

УДК 519.7

В.А. Утробин

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ ОРГАНИЗАЦИИ СЕТЧАТКИ ГЛАЗНОГО ЯБЛОКА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматриваются архитектурные аспекты организации сетчатки глазного яблока с позиций теории активного восприятия. Исследуются свойства системы «сетчатка – центр» в целом. Приводятся варианты структурной и функциональной организации сетчатки.

*Ключевые слова:* зрительное восприятие, информационная модель сетчатки, организация сетчатки.

### 1. Общие положения

Все, что входит в состав живого организма, представлено мембранами как оболочками [1]. Поэтому сетчатка глаза – мембрана. Рассмотрим возможный вариант ее организации.

О составе сетчатки известно следующее (выделим только необходимые на момент изложения данные): а) рецепторы координатно упорядочены на сетчатке, так как мозг (нижнее коленчатое тело (НКТ) и зрительные отделы мозга) «точно знает» координаты всех рецепторов в области ясного видения (fovea) и групп рецепторов на периферии; б) сами рецепторы «разбросаны» по сетчатке с увеличивающимся шагом от точки 0 (центр сетчатки) fovea к периферии; в) над рецепторами сетчатки находится два слоя нейронов, последний из которых образован ганглиозными клетками.

Отметим, что изменение шага между рецепторами вряд ли случайно, так как в противном случае потребуются дополнительные затраты на вычисления, что не допустимо с позиции «выживания», требующей высоких скоростей реакции на внешние воздействия. Такое изменение шага более всего похоже на пространственную дискретизацию с переменным шагом, а поскольку эволюция живого за миллионы лет «породила оптимальную систему», то в такой системе на уровне врожденных механизмов нет ничего «случайного». Поэтому примем за исходные следующие положения:

- изменение шага от точки 0 к периферии растет квадратично:  $1 \times 1$  в fovea;  $2 \times 2$ ,  $4 \times 4$ ,  $16 \times 16$  и т.д.;
- «палочки» – это рецепторы вне fovea, а «колбочки» – рецепторы в fovea;
- если нервные клетки рецепторов – это первый нейронный слой, то второй слой нейронов – нервные клетки, связанные с рецепторами и образующие рецепторные поля, которые допускают свое определение на множество фильтров-покрытий  $\{F_i; i = 1, \dots, 15\}$ .

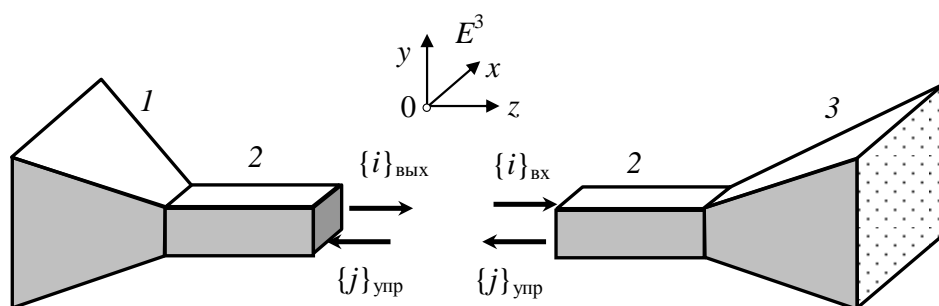
Третий слой нейронов – ганглиозные клетки, непосредственно связанные с центром, образуют более сложные рецепторные поля над вторым слоем. Каково их функциональное назначение и какова конструкция таких полей – пока неизвестно. В пределах рассматриваемой работы примем следующую гипотезу: поскольку слой ганглиозных клеток покрывает (и поэтому «обобщает» получаемый сигнал) подмножество рецепторных полей ниже лежащего слоя, то допустимо использование того же множества  $\{F_i\}$ , но над большей областью определения. В результате «интеллектуально» выявляются новые связи, которые передаются в центр обработки, а если последний «запросит» по обратной связи уточнения, то передаче подлежат данные с нижележащих слоев.

### 2. Модель организации системы «сетчатка-центр»

В соответствии с принятыми условиями сетчатка «грубо» разбивается на зоны с переменным разрешением, а в координатном представлении имеем решетку с переменным

шагом. В пространстве система «сетчатка-центр» допускает следующую функциональную организацию (рис. 1):

- сетчатка со всеми ее слоями – это усеченная пирамида ( $U_x$ -пирамида) или «интеллектуальная рупорная антенна»;
- зрительный нерв – волновод или система передачи данных, имеющая конечное число линий прямой и обратной связи;
- центр – мозг (это все, что вне сетчатки и относится к зрительной системе восприятия) – обратная усеченная пирамида ( $U_y$ -пирамида) «развертывания» принятых данных.



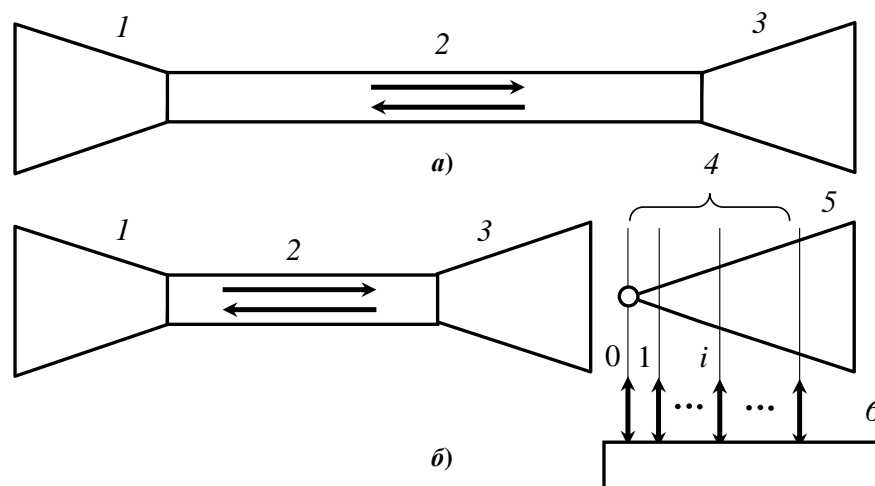
**Рис. 1. Функциональная организация системы «сетчатка-центр»:**  
1 –  $U_x$ -пирамида; 2 – канал передачи данных (волновод); 3 –  $U_y$ -пирамида

Если первая пирамида «сворачивает» (кодирует) данные с передачей их по оси  $z$ , то вторая «развертывает» (декодирует) в плоскости «экрана».

**Определение 1.**  $U_x$ -пирамида – система сжатия видеоданных;  $U_y$ -пирамида – система восстановления видеоданных, а  $U_z$ -пирамида – система восстановления пространственной глубины. Если первые две упорядочены в  $E^2$ , то  $U_z$ -пирамида определена над  $U_y$ -пирамидой в  $E^3$ .

Для цели анализа организации сетчатки в ее широком понимании как многослойной системы особый интерес представляет организация  $U_x$ -пирамиды. Отметим следующее:

1. Функциональное и структурное устройство  $U_y$ -пирамиды (а это  $Q$ -пирамида в составе пирамиды принятия решений) рассмотрено в работах [2 – 4].
2. Элементы устройства  $U_z$ -пирамиды изложены в работе [5].



**Рис. 2. Варианты реализации системы «сетчатка-центр»:**  
а – передача данных с управлением; б – самообучающаяся система (1 –  $U_x$ -пирамида; 2 – канал передачи данных; 3 –  $U_y$ -пирамида; 4 – слои  $\{i\}$ ; 5 –  $U_z$ -пирамида; 6 – память)

Модельное представление по рис. 1 допускает две физические реализации:

- 1) «обычная» система передачи данных, решающая задачи сжатия, кодирования, собственно передачи данных и их восстановления (рис. 2, а);
- 2) самообучающаяся распознающая система как система анализа и принятия решения (рис. 2, б).

Относительно блока памяти отметим следующее. Во-первых, элементарным конструктивным элементом памяти является трехмерный триггер, элементарным модулем (для полных групп) является пятислойный «кристалл» полных групп, а в роли ячейки памяти выступает «кристалл» полных и замкнутых групп, который фактически является дешифратором этих групп (ДПЗ) с аналогом на ориентационные колонки в зрительной коре головного мозга [4 – 6].

Во-вторых, на множестве слоев  $\{i\}$  первый слой (0 по рис. 2, б) – это единственный слой, состоящий из одной ячейки ДПЗ; остальные – множество «стопок» ДПЗ на гладко склеенных планигонах.

Модельное представление по рис. 1 не случайно и определяется четырехмерными представлениями с моделью на гиперкуб в проекции на плоскость, а в трехмерном представлении по направлению глубины – это усеченная пирамида. При этом возможны два подхода в интерпретации модели по рис. 1 – формальный и субъективный.

Для первого варианта предполагаем, что существуют два наблюдателя, изолированные друг относительно друга. Если первый «живет» в четырехмерном пространстве  $E^3 - t$ , то и второй «живет» в своем  $E^3 - t$  (этим пространствам на модели по рис. 1 соответствуют свои усеченные пирамиды (1, 3)). Их изолирует третья трехмерное пространство, где нет времени (а это по рис. 1 – канал 2). Общее число измерений в таком «слоеном» пространстве равно 11, т.е. соответствует пространству  $E^4$ .

Для второго варианта предполагаем, что любому наблюдателю (как Я) соответствует три позиции в пространстве событий [4]: Я – сознательное (осознанное понимание себя); Я – подсознательное («внутренний голос»); Я – внешнее (наблюдение себя со стороны). Первая и третья позиции существуют в пространстве и времени, где время для первой позиции – внутреннее, а для третьей – внешнее. Для второй позиции понятие времени не нужно. Получаем опять 11 измерений 4-мерного пространства.

### 3. Пространственная ориентация слоя рецепторов

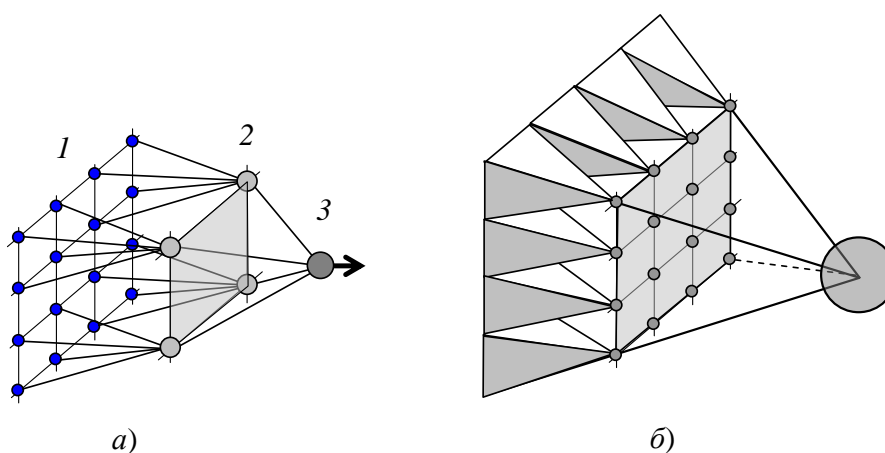
В общем случае система, организованная по рис. 1, с позиций информационных преобразований – это отношение типа «внешний мир/внутренний мир», где внешний мир – среда, погруженная в  $E^3$ , а внутренний мир – среда наблюдателя. Такому представлению соответствуют две  $Q$ -пирамиды с их  $U$ -преобразованиями –  $Q$ -пирамида над полем рецепторов и  $Q$ -пирамида над планигоном (отметим, что конус и пирамида – это топологически эквивалентные объекты). Между этими пирамидами существует поток данных (по зрительному нерву). Поскольку поток данных на пути передачи не претерпевает изменений, то канал «информационно пуст» и допускает свое исключение из информационной модели. Результатом имеем два модельных представления [4]:

- конус на паре  $Q$ -пирамид, где основание одной – «экран» (окно), отображающий внешний пусть плоский мир, а основание другой – «экран» (или окно), отображающий внутренний пусть плоский мир. Общая вершина – это то, что мы считаем «своим Я»;
- пара противоположно ориентированных и совмещенных в цилиндре  $Q$ -пирамид по типу организации  $U$ -ячейки куба полных групп.

Пусть рецепторы упорядочены на регулярной решетке. Выделим на множестве  $N \times N$  рецепторов ячейку размером  $4 \times 4$  рецептора, над которой построим пирамиду (рис. 3, а). Такая организация обеспечивает на одной операции, реализуемой фильтром  $F_0$ , сжатие данных в 16 раз. Если считать, что зрительная система на уровне сетчатки и ее нейронов обеспечивает сжатие данных (вне fovea, где коэффициент преобразования данных равен 1:1) порядка

100, то необходима еще одна такая структура, для которой уровень 3 предыдущей пирамиды станет уровнем 1 следующей (рис. 3, б). Тогда общий коэффициент сжатия на одной операции равен  $16^2$ , а на двух – 128 (одна реализуется  $F_0$  и еще одна на фильтре из  $\{F_1, F_2, F_3\}$ ). Если ввести еще одну операцию из оставшегося подмножества  $\{F_i\}$ , то получим значение коэффициента, равное 64, что близко к 100, так как 100 – это достаточно грубая и усредненная оценка [7]: в fovea 1:1, далее порядка 1:100, на дальней периферии существенно более 1:100.

Таким образом, для передачи данных по результату действия фильтра  $F_0$  и одного из подмножества  $\{F_i; i \neq 0\}$  необходимы две пирамидальные структуры, которым можно поставить в соответствие два слоя нейронов над рецепторами сетчатки (последние также следует рассматривать как нейроны). В результате имеем модель реальной сетчатки глаза, но построенной на регулярной решетке. Такая модель верна по направлению  $z$ , но не в плоскости  $xOy$ .

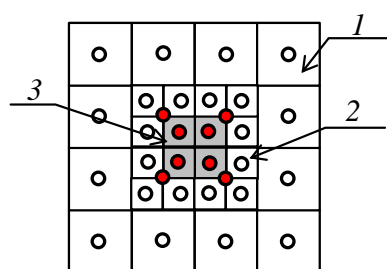


**Рис. 3. Модельные пирамидальные представления:**

*a* – «рецепторная» пирамида; *б* – пирамида ганглиозной клетки над «рецепторными» пирамидами с общим полем рецепторов  $64 \times 64$

(1 – решетка рецепторов; 2 – первый слой обработки; 3 – последний слой обработки)

Разработанное модельное представление позволяет утверждать, что каждый нейрон сетчатки реализует однотипные операции обработки на множестве  $\{F_i\}$ , а различие, по крайней мере, с позиции только обработки по схеме «снизу-вверх», заключается в размерах области определения (т.е. в размерах рецепторных полей).



**Рис. 4. Поле рецепторов:**

1 – внешняя периферия;  
2 – внутренняя периферия;  
3 – fovea

Теперь рассмотрим вариант решетки с увеличивающимся к периферии пространственным шагом:  $1 \times 1$ ,  $2 \times 2$ ,  $4 \times 4$  и т.д. Такую решетку можно построить на основе регулярной. Пусть все поле рецепторов определено на планигоне  $4 \times 4$ , т.е. каждый рецептор находится в центре клетки планигона (рис. 4). Если размер планигона равен четырем единицам длины по осям  $x$ ,  $y$ , то самые удаленные от центра планигона рецепторы распределены с шагом в одну единицу длины по  $x$ ,  $y$ , т.е. упорядочены на решетке  $1 \times 1$ . Следующий ряд периферических рецепторов будет упорядочен во внутреннем квадрате  $2 \times 2$  планигона на решетке  $1/2 \times 1/2$ . Центр планигона и его окрестность размером  $1 \times 1$  – область «неразличимости» на планигоне  $4 \times 4$ , так как разрешающая способность планигона – клетка  $1 \times 1$ . Такая окрестность – «большая» точка – fovea, требующая перехода на следующий уровень разрешения. Для реального глаза это означает передачу данных от каждого рецептора fovea.

Итак, имеем два модельных представления организации сетчатки – регулярная структура по рис. 3 и «пространственно-распределенная» структура по рис. 4. Для последней необходимо выделение рецепторных полей нейронов с построением над ними пирамид обработки данных. Для этого надо ввести в поле рецепторов дополнительные рецепторы, помещая их в узлы клеток планигона: для планигона  $4 \times 4$  дополнительные рецепторы попали на углы квадратного поля fovea (относительно внешних периферических рецепторов) и в поле fovea (относительно внутренних периферических рецепторов). Поскольку эти рецепторы «принадлежат» fovea, то они – «колбочки», из которых составлена область ясного видения.

**Правило 1.** Пусть поле рецепторов размером  $N \times N$  – планигон  $4 \times 4$ , а рецепторы упорядочены на пространственно-распределенной системе по закону  $2^n$ , где  $n = 1, 2, \dots$  Тогда дополнительные до четырех рецепторы – это колбочки, отличающиеся от периферийных трех рецепторов (палочек) каким-либо параметром, верным для рецепторов области ясного видения.

#### 4. Структурная организация сетчатки

Исключение из рассмотрения канала передачи данных предполагает некоторый уровень пересечения упакованных друг в друга конусов (усеченных пирамид). Этот уровень, в силу модели по рис. 2,  $a$ , задает «сечение канала передачи данных», либо планигон над полем рецепторов. Размер такого сечения зависит от геометрии связанных конусов (или пирамид с квадратным основанием), т.е. от величины угла при вершине: если, например, этот угол равен  $90^\circ$ , то имеем (в дискретном представлении)  $K$ -пирамиду (координатную пирамиду [4]).

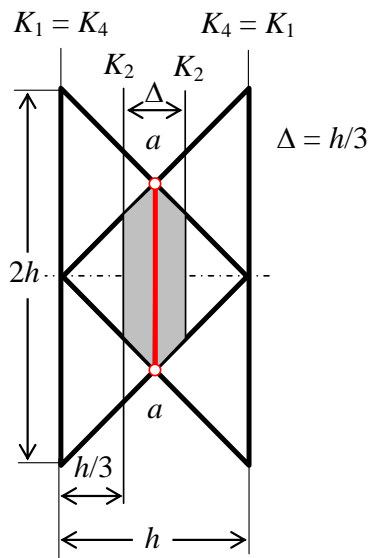


Рис. 5. Упаковка двух  $Q$ -пирамид ( $aa$  – размер планигона)

Анализ геометрии базовой  $Q$ -пирамиды над планигоном проведен в работе [4], где показано, что такая пирамида, построенная над квадратом – половина октаэдра, ребра которого (с углом при вершине в  $90^\circ$ ) задают систему координат  $(x^1, x^2, x^3, x^4)$ , а уровни  $K_1, K_2, K_4$ , рассматриваемые как превышение над местностью, находятся в отношении

$$K_4/K_2/K_1 = 0/(1/3)/1.$$

Поэтому упакованные  $Q$ -пирамиды образуют «слой» толщиной  $\Delta = h/3$  между уровнями  $K_2$  этих пирамид, где может находиться планигон (рис. 5).

Пусть планигон находится на высоте  $h$  относительно основания  $Q$ -пирамиды, имеет размеры  $h \times h$ ; тогда допустимо модельное представление по рис. 6. Если это представление считать базовым, то относительно структурной организации получаем:

1) три уровня обработки данных – периферийный (3), промежуточный и центральный (на рис. 6 – это  $K_1, K_2, K_4$ , где  $K_2$  представлен уровнем 1, а  $K_4 \equiv A$

– «большая» точка 2);

2) два слоя нейронов с одинаковой упорядоченностью рецепторов на четырех склеенных рецепторных полях в пределах своих уровней, на которых могут функционировать только четыре фильтра –  $F_0, F_1, F_2, F_3$ . Третий слой третьего уровня (fovea) представлен четырьмя рецепторами, на которых функционирует  $F_0$ , отображающий слой в точку  $A$ ;

3) отношение числа рецепторных полей по уровням имеет вид  $4/4/1$ . Если считать, что  $K_1$  – уровень периферийных рецепторов, а  $K_4$  – центральных, то имеем для  $K_1$  четыре поля и четыре нейрона над полями; для  $K_4$  – пять полей (и нейронов), из которых четыре – «поля периферические и поля центральные» и одно «точно центральное».

**Правило 2.** Пусть рецепторным полям, упорядоченным по схеме  $4/4/1$ , соответствуют три уровня обработки данных – уровень периферийного зрения, промежуточного и цен-

трального соответственно. Пусть каждому полю соответствует свой обрабатывающий нейрон. Тогда «волновод» между полем рецепторов и полем отображений (проекций) центра – «трубчатая слоевая» координатно упорядоченная система линий связи.

Именно таким свойством, как известно, наделен зрительный нерв, длина которого не более 50 мм. На рис. 7 показана организация «волновода или кабеля» упаковки линий связи. Если данную модель применить к базовой  $Q$ -пирамиде по рис. 3, а, где число рецепторов, образующих поле, должно быть не четыре, а 16, то принцип упаковки линий связи сохраняется, но возрастает число линий. В результате будем иметь (рис. 8): 1) «центральную жилу» – fovea; 2) внутренний слой с «крестом» линий связи промежуточного слоя; 3) внешний слой с «крестом» линий связи периферийного слоя.

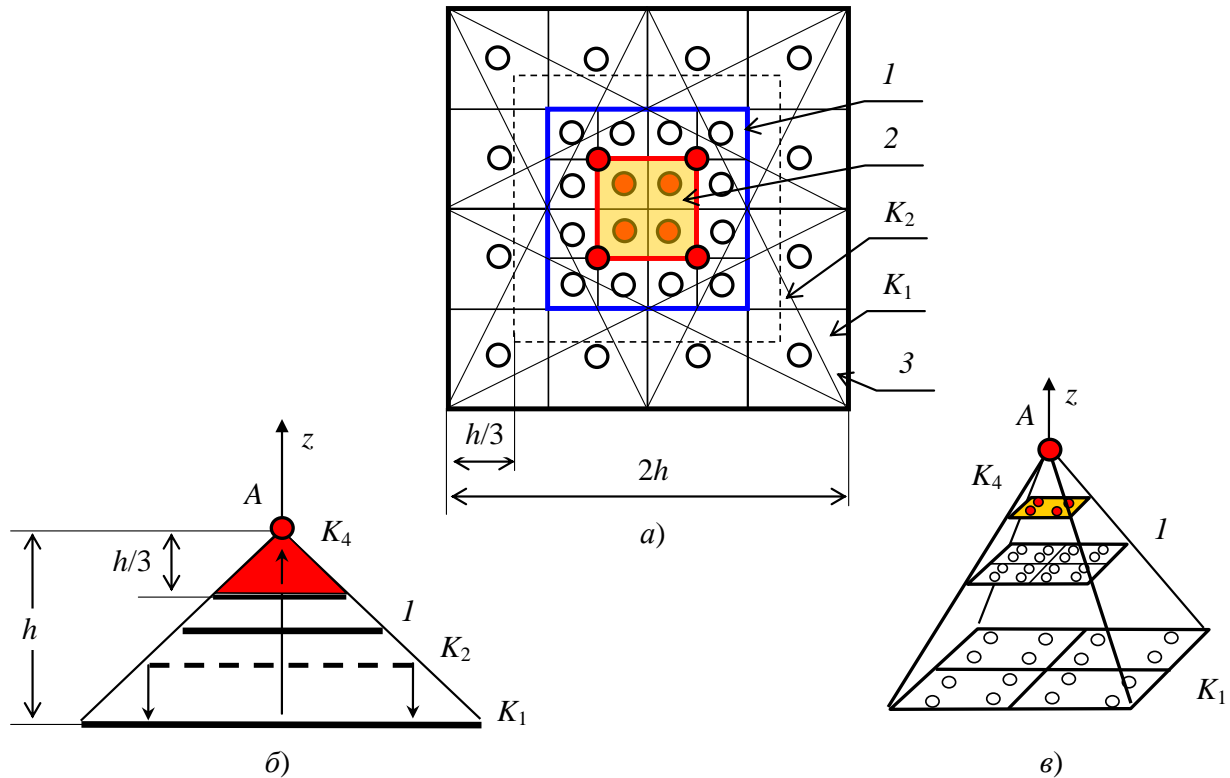


Рис. 6. Структурная организация  $Q$ -пирамиды по слоям рецепторов (а) и ее вид по оси глубины  $z$  (б, в):

1 – планигон по линии  $aa$  рис. 5; 2 – fovea, отображенная с помощью  $Q$ -преобразования в точку  $A$  уровня  $K_4$  пирамиды; 3 –  $U$ -грамма в поле рецепторов (стрелками показаны направления проектирования; пунктирной линией – уровень  $K_2$  и его проекция на уровень  $K_1$ )

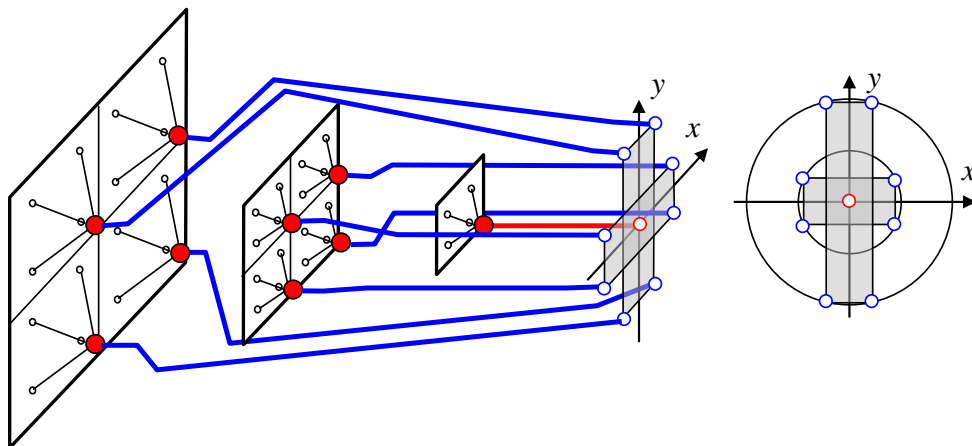


Рис. 7. Упаковка линий связи в составе пирамиды нейронов

Такая упаковка становится полной, поскольку отражена в координатном пространстве  $E^2$  своими «крестами», но она требует согласования двух модельных представлений по рис. 3, а, где поле рецепторов имеет размер  $4 \times 4$ , и рис. 6, а с размером поля  $2 \times 2$ . Поэтому в базовую пирамиду по рис. 3,а необходимо введение уровня  $K_2$ , которого там нет (аналогично для рис. 3, б). Но в этом случае в два раза уменьшится коэффициент сжатия. Для его поддержания необходимо отказаться от условия, что нейроны рецепторных полей выполняют две функции, соответствующие фильтру  $F_0$  и одному из  $\{F_i\}$ .

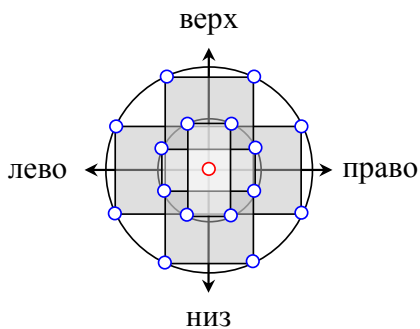


Рис. 8. Упаковка линий связи для модели зрительного нерва

Результатом имеем два варианта функционирования пирамидальной модели сетчатки:

*Алгоритм 1.* Все нейроны всех уровней – «обычные» сумматоры (тонические нейроны), реализующие  $Q$ -преобразование и не более.

*Алгоритм 2.* Цикл зрительного восприятия, в первом приближении, разделен на два такта. В первом все нейроны реализуют  $Q$ -преобразование с синхронной передачей данных в центр. Во втором все нейроны

(кроме области ясного видения) реализуют  $U$ -преобразование с передачей результата разложения в центр (фазические нейроны).

Естественно, что возможны варианты: например, все периферические нейроны реализуют только  $U$ -преобразование. Тогда для оценки общей освещенности при решении задачи идентификации фона (день/ночь) потребуются дополнительные нейроны типа горизонтальных клеток сетчатки глаза. В любом случае выбор того или иного конкретного варианта функционирования и состава нейронов зависит от прикладного назначения сетчатки и нами не рассматривается.

## 5. Функциональная организация сетчатки

Пусть слоям рецепторов и уровням  $Q$ -пирамиды по рис. 6, в соответствуют поля «интереса» (рис. 9, а):

1 – слой и уровень 1 относительно остальных – поле «дальнего обнаружения», а зона периферийных рецепторов, упорядоченных на проекции уровня  $K_2$  (рис. 6, а), – поле «малого интереса» и одновременно – поле «дальнего контроля»;

2 – слой и уровень 3, одновременно зона промежуточных рецепторов – поле «ближнего обнаружения» и поле «заинтересованности»;

3 – слой и уровень 2 – fovea – поле и зона максимального «интереса».

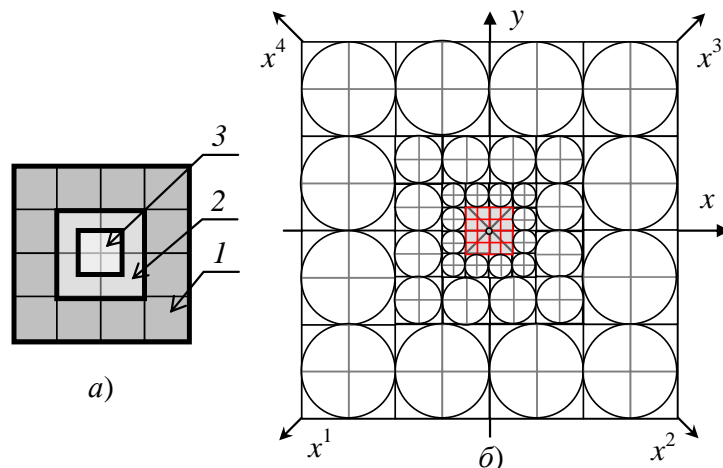
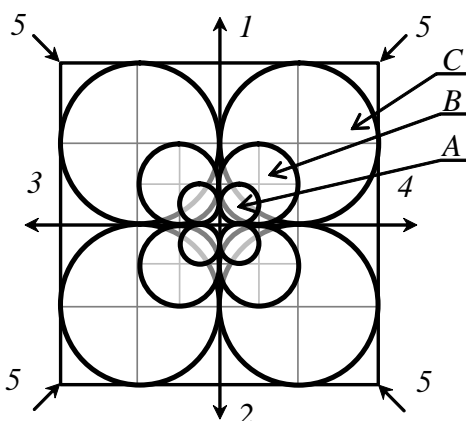


Рис. 9. Структурная организация сетчатки на матрице  $16 \times 16$ : а – поля интересов (1, 2, 3); б – укладка рецепторных полей

В результате на матрице  $8 \times 8$  имеем три зоны (рис. 9, а) – дальнюю, ближнюю, центральную, число рецепторных полей которых относится как  $12/4/1$ . Такая структурная организация не отвечает изложенным требованиям, так как в ней появились «лишние» рецепторные поля – «ушки», отражающие геометрию квадрата, а не окружности (см. рис. 8), т.е. появились поля рецепторов, «контролирующие» диагональные направления –  $x^1, x^2, x^3, x^4$ .

Подобным образом функционально и структурно организованная сетчатка, позволяющая «контролировать» диагональные направления, является *архитектурой* системы «сетчатка». Поскольку в пространстве (речь идет не просто об укладке рецепторов на поверхности сетчатки, о чем пока говорится только в первом, очень грубом приближении, см. рис. 6, а, в) – это пирамида, то видимое на рис. 9, б диагональное рецепторное поле (по каждому направлению  $x^i$ ) предполагает существование невидимого (в проекции) диагонального поля. Это связывает два соседних уровня  $Q$ -пирамиды, например, уровни  $K_1$  и  $K_2$ . В результате «процесс распространения интереса образует конус Маха». На четырех диагональных направлениях в четырех квадрантах сетчатки имеем четыре таких конуса (рис. 10). Таким образом организованная сетчатка позволяет объяснить существование двух «дефектов» зрения [8]: 1) астигматизм именно по направлениям 5 (см. рис. 10); 2) цилиндрическую дисторсию по вертикали и горизонтали (см. рис. 8).

**Утверждение 1.** Диагональные направления планигона, на котором заданы направления верх/низ, лево/право, – градиентные направления интереса, а им обратные – направления внимания.



**Рис. 10.** «Конусы Маха» на планигоне с переменным разрешением:  
1, 2 – верх, низ; 3, 4 – лево, право; 5 – направления распространения «интереса»;  
A, B, C – зоны интересов

### Заключение

Построена модель организации сетчатки глазного яблока как системного целого в ее взаимодействии со зрительными отделами головного мозга (определение 1), позволяющая выделить следующие задачи управления по обратной связи для технических систем (часть задач рассмотрена в работах [4, 5]):

- управление процессом дополнительной передачи данных;
- управление процессами сжатия или расширения поля зрения на планигоне;
- управление видеоглазом по внешней обратной связи с учетом поступающих данных;
- управление «зрачком» видеоглаза (по внешней обратной связи);
- реализация механизма саккад, тремора и дрейфа (при необходимости);
- отключение видеоглаза с сохранением «картинки» в буферной оперативной памяти.

Представлены модельные варианты пространственной ориентации слоя рецепторов сетчатки, позволяющие реализовать процедуру сжатия данных для их передачи в центр обработки и упорядочить отношения между двумя классами рецепторов (правило 1).



Рассмотрены вопросы структурной и функциональной организации сетчатки, позволяющие:

- выделить периферийные и центральные поля сетчатки в их представлении на планигоне (правило 2);
- сформулировать алгоритмы функционирования пирамидальной модели сетчатки;
- отметить специфику диагональных направлений сетчатки, представленной на планигоне (утверждение 1).

#### Библиографический список

1. **Рубин, А.Б.** Биофизика: В 2-х т. Т. 1. Теоретическая биофизика / А.Б. Рубин. – М.: Книжный дом «Университет», 1999. – 448 с.
2. **Утробин, В.А.** Информационные модели системы зрительного восприятия для задач компьютерной обработки изображений / В.А. Утробин; НГТУ. – Н. Новгород, 2001. – 234 с.
3. **Утробин, В.А.** Компьютерная обработка изображений. Анализ и синтез / В.А. Утробин; НГТУ. – Н.Новгород, 2003. – 228 с.
4. **Утробин, В.А.** Компьютерная обработка изображений. Принятие решений в пространстве эталонов / В.А.Утробин; НГТУ. – Н. Новгород, 2004. – 221 с.
5. **Утробин, В.А.** Компьютерная обработка изображений: Информационные модели этапа понимания / В.А. Утробин; НГТУ. – Н.Новгород, 2006. – 247 с.
6. **Утробин, В.А.** Информационная модель многомерной ячейки памяти // Системы обработки информации и управления. Труды НГТУ. 2004. С. 21-31.
7. **Джордж, Ф.** Мозг как вычислительная машина / Ф. Джордж. – М.: Изд-во иностр. литр-ра, 1963. – 528 с.
8. **Ивенс, Р.М.** Введение в теорию цвета / Р.М. Ивенс. –М.: Мир, 1964. – 184 с.

*Дата поступления  
в редакцию 06.07.2010*

**V.A. Utrobin**

#### **INFORMATION MODELS OF THE EYEBALL RETINA ORGANISATION**

Considered architectural aspects of the eyeball retina organization from positions of the theory of active perception. Investigated properties of system «the retina - the center» as a whole. Variants of the structural and functional organisation of a retina are resulted.

*Key words:* visual perception, information model of a retina, the retina organisation.