

Семиотический способ представления знаний: планирование в знаковой картине мира

Панов А. И.

ФИЦ ИУ РАН, пр. 60-летия Октября, 9, gos@isa.ru

19 августа 2016 г.

В работе представлен новый способ представления знаний как на уровне сенсорных данных так и на уровне концептуальной информации, - знаковая картина мира. Базовым элементом картины мира является четырехкомпонентная структура - знак, строение которого подтверждается как психологическими теориями, так и нейрофизиологическими данными. В работе представлены принципы работы математической структуры - каузальной матрицы, которая описывает строение компонент знака. Предложены алгоритмы пополнения отношений на множестве знаков, определены операции в знако-

вой картине мира, который моделируют важные психологические особенности поведения человека.

Ключевые слова: знаковая картина мира, образ, значение, личностный смысл, каузальная матрица, семиотическая сеть.

Введение

Про постановку задачи [2; 3].

Психологические и нейрофизиологические основания трехкомпонентной структуры знака (Станович, Гроссберг и др. более новые).

1. Картина мира

Про компоненты знака, функции связывания и три типа картин мира.

Введем два знака, которые мы будем рассматривать на протяжении всей статьи в качестве примеров, иллюстрирующих положения, которые приводятся в настоящей работе (квадрат, выстрел).

2. Строение компонент знака

Далее рассмотрим структуру компонент знака на примере образной компоненты, которая участвует в актуализации знака, выделении представления об опосредуемом объекте или процессе на основе поступающей из внешней среды сенсорной информации и реги-

стрируемой внутренними сенсорами моторной информации. До именования знак будем называть протознаком или признаком.

Предположим, что во входном потоке данных выделена последовательность (x_1, x_2, \dots, x_h) длины h векторов действительных чисел от 0 до 1, которые будем называться *событиями*. Каждое событие x_t длины q представляет собой запись выходов от q сенсоров, а каждый элемент события означает уверенность в срабатывании данного сенсора. Например, событие $(0.1, 0.9, 0.9)$ поступает с трех сенсоров - датчиков красного, синего и зеленого света - и означает, что уверенность в срабатывании датчика красного света составляет 10%, а синего и зеленого - по 90%.

Образная компонента знака должна по входной последовательности данных определить, присутствует ли (закодирован ли) опосредуемый объект или процесс в этой последовательности. Для этого мы будем кодировать характерные признаки объекта или процесса в специальной структуре - каузальной матрице $z = (e_1, e_2, \dots, e_h)$ размерности q на h , где q - размерность входных событий, а h - длина последовательности входных событий. При этом каждый столбец e_t каузальной матрицы является битовым вектором длины q и кодирует те признаки (которым соответствуют 1), которые необходимо должны присутствовать во входном событии в момент времени t , чтобы опосредуемый объект или процесс мог быть распознан во входном потоке данных, т.е. задают множество одновременных характерных признаков. Например, образу знака s , опосредующему объект «квадрат», может соответствовать каузальная матрица

$$z = ((1, 0, 1, 1, 0), (1, 1, 0, 1, 0), (1, 1, 0, 0, 1), (1, 0, 1, 0, 1)),$$

где первая строка является характеристическим вектором информации с датчика углов

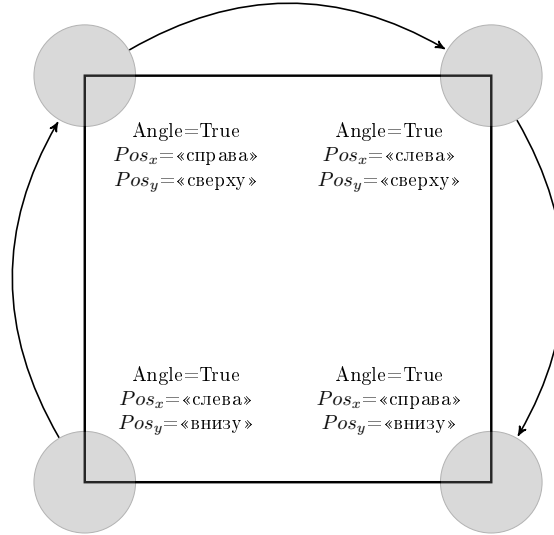


Рис. 1: Визуальная интерпретация каузальной матрицы

на изображении, вторая - с датчика положения визуального сенсора (верхнее положение), третья - нижнее положение сенсора, четвертая - левое положение сенсора, пятая - правое положение (см. рис.2).

Образу каждого знака может соответствовать несколько каузальных матриц, которые задают различные проявления опосредуемого объекта или процесса. Весь кортеж каузальных матриц образа знака s будем обозначать как $Z^p(s)$.

Случай, когда характерными признаками образа данного знака выступают данные с сенсоров, является частным. В более общей постановке, признаками для образа знака служат другие знаки, которые опосредуют эти характерные признаки. Таким образом, мы можем сопоставить образу знака s множество $S_p(s)$ мощности q , каждому элементу которого соответствует номер строчки каузальной матрицы z размера q на h , т.е. каждому признаку $s_i \in S_p(s)$ соответствует характеристический битовый вектор, задающий на

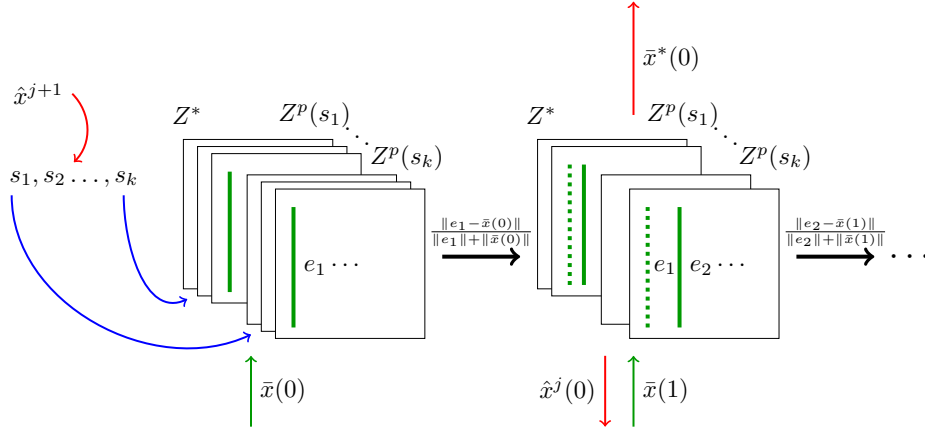


Рис. 2: Схема алгоритма актуализации знака

местах 1 те моменты времени, когда данный признак должен присутствовать во входных данных, чтобы успешно актуализировать знак (распознать образ знака) s .

Для уточнения определения множества $S_p(s)$ введем семейство бинарных отношений $\{\sqsubset_p, \sqsubset_p^1, \sqsubset_p^2, \dots\}$, определённых на декартовом произведении $S \times S$. Будем считать, что знак s_i *поглощается* знаком s по образу, $(s_i, s) \in \sqsubset_p$ или $s_i \sqsubset_p s$, в том случае, если $s_i \in S_p(s)$. Если известно, что знаку s_i соответствует 1 в t -м столбце некоторой каузальной матрицы $z \in Z^p(s)$ знака s , то мы будем использовать уточненное отношение $\sqsubset_p^t \subset \sqsubset_p$.

2.1. Актуализация образной компоненты знака

Кратко опишем работу алгоритма актуализации знака (распознавания образа знака) по рис. 2. Будем считать, что образы знаков сгруппированы по схожести множеств $S_p(s)$ в узлы, которые организованы в иерархические структуры (подробнее см. [4]).

Вычислительный цикл распознавания в узле уровня j начинается с определения начального состояния узла при помощи предсказывающего воздействия с верхнего уровня

иерархии - вектора ожиданий $\hat{x}_i^{j+1}(\tau_s)$ (шаги 3–14) в момент времени τ_s . Начальное состояние определяется как подмножество таких знаков, образы которых предсказываются на основе состояния узла верхнего уровня. Первая константа c_1 определяет порог предсказываемого веса распознаваемых образов, выше которого соответствующие каузальные матрицы попадают во множество активных матриц Z^* (шаг 4). Далее производится отбор тех каузальных матриц из множества активных, для которых обычное расстояние по норме $\|x\| = \sum_i |x_i|$ первого столбца \bar{z}_1^r от входного вектора \bar{x}_i^j в начальный момент времени не превышает второй константы c_2 (шаг 9). Обновленное множество полученных таким образом активных каузальных матриц является текущим состоянием узла (шаг 11). На основе активных каузальных матриц методом голосования вычисляется выходной вектор узла в начальный момент времени $\bar{x}_i^{j*}(\tau_s)$ (шаги 12 – 13).

Require: $\tau_s, \hat{x}_i^{j+1}(\tau_s), \omega_i^j$.

Ensure: $\varphi_{i\Delta t}^j, \eta_{i\Delta t}^j$.

- 1: $\hat{F}^* = \emptyset, Z^* = \emptyset, t = 0$;
- 2: $c_1 \in (0, 1), c_2 \in (0, 1)$;
- ▷ определение начального состояния
- 3: **for all** компонент \hat{x}_{ik}^{j+1} вектора $\hat{x}_i^{j+1}(\tau_s) = (\hat{x}_{i1}^{j+1}, \hat{x}_{i2}^{j+1}, \dots, \hat{x}_{il}^{j+1})$ **do**
- 4: **if** $\hat{x}_{ik}^{j+1} \geq c_1$ **then**
- 5: $\hat{F}^* := \hat{F}^* \cup \{\hat{f}_k\}$;
- 6: $\bar{x}_i^j := \omega_i^j(\tau_s)$;
- 7: **for all** функций распознавания $\hat{f}_k \in \hat{F}^*$ **do**
- 8: **for all** $Z_r^k \in Z_k$, соответствующих функции распознавания \hat{f}_k , **do**
- 9: **if** $\frac{\|\bar{z}_1^r - \bar{x}_i^j\|}{\|\bar{z}_1^r\| + \|\bar{x}_i^j\|} < c_2$ **then**
- 10: $Z^* := Z^* \cup \{Z_r^k\}$;
- 11: $\varphi_i^j(\bar{x}_i^j, \hat{x}_i^{j+1}(\tau_s)) := Z^*$;
- 12: $\bar{N} := (|\{Z_r^1 | Z_r^1 \in Z^*\}|, \dots, |\{Z_r^{l_j} | Z_r^{l_j} \in Z^*\}|)$;
- 13: $\eta(Z^*) = \bar{x}_i^{*j} := W(\bar{N})$;
- 14: $\hat{x}_i^j = W(\sum_{\hat{f}_k \in \hat{F}^*} \hat{x}_{ik}^{j+1} \sum_{Z_r^k \in Z^*} \bar{z}_2^r)$;

Вектор ожиданий $\hat{x}_i^j(\tau_s + 1)$ определяется как нормированный вектор, s -ый компонент которого равен сумме всех s -ых элементов вторых колонок активных каузальных матриц с весами, соответствующими элементам вектора ожиданий $\hat{x}_i^{j+1}(\tau_s)$ (шаг 14). Т.к. используется представление о будущем входном сигнале (вторая колонка матриц предсказания), то $\hat{x}_i^j(\tau_s + 1)$ играет роль предсказывающего вектора для нижнего уровня иерархии.

▷ ОСНОВНОЙ ЦИКЛ

```

15:  $t = 1$ ;
16: while  $t \leq h_i^j - 1$  do
17:    $\bar{x}_i^j := \omega(\tau_s + t)$ ;
18:   for all матриц предсказания  $Z_r^k$  из множества  $Z^*$  do
19:     if  $\frac{\|\bar{z}_{t+1}^r - \bar{x}_i^j\|}{\|\bar{z}_{t+1}^r\| + \|\bar{x}_i^j\|} \geq c_2$  then
20:        $Z^* := Z^* \setminus \{Z_r^k\}$ ;
21:    $\varphi_i^j(\bar{x}_i^j, \hat{x}_i^{j+1}(\tau_s)) := Z^*$ ;
22:    $\bar{N} = (|\{Z_r^1 | Z_r^1 \in Z^*\}|, \dots, |\{Z_r^{l_i^j} | Z_r^{l_i^j} \in Z^*\}|)$ ;
23:    $\eta(Z^*) = \bar{x}_i^{*j} := W(\bar{N})$ ;
24:    $t = t + 1$ ;
25:   if  $t \leq h_i^j - 2$  then
26:      $\hat{x}_i^j := W(\sum_{f_k \in \hat{F}^*} \hat{x}_{ik}^{j+1} \sum_{Z_r^k \in Z^*} \bar{z}_t^r)$ ;
   return  $\varphi_{i\Delta t}^j, \bar{\eta}_{i\Delta t}^j$ .
```

После определения начального состояния начинает выполняться тело основного цикла, в котором до тех пор, пока время не превысит характерное время узла h_i^j (размер каузальных матриц, входящих в него образов знаков) повторяется вычисление выходного вектора и состояния в следующий момент времени (шаги 16–26). В начале обновляется состояние, т.е. множество активных каузальных матриц Z^* , за счёт удаления тех матриц, соответствующие столбцы которых достаточно сильно отличаются от текущего входного вектора \bar{x}_i^j (шаг 19). Далее методом голосования по количеству матриц в множестве

активных каузальных матриц, отвечающих за соответствующий образ, вычисляется выходной вектор \bar{x}_i^{j*} (шаги 22–23).

В завершение тела основного цикла вычисляется выходной вектор ожиданий в следующий момент времени $\hat{x}_i^j(\tau_s + t + 1)$. Вектор ожиданий равен нормированному вектору, элементы которого равны сумме элементов столбцов всех активных каузальных матриц, соответствующих текущему моменту времени с учётом весов начального вектора ожиданий $\hat{x}_i^{j+1}(\tau_s)$ (шаг 26).

2.2. Каузальная сеть

Введем специальную процедуру $\Lambda_p : 2^Z \rightarrow 2^{\mathbb{N}} \times 2^{\mathbb{N}}$, которая каждому кортежу каузальных матриц $Z^p(s) \subset Z$ образа знака s ставит в соответствие два не пересекающихся подмножества индексов собственных столбцов $I^c \subset \mathbb{N}, \forall i \in I^c i \leq h$ (индексы столбцов условий) и $I^e \subset \mathbb{N}, \forall i \in I^e i \leq h$ (индексы столбцов эффектов): $\Lambda_p(Z^p(s)) = (I^c, I^e), I^c \cap I^e = \emptyset$. Например, если для множества матриц $Z = \{((1, 0), (0, 1))\}$ процедура Λ_p выдает два множества $\{1\}$ и $\{2\}$, то это означает, что появление признака, соответствующего первой строчке матрицы, вызывает появление признака, соответствующего второй строчке. Процедура Λ_p по сути является функцией установления причинно-следственного отношения на множестве входных событий и может реализовываться различными способами, в т.ч. на основе алгоритмов Норриса, FCO и др. (см. [1])

В том случае, когда для матриц $Z^p(s)$ образа знака s множество столбцов эффектов пусто $I^e = \emptyset$, т.е. когда по данному множеству каузальных матриц не возможно однозначно определить, какие события всегда предшествуют другим, мы будем считать, что

причинно-следственная связь не установлена и знак опосредует некоторый объект или ситуацию. В противном случае будем считать, что знак опосредует некоторое действие или процесс, результат которого кодируется в столбцах эффектов, а условие - в столбцах условий.

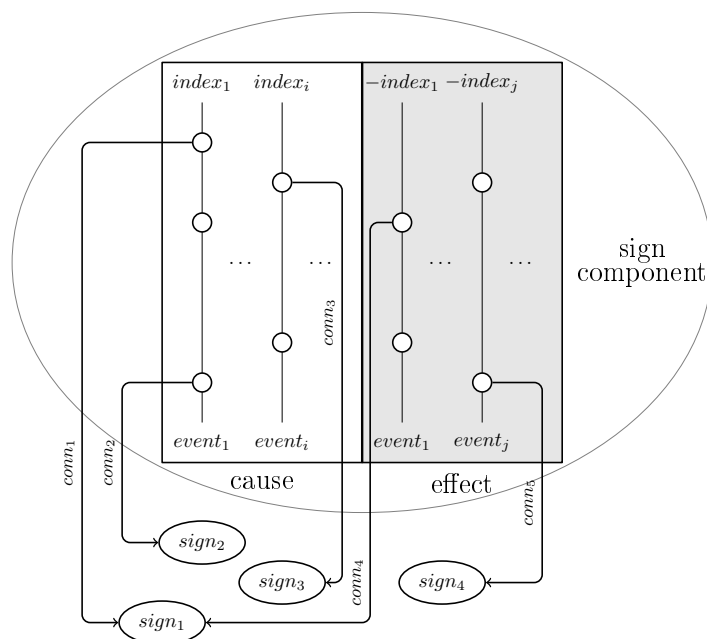


Рис. 3: Схема каузальной матрицы

Справедливы следующие утверждения относительно свойств процедуры Λ_p :

- $I^c \cap I^e = \emptyset$ — столбец матрицы предсказания не может быть одновременно и условием и эффектом,
- $|I^c \cup I^e| = h$ — столбец матрицы предсказания является либо условием либо эффектом,
- $I^c \neq \emptyset$ — среди столбцов матрицы предсказания должен быть хотя бы один стол-

бец условий, в то время как эффектов может и не быть (в случае объектных признаков),

- $\forall i \in I^e, j \in I^c \ i > j$ — все условия предшествуют эффектам по времени.

Схема каузальной матрицы, с учетом выше сказанного, приведена на рис. 5.

Теперь введем понятие каузальной сети, которая будет определять гетерархию на множестве образов. Каузальная сеть $W_p = \langle V_p, E_p \rangle$ - является помеченным ориентированным графом, в котором

- каждому узлу $v \in V_p$ ставится в соответствие кортеж казуальных матриц $Z^p(s)$ образа некоторого знака s , что будем обозначать как $v \rightarrow Z^p(s)$;
- ребро $e = (v_1, v_2)$ принадлежит множеству ребер графа E , если $v_1 \rightarrow Z^p(s_1), v_2 \rightarrow Z^p(s_2)$ и $s_1 \in S_p(s_2)$, т.е. если знак s_1 поглощается знаком s_2 ;
- каждому ребру графа $e = (v_1, v_2), v_1 \rightarrow Z^p(s_1), v_2 \rightarrow Z^p(s_2)$ ставится в соответствие метка $\epsilon = (\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3)$ - кортеж трех натуральных чисел:
 - ϵ_1 - индекс исходной матрицы в кортеже $Z^p(s_1)$, может принимать специальное значение 0, если исходными могут служить любые матрицы из кортежа;
 - ϵ_2 - индекс целевой матрицы в кортеже $Z^p(s_2)$, строка которой ставится в соответствие признаку s_1 ;
 - ϵ_3 - индекс столбца в целевой матрице, в которой в соответствующей признаку s_1 строке стоит 1, может принимать положительные значения (столбцы условий) и отрицательные (столбцы эффектов).

Пример такой сети изображен на рис. 4.

Аналогичным образом определяются каузальные сети для остальных компонент знака - для значения и личностного смысла. Для каждого знака s задаются множества $S_m(s)$ и $S_a(s)$, т.е. определяются семейства отношений $\{\sqsubset_m, \sqsubset_m^1, \sqsubset_m^2, \dots\}$ и $\{\sqsubset_a, \sqsubset_a^1, \sqsubset_a^2, \dots\}$. Множество $S_m(s)$ интерпретируется как ролевой состав знака s , например, элементы подкласса или роль действия. Множество $S_a(s)$ интерпретируется как мгновенный компонентный состав некоторой ситуации, наблюдаемой и переживаемой субъектом, носителем картины мира, в настоящее время. Аналогично определяются множества $Z^m(s)$, $Z^a(s)$, процедуры Λ_m и Λ_a .

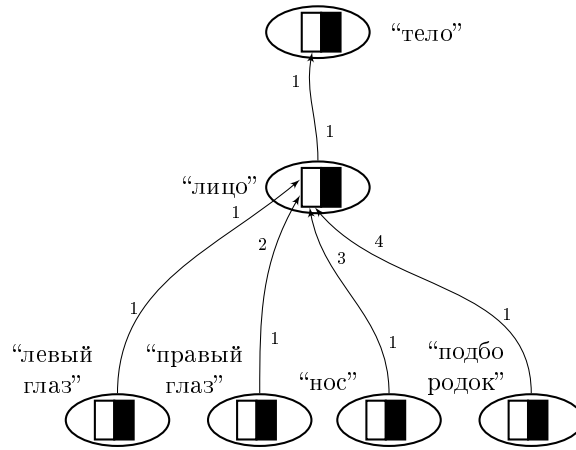


Рис. 4: Схема каузальной сети. Здесь каузальные матрицы изображены в виде квадратов, столбцы условий - левая белая часть квадрата, столбцы эффектов - черная правая часть квадратов. Метка ϵ_1 отображается в начале каждой стрелки, метка ϵ_2 определяется как номер квадрата, к которому идет стрелка, а метка ϵ_3 отображается в конце каждой стрелки.

3. Семиотическая сеть

Далее определим три семейства бинарных отношений на множестве знаков, которые генерируются на основе структуры фрагментов трех типов каузальных сетей, к которым принадлежат соответствующие компоненты знаков.

Будем называть *семиотической сетью* пятерку $\Omega = \langle W_p, W_m, W_a, R_n, \Theta \rangle$, где

- W_p, W_m, W_a - соответственно каузальные сети на множестве образов, значений и личностных смыслах,
- R_n - семейство отношений на множестве знаков, сгенерированных на основе трех каузальных сетей, т.е. $R_n = \{R_p, R_m, R_a\}$,
- Θ - семейство операций на множестве знаков, которые будут определены ниже.

Еще раз отметим, что знак представляет не только объекты внешнего мира, но также процессы, протекающие в нем, выполнимые действия, а также ситуации, наблюдаемые во внешней среде.

Активность в семиотической сети. Распространение активности на некоторую глубину. Его связь с процедурой распознавания образов.

Функции перехода от одной сети -к другой через знак Ψ_a^m .

4. Планирование в знаковой картине мира

Процесс планирования в знаковой картине мира реализуется с помощью MAP-алгоритма и идет в обратном направлении: от конечной ситуации к начальной. Кратко опишем ос-

новные этапы его работы. На входе алгоритма поступает описание задачи

$$T = \langle N_T, S, Sit_{start}, Sit_{goal} \rangle,$$

где N_T - идентификатор задачи, S - множество знаков семиотической сети, $Sit_{start} = \langle \emptyset, \emptyset, a_{start} \rangle$ - начальная ситуация со смыслом a_{start} , $Sit_{goal} = \langle \emptyset, \emptyset, a_{goal} \rangle$ - целевая ситуация со смыслом a_{goal} . МАР-алгоритм осуществляет итеративную генерацию новых фрагментов каузальной сети на личностных смыслах F_{next} на основе текущего активного фрагмента F_{cur} до тех пор, пока не будет достигнуто предельное количество шагов i_{max} или не будет целиком активирован начальный фрагмент F_{start} , являющийся личностным смыслом a_{start} начальной ситуации. В качестве текущего активного фрагмента для первой итерации выступает личностный смысл целевой ситуации a_{goal} .

На каждой итерации повторяется следующий набор операций:

- M -шаг: распространение активности на сети личностных смыслов на глубину d_a и формирование

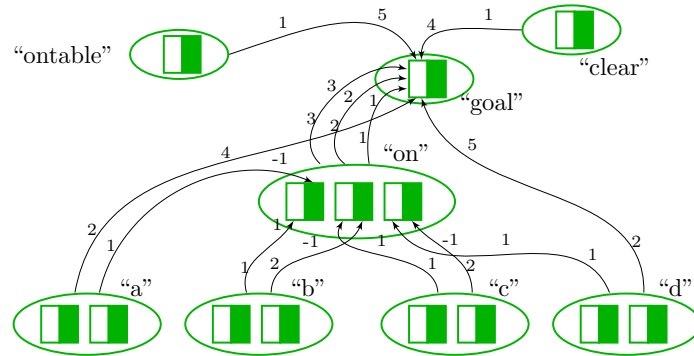


Рис. 5: Начальная ситуация

Заключение

Список литературы

1. *Kuznetsov S. O., Ob''edkov S. A.* Comparing Performance of Algorithms for Generating Concept Lattices // ICCS'01 International Workshop on Concept Lattices-based KDD. — 2001. — С. 35—47.
2. *Осипов Г. С., Панов А. И., Чудова Н. В.* Управление поведением как функция сознания. I. Картина мира и целеполагание // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. — 2014. — № 4. — С. 49—62.
3. *Осипов Г. С., Панов А. И., Чудова Н. В.* Управление поведением как функция сознания. II. Синтез плана поведения // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. — 2015. — № 6. — С. 47—61.
4. *Панов А. И.* Алгебраические свойства операторов распознавания в моделях зрительного восприятия // Машинное обучение и анализ данных. — 2014. — Т. 1, № 7. — С. 863—874.