{13}$ замкнутой группы (V_4, V_9, V_8, V_{13}) (рис. 8, а).

2. Шестиугольнику (рис. 6, б) на шести палочках соответствует образ полной группы (рис. 8, б).

Утверждение 1. На (RK, RP, RR) планигонах действует алгебра изображений и алгебра групп.

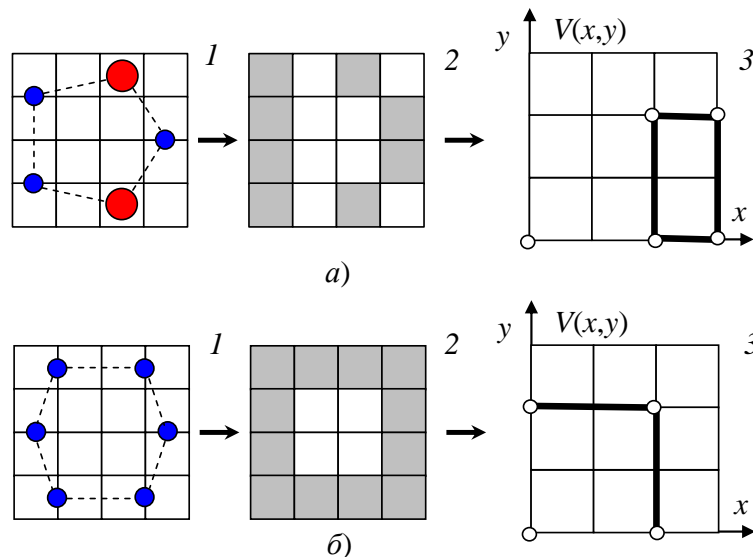


Рис. 8. Отображение полей рецепторов (1) на планигон (2) с представлением на решетке (3) для подмножества палочек и колбочек (а) и только палочек (б)

Подводя итог изложенному, выделим следующие положения:

1. Решетки колбочек централизованы относительно области ясного видения (*fovea*), как большой точки A_0 (рис. 3, а).

2. Решетки палочек, по крайней мере, в ближней зоне к *fovea* также централизованы (рис. 3, б).

3. В ближней зоне от *fovea* существует RR -планигон и его подрешетки палочек и колбочек, совмещенные в соответствии с рис. 7, а.

4. В дальней зоне от *fovea* подрешетки палочек допускают смещения по координатным осям x , y и диагональным направлениям относительно системы координат – квадрата *fovea*.

5. Область ясного видения и ближняя зона, представленная склеенными RR -планигонами, – область центрального зрения.

6. Дальняя зона на смещенных решетках и склеенных над ними RR -планигонами – область периферийного зрения.

Библиографический список

1. Ковалевская, Е.И. Глазные болезни / Е.И. Ковалевская. – М.: Медицина, 1986. – 347 с.
2. Прэтт, У. Цифровая обработка изображений: в 2 т. / У. Прэтт. – М.: Мир, 1982. Т. 2. – 480 с.
3. Элементы теории биологических анализаторов / под ред. Н.В. Позина. – М.: Наука, 1978. – 360 с.

4. Джадд, Д. Цвет в науке и технике / Д. Джадд, Г. Вышецки. – М.: Мир, 1978. – 528 с.
5. Глазные болезни / А.А. Бочарова [и др.]. – М.: Медицина, 1989. – 423 с.
6. Анатомия человека: в 3-х т. / под ред. М.Р. Санина. – М.: Медицина, 1993. Т. 2. – 633 с.
7. **Утробин, В.А.** Информационные модели системы зрительного восприятия для задач компьютерной обработки изображений / В.А. Утробин; НГТУ. – Н. Новгород, 2001. – 234 с.
8. **Утробин, В.А.** Компьютерная обработка изображений. Анализ и синтез / В.А. Утробин; НГТУ. – Н. Новгород, 2003. – 228 с.

*Дата поступления
в редакцию 15.10.2010*

V.A. Utrobin

ORGANISATION MODELS OF THE EYEBALL RETINA FIELD OF RECEPTORS

Considered ways of organising field of receptors of an eyeball retina from positions of the theory of active perception. There are two selected types of the ordered structures – lattices of cones and lattices of rods. The concept of cartographical directions on a lattice is entered. Investigated variants of interaction between selected classes of the lattices.

Key words: visual receptors, a retina, model of the organisation of a field of receptors.