

В.И. Терехов

## ПРИМЕНЕНИЕ КОГНИТИВНОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ГРАФИКИ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ АКТУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ ЛИЦАМ, ПРИНИМАЮЩИМ РЕШЕНИЕ

*В качестве одного из инновационных методов принятия и моделирования решений предложено использовать метод анаморфирования, относящийся к когнитивной компьютерной графике. Метод позволяет визуализировать сложные распределения различных показателей, которые необходимо учитывать лицу, принимающему решение (ЛПР), на электронной карте местности, уменьшая размерность пространства решения пропорционально количеству анализируемых показателей. С учетом недостатков существующих методов разработаны два модифицированных варианта, один из которых работает на подготовительном этапе принятия решения, а второй — в реальном режиме времени. Показано, что метод анаморфирования — перспективный метод, позволяющий принимать решение и проводить его визуальное моделирование с учетом как отдельных, так и комплексных актуальных показателей в различных режимах работы ЛПР всех уровней.*

**E-mail:** [iu5vmch@rambler.ru](mailto:iu5vmch@rambler.ru)

**Ключевые слова:** *лицо, принимающее решение, методы когнитивной компьютерной графики, алгоритм анаморфирования, морфинг, модифицированный алгоритм анаморфирования.*

**Введение.** В настоящее время существуют различные методы визуализации актуальной информации, применяемые для выявления закономерностей в различных предметных областях, сокращающие время выработки обоснованного варианта решения. Однако резкое усложнение задач принятия решения, связанное со значительным увеличением объема исходных данных о местности и обстановке, имеющихся силах и средствах, возрастанием динамики происходящих процессов с одновременным уменьшением времени на его выработку, приводит к необходимости использования лицом, принимающим решение (ЛПР), новых методов визуализации актуальной информации. Кроме того, это следует из закона необходимого разнообразия, сформулированного У.Р. Эшби [1, 2], который устанавливает соответствие внутреннего разнообразия системы разнообразию механизмов ее управления. Это означает, что невозможно управлять некоторой системой с помощью инструментов, которые проще ее. Таким образом, для визуализации данных, требуемых ЛПР, необходимо определить инструмент (метод), сложность которого соответствует сложности решаемой задачи.

В качестве метода анализа исходных данных и принятия обоснованного варианта решения на основе визуализации актуальной информации предлагается **метод анаморфирования** [2], относящийся к

когнитивной компьютерной графике, которая, в свою очередь, принадлежит методам вычислительного интеллекта (ВИ).

В настоящее время ВИ определяют как научное направление, в котором решаются задачи искусственного интеллекта на основе новых нетрадиционных методов вычислений. Под технологией ВИ понимают совокупность новых нетрадиционных методов вычислений и средств обработки знаний, документооборота, методов выработки и выбора альтернативных вариантов решений, объединенных в целостную технологическую систему для принятия и доведения решений до исполнителей. Как правило, такая совокупность предполагает наличие развитого интерфейса, системы (или элементов) ВИ и возможность использования электронных карт местности.

Принято, что ВИ включает в себя следующие основные методы:

— нейросетевые, использующие обучение, адаптацию, классификацию, системное моделирование и идентификацию систем на основе исходных данных;

— нечеткой логики, основанные на теории нечетких множеств и обеспечивающие эффективные средства математического отражения неопределенности и нечеткости исходных данных, позволяющие построить модель, адекватную исследуемой предметной области;

— генетические, использующие синтез, настройку и оптимизацию исследуемых систем с помощью специально организованного случайного поиска и эволюционного моделирования.

Следует отметить, что в последнее время число новых методов, относящихся к перечисленным методам, постоянно увеличивается, не являясь строго определенным. Наиболее значимыми являются фрактальная геометрия, теория хаоса, нелинейная динамика, когнитивная компьютерная графика (методы визуализации данных, позволяющие активировать наглядно-образные механизмы мышления ЛПР, облегчающие принятие решения в сложной обстановке или нахождение решения сложной проблемы).

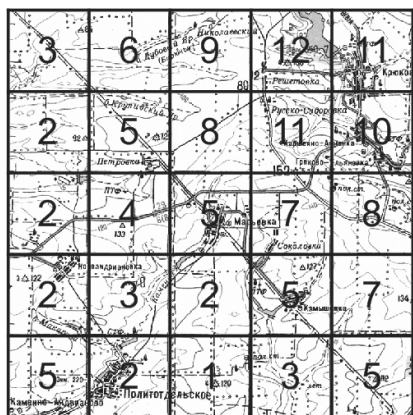
В основе метода анаморфирования лежит понятие «анаморфоз» — переход от одного визуального образа, построенного на евклидовой метрике, к другому визуальному образу, сформированному на метрике рассматриваемого процесса или явления на выбранном показателе.

Важное преимущество метода анаморфирования заключается в том, что он позволяет визуализировать сложные распределения различных показателей, которые необходимо учитывать ЛПР на топографической или электронной карте местности (ЭКМ), уменьшая при этом размерность пространства решения пропорционально количеству анализируемых показателей.

**Сущность метода анаморфирования** — графическая часть решения (исходный визуальный образ), построенная на топографической или электронной карте местности в евклидовой метрике, преобразуется (анаморфируется) на основе выбранных показателей в двумерный визуальный образ. Внутренняя структура визуального образа изменяется так, что распределение выбранных показателей становится

ся равномерным (типовой вид) при сохранении топологического подобия с исходным визуальным образом. Например, в области принятия решения в целях инженерного оборудования местности в качестве выбранных показателей могут использоваться ее тактические свойства: степень инженерного оборудования; проходимость; защитные; маскировочные и заградительные свойства; барьерные рубежи; водообеспеченность; сезонные и климатические изменения и т. п. Кроме того, показатель преобразования (анаморфирования) может быть комплексным, т. е. представлять собой свертку любого количества показателей различной физической природы, активно используемых ЛППР при выработке обоснованного варианта решения.

В самом общем виде работу метода можно описать следующим образом. На рис. 1 приведен фрагмент карты местности с нанесенной на нее квадратной сеткой, каждой ячейке которой присвоен некоторый показатель, например проходимость местности и соответствующая матрица.



*a*

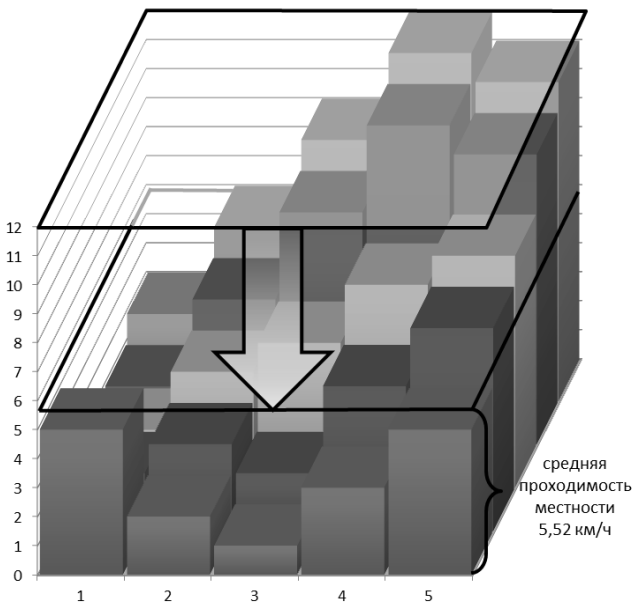
3	6	9	12	11
2	5	8	11	10
2	4	5	7	8
2	3	2	5	7
5	2	1	3	5

*b*

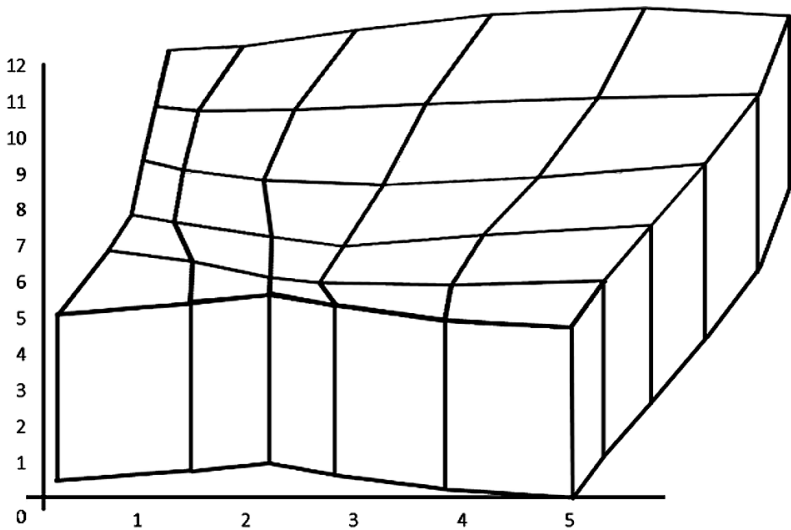
**Рис. 1. Фрагмент карты местности с нанесенной на нее квадратной сеткой (а) и матрица проходимости местности (б)**

Матрицу проходимости можно представить в виде трехмерной матрицы (рис. 2, а). На рисунке высота каждого столбика соответствует значению показателя в каждой ячейке исходной матрицы. Тогда операцию анаморфирования можно представить как накладывание стекла на верхнюю сторону матрицы с последующим надавливанием на него до уровня, равного значению средней проходимости местности (в конкретном случае 5,52 км/ч).

В результате анаморфирования столбики, оказавшиеся выше столбиков со значением средней проходимости, уменьшаются до этого значения, увеличивая свою площадь — «расплываются», а столбики, расположенные ниже столбиков со значением средней проходимости, «подтягиваются» до этого значения, уменьшая свою площадь. Поскольку исходная сетка матрицы не теряет своей связности, в результате анаморфирования получается матрица (рис. 2, б).



*a*



*б*

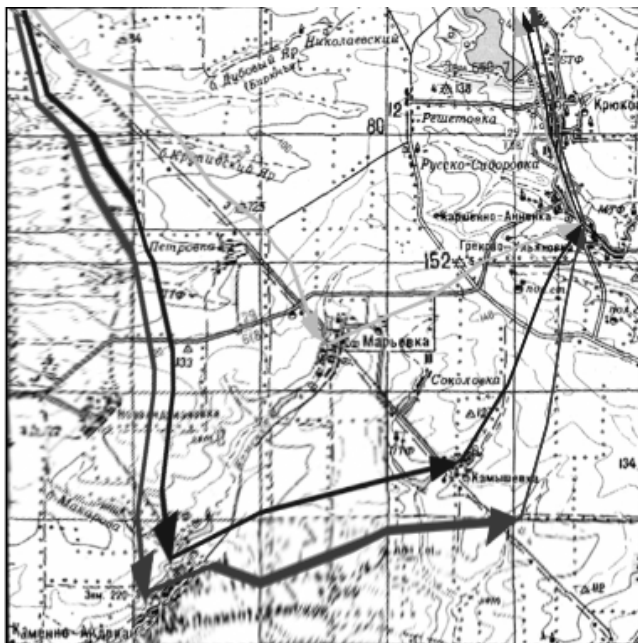
**Рис. 2. Трехмерная матрица проходимости (а) и ее анаморфоза (б)**

Во всех ячейках указанной матрицы показатели анаморфирования одинаковы и равны среднему значению (5,52 км/ч), что позволяет принимать решение и проводить его визуальное моделирование в линейном пространстве выбранного показателя.

Варианты маршрутов движения подразделений, выполняющих поставленные задачи, на анаморфированной карте в линейном пространстве проходимости местности приведены на рис. 3, а, а в евклидовом пространстве — на рис. 3, б.



*а*



*б*

**Рис. 3. Представление вариантов маршрутов движения подразделений в линейном пространстве проходимости местности (а) и в евклидовом пространстве (б)**

Обратное преобразование построенной анаморфозы из линейного пространства выбранного показателя в исходное евклидово пространство (см. рис. 3) называется антианаморфозой или морфингом [3].

Существующие численные методы построения анаморфоз [4], несмотря на разнообразие и простоту реализации, обладают большой трудоемкостью этапа подготовки исходных данных, медленной сходимостью, нарушением целостности получаемого визуального образа, зависимостью от порядка обрабатываемых вершин ячеек матрицы, от порядка перебора ячеек и работают, преимущественно, с одним показателем анаморфирования.

Поэтому для решения задачи принятия решения и его последующего моделирования необходимо модифицировать алгоритм анаморфирования так, чтобы используя существующие наработки, он был максимально свободен от перечисленных недостатков.

**Математическая постановка задачи работы алгоритма анаморфирования.** Пусть  $D$  — область на плоскости  $\mathbf{R}^2$  (площадная фигура, построенная на основе выбранного показателя), которая должна быть анаморфирована.

Распределение показателя описывается функцией плотности  $\rho(z)$ , определенной априори на части области  $D$  ( $z = (x, y)$  — точка на плоскости  $\mathbf{R}^2$ ). Без потери общности можно полагать, что функция  $\rho(z)$  определена на всей плоскости  $\mathbf{R}^2$ , тогда  $\rho(z) = \text{const}$  вне области  $D$  (например, как среднее значение  $\bar{\rho}$  функции  $\rho(z)$ ).

Анаморфоза задается преобразованием  $h: \mathbf{R}^2 \rightarrow \mathbf{R}^2$  ( $h: (x, y) \mapsto (u, v)$ ) или двумя функциями двух переменных

$$U(x, y) \text{ и } V(x, y), \quad (1)$$

где  $u = U(x, y)$ ,  $v = V(x, y)$ . Эти функции должны быть определены и непрерывны на области  $D$ .

Коэффициент изменения площади в окрестности точки  $(x, y)$  преобразованием  $h$  равен значению якобиана преобразования  $h$  в этой точке

$$J(U, V) = \frac{\partial U}{\partial x} \frac{\partial V}{\partial y} - \frac{\partial U}{\partial y} \frac{\partial V}{\partial x}.$$

Поэтому условие того, что преобразование (1) делает величину  $\rho(x, y) = \bar{\rho} = \text{const}$ , может быть записано как  $J(U, V) = \rho(x, y) / \bar{\rho}$ . Таким образом, задача нахождения анаморфозы сводится к задаче решения уравнения

$$\frac{\partial U}{\partial x} \frac{\partial V}{\partial y} - \frac{\partial U}{\partial y} \frac{\partial V}{\partial x} = \frac{\rho(x, y)}{\bar{\rho}}, \quad (2)$$

для которого переменные  $[U(x, y), V(x, y)]$  определяют взаимнооднозначное преобразование.

Построение анаморфоз на компьютере встречает трудности двух типов. Первые из них связаны с компьютерной реализацией алгоритма. Это задачи преобразования исходных площадных фигур в форму, пригодную для компьютерной обработки (с этой задачей достаточно успешно справляются такие ГИС, как: ArcInfo, MapInfo, «Панорама» и «Интеграция»), для численной реализации алгоритма с контролем сохранения взаимной однозначности преобразованных площадных фигур и представления результатов расчетов в виде, удобном для их дальнейшей обработки.

Второй тип трудностей связан с тем, что условие выравнивания заданной плотности не определяет анаморфозу однозначно. Существует бесконечно много преобразований, удовлетворяющих этому условию, что следует из (2). Построенное анаморфированное изображение без нарушения постоянства плотности может быть изменено применением любого преобразования, сохраняющего площадь, например:

1)  $(u, v) \mapsto (ku, k^{-1}v)$  (растяжение вдоль одной из осей и сжатие вдоль другой с тем же коэффициентом);

2)  $(u, v) \mapsto (u + f(v), v)$ ,  $(u, v) \mapsto (u, v + g(u))$  (сдвиг горизонтальных и вертикальных прямых вдоль самих себя на различные расстояния).

В качестве требования при выборе анаморфозы можно использовать условие конформности преобразования (1). Конформное преобразование изменяет все расстояния умножением на один и тот же коэффициент, не зависящий от направления (углы между прямыми линиями сохраняются). Преобразование, которое локально изменяет все расстояния с помощью умножения на  $\sqrt{\rho(x, y)}$ , единственно и не зависит от выбора системы координат [4].

Конформное преобразование с заданным коэффициентом линейного растяжения, равным  $\sqrt{\rho(x, y)}$  (или с коэффициентом изменения площадей  $\rho(x, y)$ ), существует не всегда.

Условие конформности преобразования (2) может быть записано в виде

$$\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial x}\right)^2 = \rho(x, y);$$

$$\left(\frac{\partial U}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y}\right)^2 = \rho(x, y);$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \frac{\partial U}{\partial y} = 0.$$

Это условие состоит из трех уравнений относительно двух неизвестных функций  $U(x, y)$  и  $V(x, y)$ . Обычно такая система не имеет

решений. Для существования подобного преобразования необходимо, чтобы функция плотности  $\sqrt{\rho(x, y)}$  удовлетворяла уравнению

$$\Delta \ln \rho \equiv \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial \rho / \partial x}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial \rho / \partial y}{\rho} \right) = 0,$$

где  $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$  — лапласиан.

Это уравнение означает что кривизна, определенная метрикой  $\rho(x, y)(dx^2 + dy^2)$ , должна быть равна нулю. Таким образом, возникает задача поиска среди различных преобразований того, которое инвариантно к любой замене декартовой системы координат и конформно.

Анализируя недостатки алгоритмов анаморфирования и сущности их работы, можно сделать вывод о том, что компьютерная реализация алгоритма должна учитывать следующие моменты.

1. На каждом шаге на сдвиг точек (в том числе вершин) в той или иной степени должны влиять все ячейки разбиения. Для этого необходимо, чтобы на каждом шаге сдвиг точки был равен векторной сумме сдвигов от влияния отдельных ячеек.

2. Влияние ячейки на точку должно состоять в перемещении этой точки вдоль прямой, соединяющей ее с некоторой точкой ячейки (например, с ее центром масс). Это связано с требованием инвариантности алгоритма по отношению к выбору системы координат.

3. Перемещение точки под влиянием ячейки должно убывать с увеличением расстояния от этой ячейки.

Другими словами, следует сформировать инвариантный алгоритм анаморфирования по отношению к начальному разбиению визуального образа на ячейки (в пределах которых плотность постоянна), который эффективно работает в режиме реального времени.

Если в качестве  $N$  ячеек принимаются связные области произвольной формы, граница каждой из которых описана  $i = 1, \dots, P$  вершинами, то влияние любой ячейки на рассматриваемую вершину можно определить, исходя из приведенных ниже соображений.

Пусть произвольная ячейка имеет площадь

$$s_i = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} x_{i1} & y_{i1} & 1 \\ x_{i2} & y_{i2} & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{in} & y_{in} & 1 \end{vmatrix},$$

а  $\rho_i(x, y) = \rho_i$ . В случае анаморфирования ячейка должна быть деформирована так, чтобы ее площадь стала равной  $\bar{s}_i = s_i \rho_i / \bar{\rho}$  ( $\bar{\rho}$  —



среднее значение показателя на единицу площади). Без потери общности предположим, что ячейка имеет форму круга радиусом  $R = \sqrt{s_i / \pi}$ . В результате естественного анаморфирования с помощью гомотетии этот круг переводится в круг радиусом  $\bar{R} = \sqrt{\bar{s}_i / \pi}$ , сохраняя значение показателя по всей остальной площадной фигуре.

Возьмем полярную систему координат с началом в центре круга. В ней анаморфирование осуществляется переводом вершины  $(r, \phi)$  в вершину  $(\bar{r}, \bar{\phi})$ :

$$\bar{r} = \begin{cases} (\bar{R}/R)r & \text{при } r \leq R; \\ \sqrt{r^2 + (\bar{R}^2 - R^2)} & \text{при } r > R, \end{cases}$$

где  $\phi = \bar{\phi}$ ;  $r$  — расстояние между рассматриваемой вершиной многоугольника и центром влияющей ячейки.

Влияние центра одной ячейки на любую вершину другой ячейки выражается в сдвиге этой вершины на расстояние  $r(\bar{R}/R - 1)$  при  $r \leq R$  и  $\sqrt{r^2 + (\bar{R}^2 - R^2)} - r$  при  $r > R$ . Это влияние описывается радиус-вектором вершины многоугольника  $v$  с началом в центре ячейки, умноженным на коэффициент  $(\bar{R}/R - 1)$  при  $r \leq R$  или  $\sqrt{1 + (\bar{R}^2 - R^2)/r^2} - 1$  при  $r > R$ . В качестве центра ячейки может выбираться ее геометрический центр или точка пересечения медиан — центр тяжести многоугольника и т. п.

Поскольку невозможно получить преобразование, дающее требуемую анаморфозу явно, за один шаг, переходят к итерационным процедурам, которые на каждом шаге учитывают отклонение плотности от постоянной плотности на всей площадной фигуре и корректируют ее соответствующим образом.

Следовательно, алгоритм анаморфирования можно описать так. На каждом шаге вычисляется векторная сумма влияний центров ячеек на вершины и центры многоугольных ячеек, составляющих визуальный образ, которые перемещаются в соответствии с полученными векторами сдвигов. Для имеющейся конфигурации рассчитываются новые площади ячеек. Итерационный процесс прекращается, когда все относительные отклонения площадей ячеек становятся меньше заданного значения степени точности  $\varepsilon$ .

На основе рассмотренного алгоритма, созданного С.М. Гусейн-Заде и В.С. Тикуновым [4], разработаны два варианта модифицированного алгоритма анаморфирования (МАО).

В первом варианте МАО-1 на этапе подготовки данных используется специально сконструированная логистическая функция, позволяющая избежать нарушения целостности получаемого визуального образа. Подробное исследование особенностей работы алгоритма анаморфиро-

вания и конструирования различных функций нормировки исходной матрицы, построенной на основе выбранного показателя (показателей), приведено в работах [5, 6]. Следует отметить, что в случае наличия у ЛПП времени (на подготовительном этапе принятия решения) необходимо использовать МАА-1, так как он позволяет провести построение анаморфозы с любой заранее заданной степенью точности  $\varepsilon$ .

Во втором варианте МАА-2, наряду с логистической функцией, в расчетной части алгоритма применяется обученная искусственная нейронная сеть (перцептрон) с одним скрытым слоем [7], значительно сокращающая время работы алгоритма.

В случае работы ЛПП в реальном режиме времени следует использовать МАА-2. При несущественной потере точности построения преобразования ( $\varepsilon \geq 0,1$ , где  $\varepsilon$  — разность значений теоретической площади и площади  $s_i$  ячейки матрицы, полученной на  $i$ -м шаге  $1 \leq i \leq n \times m$ ,  $n \times m$  — размер матрицы) МАА-2 на компьютере с параметрами P3-700 MHz/DDR233-128 Мбайт формирует анаморфозу матрицы размерностью  $250 \times 250$  за  $1 \dots 2$  с.

Выбор и подробное исследование структуры искусственной нейронной сети, процесса ее обучения (в том числе формирования обучающего, тестового и контрольного множества примеров) и особенности работы в составе алгоритма анаморфирования изложены в работах [5, 6].

Кроме того, два варианта МАА работают с произвольным количеством показателей (комплексным показателем) анаморфирования различной физической природы.

Все приведенные анаморфозы рассчитаны с помощью МАА-1 при  $\varepsilon \geq 0,005$  в табличном процессоре MS Excel 2010.

Можно утверждать, что в общем случае очевидными достоинствами анаморфозы электронной карты местности являются:

— возможность визуального принятия и моделирования решения с учетом актуальных показателей различной физической природы;

— наглядность — выявление скрытых закономерностей поведения различных параметров, зависящих от выбранного показателя или комплексного показателя анаморфирования;

— быстрый визуальный анализ — анаморфирование исходной матрицы по любому допустимому значению выбранного показателя, позволяющее принимать решения с учетом действий подразделений в направлениях и областях с таким значением показателя;

— возможность построения сценариев действий на основе анализа динамической анаморфозы, учитывающей выполнение задач, связанных с быстрой эволюцией выбранного показателя или комплексного показателя.

**Заключение.** Метод анаморфирования — перспективный метод, позволяющий принимать решение и проводить его визуальное моделирование с учетом как отдельных, так и комплексных актуальных показателей в различных режимах работы ЛПП всех уровней.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Урсул А.Д. Информация. Методологические аспекты. — М.: Наука, 1971. — 130 с.
2. Глезер В.Д., Цукерман И.И. Информация и зрение. — М.: АН СССР, 1961. — 347 с.
3. Гусейн-Заде С.М., Тикунов В.С. Создание анаморфированных изображений для географических исследований // Вестн. Моск. ун-та. Сер. География. 1992. № 4. — С. 43—52.
4. Гусейн-Заде С.М., Тикунов В.С. Анаморфозы: что это такое? — М.: Эдиториал УРСС, 1999. — С. 59—63.
5. <http://ru.wikipedia.org/wiki/морфинг>.
6. Терехов В.И. Методы вычислительного интеллекта, применяемые для решения задач инженерного и инженерно-технического обеспечения. — М.: Изд-во «Общевойсковая академия ВС РФ», 2010. — 253 с.
7. Терехов В.И. Применение когнитивной компьютерной графики в системах поддержки принятия решения должностных лиц органов военного управления. — М.: Изд-во «Общевойсковая академия ВС РФ», 2012. — 150 с.
8. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. Пер. с англ. — М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. — 1 104 с.

Статья поступила в редакцию 4.07.2012