

УДК 004.891  
ББК 32.813

## ВЕРИФИКАЦИЯ КОГНИТИВНЫХ КАРТ НА ОСНОВЕ ОБЪЯСНЕНИЯ ПРОГНОЗОВ

Кулинич А. А.<sup>1</sup>

(Учреждение Российской академии наук  
Институт проблем управления РАН, Москва)

*Рассмотрен метод верификации качественных когнитивных карт, основанный на объяснении процессов получения прогнозных значений факторов. Предложен метод построения объяснений для качественных когнитивных карт.*

Ключевые слова: когнитивная карта, верификация, объяснение прогнозов.

### 1. Введение

В практике управления социально-экономическими системами возникают задачи принятия решений в динамических ситуациях в условиях неопределенности. Для поддержки принятия решений в таких условиях возникает необходимость моделирования динамической ситуации, в которой в качестве измерителя ее параметров выступает эксперт – человек, создающий субъективную модель реальности, основываясь на собственных наблюдениях развития этой ситуации, на знаниях и опыте. При создании субъективной модели эксперт выделяет наиболее существенную, с его точки зрения, часть ситуации, представляя ее в виде множества факторов ситуации, качественно описывает их значения и отношения между ними, используя термины лингвистических переменных. В качестве модели представления знаний о динамической ситуации используется когнитивная карта [10], формально представляемая в виде ориентированного

---

<sup>1</sup> Александр Алексеевич Кулинич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник ([kulinich@ipu.rssi.ru](mailto:kulinich@ipu.rssi.ru)).

знакового графа, отражающего субъективные знания и предпочтения эксперта.

Использование субъективной когнитивной карты в процессах принятия решений требует ее верификации. Проблема верификации когнитивной карты ситуации занимает отдельное и важное место в проблеме поддержки принимаемых решений, поскольку определяет их качество.

Один из подходов верификации основан на анализе правдоподобности когнитивной карты ситуации, который связан с неформальным анализом структуры когнитивной карты. Нестрогий критерий правдоподобности структуры когнитивной карты рассмотрен в работе Идена [11]. В этой работе считается, что при анализе структуры когнитивной карты важны «структурные картины» взаимодействия факторов. Простая и понятная субъекту структура когнитивной карты, позволяющая объяснить процессы, происходящие в действительности, считается правдоподобной. В психологии такая структура называется гештальт-образом [3] наблюдаемой ситуации, представленной когнитивной картой.

К сожалению, формализовать гештальт-образ когнитивной карты достаточно трудно из-за его субъективности и поэтому использовать его в качестве объективного критерия для верификации когнитивной карты на основе анализа ее правдоподобности невозможно. Процесс верификации когнитивных карт на основе анализа правдоподобности их структуры достаточно субъективный, содержит множество ошибок и заблуждений, связанных с индивидуальными особенностями экспертов.

Другой подход к верификации когнитивных карт основан на анализе и выявлении типичных систематических ошибок, совершаемых их разработчиками [1, 2]. В этих работах выявлены следующие риски, приводящие к ошибкам в когнитивных картах: риск ложной транзитивности, связанный с представлением в когнитивной карте в качестве факторов, понятий разного уровня общности (ложная транзитивность возникает при установлении причинно-следственного отношения между понятиями (факторами) разного уровня общности); риск недопонимания математического смысла связей, который приводит к искаже-

нию содержательного смысла связей когнитивной карты относительно их математической интерпретации и, соответственно, к ошибкам при определении силы связей. Риски первого рода предлагается снижать использованием критерия соразмерности факторов по объемам понятий, позволяющий обнаружить понятия (факторы) разного уровня общности, и понизить уровень общности этих понятий (факторов когнитивной карты) путем расщепления вершин когнитивной карты на понятия (факторы) более низкого уровня общности. Риски второго рода предлагается обнаруживать с помощью критерия понятности математического смысла конструкции когнитивной карты по вербальному шаблону. Снижать этот риск предлагается с применением специальных шаблонов при определении силы причинной связи между факторами.

Еще один подход к верификации когнитивных карт основан на использовании методов «как-объяснений» прогнозов развития ситуации [7]. В системах моделирования когнитивных карт «Космос» [9], «Канва» [5] поддержка процесса верификации структуры когнитивной карты осуществлена с помощью встроенных подсистем объяснения прогнозов развития ситуации. Подсистемы «как-объяснения» прогнозов развития ситуации в когнитивных картах описывают последовательность процесса получения прогнозных значений факторов в виде цепочки, сработавших в вершинах когнитивной карты правил. Объясняющие цепочки описывают процессы изменения прогнозных значений факторов, что облегчает понимание процессов в когнитивной карте и, соответственно, верификацию ее структуры.

В этой работе рассмотрены вопросы получения «как-объяснений» прогнозов развития ситуаций в качественных когнитивных картах.

## **2. Прогноз развития ситуации в качественных когнитивных картах**

Одним из классифицирующих признаков когнитивных карт является способ измерения ее параметров [6]. Выделяются количественные и качественные когнитивные карты. В количест-

венных когнитивных картах сила влияния и значения факторов определяется на ограниченном интервале числовой оси, например,  $[0, 1]$  или  $[-1, +1]$ . В качественных когнитивных картах значения параметров выбираются из упорядоченного множества лингвистических значений факторов и сил влияния фактора на фактор, например, из множества  $\{\text{Малый, Средний, Большой}\}$ .

Качественная когнитивная карта определена знаковым орграфом  $(F, W)$ , где  $F = \{f_i\}$  – множество факторов ситуации;  $W = |w_{ij}|$  – матрица смежности орграфа;  $w_{ij} \in [-1, +1]$  – вес, определяющий силу причинной связи факторов. Для каждого фактора определено упорядоченное множество лингвистических значений  $Z_i = \{z_{i1}, \dots, z_{im}\}$ . Причем для элементов множества лингвистических значений определен не только строгий порядок значений  $z_{i1} < z_{i2} < \dots < z_{im}$ , но и равенство интервалов между лингвистическими значениями. Равенство интервалов между значениями устанавливается с помощью экспертного метода деления отрезка пополам Торгерсона [12].

Порядковая шкала фактора определена как отображение каждого лингвистического значения фактора в точку числовой оси  $\varphi_i: Z_i \rightarrow X_i$ ,  $X_i = \{x_{i1}, \dots, x_{in}\}$ ,  $x_{i1}, \dots, x_{in} \in [0, 1]$ . Определено также и обратное отображение  $\varphi_i^{-1}: x \rightarrow z_i$ ,  $x \in [0, 1]$ , позволяющее интерпретировать любое значение  $x$  в лингвистическое значение фактора  $z_i \in Z_i$ .

В терминах шкал факторов и приращений определено начальное состояние ситуации  $Z(0) = (z_{1k}, z_{2d}, \dots, z_{nl})$  и, соответственно,  $X(0) = (x_{1k}, x_{2d}, \dots, x_{nl})$  – вектор начальных значений факторов, а также начальный вектор приращений факторов ситуации  $P(0) = (p_{1j}, p_{2j}, \dots, p_{nj})$ .

Приращения значений факторов определяется как разность значения фактора после приращения  $x_i(t+1)$  и его текущего значения  $x_i(t)$ . Положительное приращение фактора определено как  $p_i = x_i(t+1) - x_i(t)$ , где  $p_i > 0$ ,  $z_{i(c+1)} = \varphi_i^{-1}(x_i(t+1)) > z_{i(c)} = \varphi_i^{-1}(x_i(t))$ , а отрицательное приращение как  $-p_i = x_i(t+1) - x_i(t)$ , где  $p_i < 0$ ,  $z_{i(c-1)} = \varphi_i^{-1}(x_i(t+1)) < z_{i(c)} = \varphi_i^{-1}(x_i(t))$ .

Задача прогноза развития ситуации в качественной когнитивной карте заключается в нахождении векторов приращения факторов  $P(t), P(t+1), \dots, P(t+n)$  и состояния ситуации  $X(t)$ ,  
456

$X(t + 1), \dots, X(t + n)$  в последовательные дискретные моменты времени  $t, t + 1, \dots, t + n$ , вызванных начальным приращением факторов  $P(0)$ .

Эта задача решается методом последовательных итераций. Состояние ситуации в момент времени  $t + 1$  определяется из соотношения:

$$(1) \quad X(t + 1) = X(t) + P(t + 1),$$

где  $P(t + 1)$  – вектор приращений значений факторов в момент времени  $t + 1, t=1, \dots, n$ .

Для получения прогноза матрица смежности  $W$ , включающая положительные и отрицательные элементы преобразуется в положительно определенную матрицу смежности  $W'$  [9]. В этом случае размер матрицы смежности увеличивается в два раза, поскольку положительное влияние фактора-причины  $f_i$  на фактор-следствие  $f_j$  записывается в виде двух отображений:  $w_{ij}: P_i^+ \rightarrow P_j^+$  и  $w_{ij}: P_i^- \rightarrow P_j^-$ . Отображения связывают положительные (отрицательные) приращения  $P_i^+(P_i^-)$  фактора  $f_i$  с положительными (отрицательными) приращениями  $P_j^+(P_j^-)$  фактора  $f_j$ . В матрице смежности положительное влияние факторов представляется двумя элементами  $w_{2i-1, 2j-1} = w_{ij}$  и  $w_{2i, 2j} = w_{ij}$ .

Отрицательное влияние между факторами  $f_i$  и  $f_j$  записывается, также в виде пары отображений:  $w_{ij}: P_i^+ \rightarrow P_j^-$ ,  $w_{ij}: P_i^- \rightarrow P_j^+$ . Эти отображения связывают положительные (отрицательные) приращения  $P_i^+(P_i^-)$  фактора  $f_i$  с отрицательными (положительными) приращениями  $P_j^-(P_j^+)$  фактора  $f_j$ . В матрице смежности отрицательное влияние факторов  $f_i$  и  $f_j$  представляется так:  $w_{2i-1, 2j} = -w_{ij}$  и  $w_{2i, 2j-1} = -w_{ij}$ .

Начальный вектор приращений  $P(0)$  и вектор прогнозных значений факторов  $P(t + 1)$  в этом случае имеют размерность  $2n$ . В двойном векторе  $P(t) = (p_1^-, p_1^+, \dots, p_n^-, p_n^+)$  значение фактора  $f_j$  характеризуют два элемента: элемент с индексом  $2j$  характеризуют положительное  $p_j^+$ , а с индексом  $2j - 1$  – отрицательное  $p_j^-$  приращение фактора  $f_j$ . Правило вычисления элемента вектора  $P(t + 1)$  (*max-product*) следующее:

$$(2) \quad p_i(t + 1) = \max_j (p_j(t) \cdot w_{ij}^i).$$

Элементы векторов приращений значений факторов, полученные в последовательные дискретные моменты времени  $P(t+1), \dots, P(t+n)$  представляются в виде двумерного массива:

$$(3) P^t = [P(t+1)^T, \dots, P(t+n)^T].$$

Строки  $P^t$  – это значения приращения одного фактора в последовательные моменты времени, а столбцы – значения приращения всех факторов в последовательные моменты времени – «волна» приращений. Матрица  $P^t$  называется матрицей прогноза.

Прогнозное приращение значения каждого фактора на  $n$  шагах вычисления прогноза развития ситуации определяется по максимальному положительному и максимальному отрицательному приращению этого фактора, т. е.:

$$(4) p_{i \max}^{\Sigma} = \text{sign}(p_{i \max}^{+} - p_{i \max}^{-}) \max(p_{i \max}^{+}, p_{i \max}^{-}),$$

где  $p_{i \max}^{+} = \max_{1 \leq b \leq n}(p_i^{+}(t+b))$  и  $p_{i \max}^{-} = \max_{1 \leq b \leq n}(p_i^{-}(t+b))$  – соответственно максимальное положительное и максимальное отрицательное приращение, определенные на  $n$  шагах вычисления прогноза развития.

Тогда состояние ситуации  $X^{\Sigma}$ , соответствующее прогнозируемому приращению факторов  $P^{\Sigma} = (p_{1 \max}^{\Sigma}, p_{2 \max}^{\Sigma}, \dots, p_{n \max}^{\Sigma})$  на  $n$  шагах прогноза, определится из соотношения

$$X^{\Sigma} = X(0) + P^{\Sigma}.$$

Для получения прогнозов развития ситуации с использованием когнитивных карт часто применяют метод с суммированием приращений факторов (далее будем называть этот метод правилом *sum-product* – умножение и сложение) [8].

Выбор правила *max-product* (умножение и взятие максимума) для агрегирования приращений факторов в качественных когнитивных картах обуславливается несколькими причинами. Во-первых, выбор этого правила требует неаддитивность лингвистических значений и приращений факторов, заданных в порядковых шкалах, для которых операция сложения не определена.

Во-вторых, применение правила *max-product* по сравнению с методом *sum-product* при вычислении прогнозов на когнитив-

ных картах, параметризованных достаточно грубым экспертным способом, имеет ряд преимуществ. Дело в том, что при использовании правила *sum-product* экспертные ошибки, включенные в веса дуг и значения факторов, суммируются на каждом из  $n$  шагов моделирования. Это приводит к мультипликативной погрешности прогнозных значений всех факторов, а это может привести к неустойчивости системы, моделируемой когнитивной картой.

При использовании правила *max-product* мультипликативные погрешности минимальны, а выделенное этим правилом максимальное приращение фактора по сути определяет его гарантированное прогнозное значение.

В принципе не точны прогнозные значения факторов, полученные как с использованием правила *sum-product*, так и правила *max-product*, но в моделировании когнитивных карт важна не столько точность прогноза, сколько возможность выявления тенденций развития ситуации и проверки их правдоподобности. Использование для получения прогнозов правила *max-product* позволяет получать прогнозные значения в легко понимаемом экспертом лингвистическом виде, а также верифицировать когнитивную карту с помощью объяснения этих прогнозов.

### **3. Метод объяснения прогнозов в качественных когнитивных картах**

Задача поиска объяснений прогноза развития ситуации в качественных когнитивных картах заключается в нахождении цепочки правил, срабатывание которых, вызванное начальным вектором приращений  $P(0)$ , приводит к получению прогнозных приращений  $P^\Sigma$  факторов ситуации.

Определим множество  $I_{np} = \{f_k, f_h, \dots, f_v\}$  ненулевых факторов в векторе начальных приращений  $P(0) = (p_1, \dots, p_n)$  и будем называть их входными факторами. Задача объяснения прогнозного значения  $p_j^\Sigma$  фактора  $f_j$  заключается в нахождении двух путей в орграфе  $(F, W)$  из вершин входного множества  $I_{np}$  к вершине  $f_j$ : один путь приводит к получению положительного  $p_{i_{\max}^+}$ , а дру-

гой – отрицательного  $p_{i \max}^-$  приращения прогнозного значение  $p_j^\Sigma$  фактора  $f_j$ .

Для нахождения этих двух путей определим множество всех путей из вершин входного множества  $I_{np}$  к вершине  $f_j$ .

Пусть путь  $l_{kj}$ , связывающий вершины  $f_k$  и  $f_j$  включает вершины  $f_k, f_l, \dots, f_s, f_j$ , а веса дуг между этими вершинами соответственно равны  $w_{kl}, \dots, w_{sj}$ .

Путь  $l_{kj}^+$  будем называть положительным, если произведение весов дуг между вершинами пути больше нуля,  $w_{kl} \cdot \dots \cdot w_{sj} > 0$ , а путь  $l_{kj}^-$  называется отрицательным, если это произведение меньше нуля:  $w_{kl} \cdot \dots \cdot w_{sj} < 0$ .

Множество положительных путей, связывающих вершину  $f_k \in I_{np}$  и  $f_j$ , определим как  $L_k^+ = \{l_{kjq}^+\}$ ,  $q = 1, \dots, m$  – номер пути,  $m$  – число положительных путей, связывающих вершины  $f_k$  и  $f_j$ , а множество отрицательных путей, соответственно,  $L_k^- = \{l_{kjr}^-\}$ ,  $r = 1, \dots, h$  – номер пути,  $h$  – число отрицательных путей, связывающих вершины  $f_k$  и  $f_j$ ,  $\forall f_k \in I_{np}$ .

Тогда определим множество путей из вершин входного множества  $I_{np}$  к вершине  $f_j$  через

$$L_{P(0)} = \{L_{P(0)j}^+, L_{P(0)j}^-\},$$

где  $L_{P(0)j}^+ = \bigcup_{f_k \in I_{np}} L_k^+$  – множество положительных путей и

$L_{P(0)j}^- = \bigcup_{f_k \in I_{np}} L_k^-$  – множество отрицательных путей между вершинами из множества  $I_{np}$  и вершиной  $f_j$ .

Весом  $O(l_{kjq}^+)$  пути  $l_{kjq}^+$  в знаковом ориентированном взвешенном графе будем называть произведение весов всех дуг, включенных в данный путь. То есть  $O(l_{kjq}^+) = w_{kl} \cdot \dots \cdot w_{sj}$ .

Влиянием  $I(l_{kjq}^+)$  фактора  $f_k$  на фактор  $f_j$  по пути  $l_{kjq}$  будем называть произведение начального приращения  $p_k$  фактора  $f_k$  на вес этого пути  $O(l_{kjq})$ , т. е.  $I(l_{kjq}^+) = p_k \cdot O(l_{kjq}^+)$ . Заметим, что



влияние  $I(I_{kjq}^+)$  вершины  $f_k$  по пути  $l_{kjq}^+$  на вершину  $f_j$  по сути определяет приращение значения  $p_j$  фактора  $f_j$ , вызванное начальным приращением  $p_k$ .

Поскольку при получении прогноза развития ситуации в качественных когнитивных картах используется правило *max-product* (2), то для определения объясняющих цепочек достаточно выделить положительный путь  $l_{kjq}^+$  с максимальным влиянием, т. е.  $\max I(I_{kjq}^+)$ ,  $\forall l_{kjq}^+ \in L_{P(0)j}^+$  и отрицательный путь  $l_{kjb}^-$  с максимальным влиянием по модулю  $\max |I(I_{kjb}^-)|$ ,  $\forall l_{kjb}^- \in L_{P(0)j}^-$ .

Последовательность вершин, включенных в пути  $l_{kjq}^+$  и  $l_{kjb}^-$ , определяет последовательность выполнения правил *max-product*, определивших значения  $p_{i \max}^+$  и  $p_{i \max}^-$  фактора  $f_j$ .

Для получения объяснений необходимо определить не только последовательность, сработавших правил в вершинах пути, но и значения приращений всех факторов, включенных в объясняющую цепочку. Каждый шаг последовательности правил, объясняющих прогноз развития ситуации, будем характеризовать парой: название фактора, с которым ассоциируется правило и значение фактора, которое это правило формирует, т. е. объясняющие цепочки положительного и отрицательного приращения фактора  $f_j$  будут иметь вид:

$$(f_k, p_{kb}(0); f_i, p_{ib}(1); \dots; f_s, p_{sb}(m-1); f_j, p_{jb}(m)).$$

Для нахождения объясняющих цепочек могут быть применены алгоритмы поиска путей в графе в глубину, ширину, алгоритм поиска кратчайшего пути Дейкстры, Беллмана–Форда, Флойда–Уоршола и др. [4]. При поиске объяснений с помощью алгоритмов поиска в глубину, ширину, Дейкстры, Беллмана–Форда эти алгоритмы необходимо применять для каждого объясняемого фактора. Алгоритмы, основанные на вычислении транзитивного замыкания матрицы смежности (Флойда–Уоршола и др.), позволяют получить влияние каждого фактора с каждым, но имеют большую сложность (время работы). Поэто-

му применение этих алгоритмов для объяснения прогнозов в сложных когнитивных картах нецелесообразно.

В этой работе предложен метод нахождения объяснений прогнозов развития ситуации, основанный на анализе «волны» распространения начальных приращений  $P(0)$  ко всем факторам когнитивной карты. Эта «волна» распространения приращений представлена в матрице прогноза развития ситуации  $P^t$  (3).

Предложенный в этой статье метод основан на следующем утверждении: фактор, значение которого на любом шаге прогноза развития в матрице прогноза  $P^t$  ситуации максимально, принадлежит пути с максимальным влиянием.

Действительно, каждый элемент  $(p_{2j}^+(1), p_{2j}^+(2), \dots, p_{2j}^+(n))$  строки  $2j$  матрицы прогноза  $P^t$  показывает максимальное положительное влияние фактора из входного множества  $I_{np}$  на фактор  $f_j$  по пути длиной, соответственно,  $1, 2, \dots, n$ , а элементы строки  $2j - 1$  матрицы прогноза  $-(p_{2j-1}^-(1), p_{2j-1}^-(2), \dots, p_{2j-1}^-(n))$  показывают максимальное по модулю отрицательное влияние фактора из входного множества  $I_{np}$  на фактор  $f_j$  по пути длиной, соответственно,  $1, 2, \dots, n$ .

Максимальный элемент строки  $\max(p_{2j}^+(1), p_{2j}^+(2), \dots, p_{2j}^+(n))$ , например,  $p_{2j}^+(m)$ , определяет положительную составляющую прогнозного значения  $p_{2j}^+(m) = p_{j \max}^+$  фактора  $f_j$ , является влиянием  $\max I(l_{kjq}^+)$  пути  $l_{kjq}^+ \in L_{P(0)j}^+$ , объясняющего цепочку, сработавших правил. При этом номер  $t$  показывает длину этой цепочки.

Максимальный же элемент строки  $\max(p_{2j-1}^-(1), p_{2j-1}^-(2), \dots, p_{2j-1}^-(n))$ , например,  $p_{2j-1}^-(d) = p_{j \max}^-$ , определяет влияние  $\max I(l_{kjb}^-)$  отрицательного пути  $l_{kjb}^- \in L_{P(0)j}^-$ , объясняющего отрицательное приращение  $p_{j \max}^-$ , и его длину  $d$ .

Для генерации объясняющих цепочек в каждой строке матрицы  $P^t$  находим максимальный элемент  $p_{2j}^+(t + b)_{\max}$  и  $p_{2j-1}^-(t + b)_{\max}$ ,  $1 \leq b \leq n$ ,  $\forall j$ , а остальные элементы строки приравниваем к нулю.

Выделенные максимальные элементы матрицы прогноза  $P'_{\max}$  определяют значения факторов, включенных в положительную и отрицательную цепочки объяснений для любого фактора. Для определения порядка следования этих значений и соответствующих им факторов в цепочке объяснений прогнозного значения любого фактора разработан алгоритм выделения объясняющих цепочек из «волны» приращений.

Работа этого алгоритма основана на обратном просмотре элементов матрицы  $P'_{\max}$  от значения  $p_j^+(b)_{\max}$  фактора  $f_j$  к факторам входного множества  $I_{np}$ . То есть определяем, какой из элементов на предыдущем шаге вызвал изменение  $p_j(b)$ . Для этого в столбце  $(b - 1)$  матрицы  $P'_{\max}$  ищем элемент  $p_i(b - 1)$  такой, чтобы  $p_j(b)/p_i(b - 1) = w_{ji}$ . Если такой элемент найден, то факторы  $f_j$  и  $f_i$  образуют причинно-следственную цепочку объяснения.

#### 4. Вербализация объяснений

Полученные объяснения  $(f_k, p_{kb}(0); f_t, p_{tb}(1); \dots f_j, p_{jb}(m))$  включают название фактора  $f_i$  и значение его приращения  $p_i \in [-1, 1]$ . Такое объяснение не понятно эксперту или аналитику, анализирующему результаты моделирования. Объяснения должны быть представлены на естественном языке.

Для построения объяснений на естественном языке определим:

- множество слов, из которых будем строить объясняющие цепочки: {Увеличилось, Уменьшилось, Увеличило, Уменьшило, Значение фактора, От, До, Что};
- множество факторов ситуации  $F = \{f_i\}$  и их лингвистических значений  $Z_i$ ;
- вектор начальных значений  $Z(0) = (z_{1k}, z_{2d}, \dots, z_{nl})$ ;
- обратные отображения числовых значений факторов в лингвистические значения  $\varphi_i^{-1}: x \rightarrow z_{il}$ .

Вербализация объяснений  $(f_k, p_{kb}(0); f_t, p_{tb}(1); \dots f_j, p_{jb}(m))$  прогнозных значений фактора строится с использованием двух следующих шаблонов:

1. «Увеличилось» (если  $p_i > 0$ ) («Уменьшилось» (если  $p_i < 0$ )) «значение фактора»  $f_i \in F$  – название фактора «от»  $z_i \in Z(0)$  – текущее лингвистическое значение фактора «до» лингвистическое значение фактора после приращения  $\varphi_i^{-1}(x_i + p_i)$ , «что»

2. «Увеличило» (если  $p_i > 0$ ) («Уменьшило» (если  $p_i < 0$ )) «значение фактора» название фактора  $f_i$  «от» текущее лингвистическое значение фактора  $z_i$  «до» лингвистическое значение фактора после приращения  $\varphi_i^{-1}(x_i + p_i)$ , «что»

и т.д.

Первая строка объяснений содержит описание входных воздействий, а последующие строки отражают «волну» приращений значений факторов когнитивной карты.

## 5. Пример

В качестве примера получения объяснений для верификации когнитивной карты рассмотрим когнитивную карту на рис. 1. Считаем, что определена матрица смежности орграфа  $W$  и положительно определенная матрица смежности  $W'$  [9].

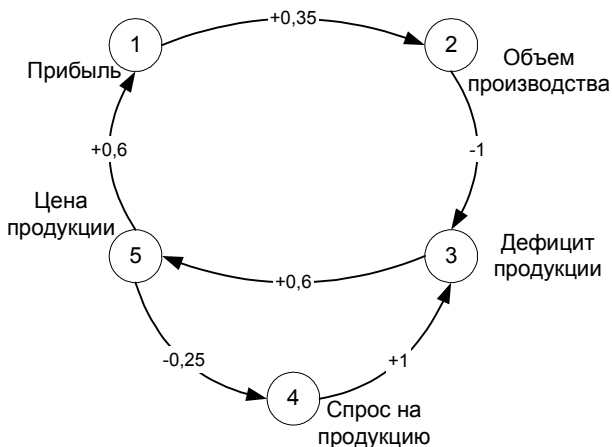


Рис. 1. Пример когнитивной карты

Возможные значения факторов:  $Z_2, Z_3, Z_4$  (Объем производства, Дефицит продукции, Спрос на продукцию) выражены в

натуральных единицах производимой продукции в интервале от 0 до 1000 единиц;  $Z_1$  (*Прибыль*) – выражена в тысячах рублей в интервале от 0 до 1000 тыс. рублей;  $Z_5$  (*Цена продукции*) определена в рублях в интервале от 0 до 100 рублей. Для представления числовых значений факторов в качественных шкалах используется оператор качественного обобщения  $[ ]_Q$  [13]. Применение этого оператора к интервалам числовых значений факторов  $Z_1, \dots, Z_5$  позволяет представить их конечным упорядоченным множеством лингвистических значений  $[Z_1]_Q, \dots, [Z_5]_Q$  и определить шкалы факторов  $\varphi_i : [Z_i]_Q \rightarrow X_i$ .

Текущие значения всех факторов когнитивной карты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Текущие значения факторов

Фактор	Название фактора	Текущее значение $Z(0)$	Текущее значение $X(0)$
$f_1$	Прибыль	306,35 тыс. руб.	0,31
$f_2$	Объем производства	641,78 единиц	0,64
$f_3$	Дефицит продукции	202,14 единиц	0,2
$f_4$	Спрос на продукцию	215,16 единиц	0,22
$f_5$	Цена продукции	7,11 рублей	0,07

Задан вектор входных воздействий  $P(0) = (0; 0; 0,15; 0; 0,15)$ . Он означает увеличение значений двух факторов –  $I_{np} = \{f_3, f_5\}$ :

Дефицит продукции *от* 202,14 единиц *до* 233,93 единиц.

Цена продукции *от* 7,11 рублей *до* 8,18 рублей.

Начальный вектор приращений размерностью  $2n$  имеет следующий вид:  $P(0) = (0; 0; 0; 0; 0,15; 0; 0; 0; 0,15; 0)$ .

Матрица прогноза  $P^t$ , включающая последовательные приращения факторов  $P(1), \dots, P(4)$ , вызванные входным воздействием  $P(0)$  вычисляется с помощью соотношения (2) и приводится в таблице 2. В таблице 3 показана матрица прогноза  $P^t_{\max}$  с выделенными максимальными элементами.

Объясняющие цепочки, полученные с помощью алгоритма выделения цепочек из «волны» приращений следующие:

для положительного приращения ( $f_3, 0,15; f_5, 0,1$ );  
 для отрицательного приращения –  
 ( $f_5, 0,15; f_4, 0,037; f_3, 0,036; f_5, 0,022$ ).

Таблица 2. Матрица прогноза  $P^t$

	P(0)	P(1)	P(2)	P(3)	P(4)
$p_1^+$	0	0,09	0	0	0,014
$p_1^-$	0	0	0	0	0
$p_2^+$	0	0	0,033	0	0
$p_2^-$	0	0	0	0	0
$p_3^+$	0,150	0	0	0	0
$p_3^-$	0	0	0,036	0	0
$p_4^+$	0	0	0	0	0,015
$p_4^-$	0	0,037	0	0	0
$p_5^+$	0,150	0,1	0	0	0
$p_5^-$	0	0	0	0,022	0

Таблица 3. Матрица прогноза  $P^t_{\max}$

	P(0)	P(1)	P(2)	P(3)	P(4)
$p_1^+$	0	0,09	0	0	0
$p_1^-$	0	0	0	0	0
$p_2^+$	0	0	0,033	0	0
$p_2^-$	0	0	0	0	0
$p_3^+$	0,150	0	0	0	0
$p_3^-$	0	0	0,036	0	0
$p_4^+$	0	0	0	0	0,015
$p_4^-$	0	0,037	0	0	0
$p_5^+$	0,150	0,1	0	0	0
$p_5^-$	0	0	0	0,022	0

Вербализованные объяснения, полученные по предложенным шаблонам, следующие:

Объяснение положительного приращения фактора «Цена продукции»:

1. Увеличилось значение фактора **Дефицит продукции** от **202,14 ед.** до **233,93 ед.**, что

2. Увеличило значение фактора **Цена продукции** от **7,11 руб.** до **7,80 руб.**

Объяснение отрицательного приращения фактора «Цена продукции»:

1. Увеличилось значение фактора **Цена продукции** от **7,11 руб.** до **8,18 руб.** что

2. Уменьшило значение фактора **Спрос на продукцию** от **215,16 ед.** до **207,24 ед.**, что

3. Уменьшило значение фактора **Дефицит продукции** от **202,14 ед.** до **194,77 ед.**, что

4. Уменьшило значение фактора **Цена продукции** от **7,11 руб.** до **6,95 руб.**

Для верификации когнитивной карты эксперт-аналитик получает объяснение прогнозных значений интересующих его факторов. Анализ последовательности срабатывания правил, а также значения их приращений, представленные в лингвистическом виде, позволяют судить о правдоподобности процессов получения прогнозных значений этих факторов и правдоподобности структуры когнитивной карты. Представление пары объяснений процесса получения в когнитивной карте положительного и отрицательного прогнозного приращения позволяет аргументировать прогнозные значения факторов. Например, в объяснениях рассмотренного примера определены два процесса. Первый – «Дефицит продукции» – увеличивает «Цену» на 0,69 руб. Второй – замкнутый цикл «Цена»...«Цена» – характеризует работу рыночного регулятора, уменьшающего «Цену» на 0,16 руб. Оба процесса получения значения фактора «Цена на продукцию» и структура когнитивной карты правдоподобны.

Метод верификации когнитивной карты на основе объяснения процессов получения значений факторов в прогнозах может быть использован совместно с методами верификации [11, 1, 2], перечисленными во введении.

Предложенный метод построения объясняющих цепочек, основанный на анализе «волны» приращений факторов в матрице прогноза, позволяет сократить время получения объяснения

прогнозного значения любого фактора ситуации для заданного множества входных факторов.

### **Литература**

1. АБРАМОВА Н.А., КОВРИГА С.В. *Некоторые критерии достоверности моделей на основе когнитивных карт* // Проблемы управления. – 2008. – №6. – С. 23-33.
2. АБРАМОВА Н.А., КОВРИГА С.В. *О рисках, связанных с ошибками экспертов и аналитиков* // Проблемы управления. – 2006. – №6. – С. 60-67.
3. ВЕРТГЕЙМЕР М. *Продуктивное мышление*. – М.: Прогресс, 1987. – 336 с.
4. КОРМЕН Т., ЛЕЙЗЕРСОН Ч., РИВЕСТ Р. *Алгоритмы: построение и анализ*. – М.: МЦНМО, 2002. – 960 с.
5. КУЛИНИЧ А.А. *Когнитивная система поддержки принятия решений «Канва»* // Программные продукты и системы. – 2002. – №3. – С. 25-28.
6. КУЛИНИЧ А.А. *Когнитивные карты и методы их анализа*. // Одиннадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту КИИ-2008. Труды конференции. – М.: Лепант, 2008, – Т. 3. – С. 292-299.
7. ПОСПЕЛОВ Д.А. *Десять «горячих точек» в исследованиях по искусственному интеллекту*. // Интеллектуальные системы (МГУ). – 1996. – Т. 1, вып.1-4. – С. 47-56.
8. РОБЕРТС Ф.С. *Дискретные математические модели с приложениями к социальным, биологическим и экологическим задачам*. – М.: Наука, 1986. – 496 с.
9. СИЛОВ В.Б. *Принятие стратегических решений в нечеткой обстановке*. – М.: ИНПРО-РЕС, 1995. – 228 с.
10. AXELROD R. *The Structure of Decision: Cognitive Maps of Political Elites*. – Princeton: University Press, 1976.
11. EDEN C. *Cognitive mapping* // European Journal of Operational Research. – 1988. – № 36. – Р. 1–1 3.
12. TORGERSON W.S. *Theory and Methods of scaling*. – New York, 1958.



13. WILLIAMS BRIAN C. A theory of interactions: unifying qualitative and quantitative algebraic reasoning / Artificial intelligence. – 1991. – V. 51. – P. 39-94.

**COGNITIVE MAPS VERIFICATION BASED ON PROCESSES EXPLANATION**

**Alexander Kulinich**, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Cand.Sc. Senior scientist (kulinich@ipu.ru).

The cognitive maps verification method based on explanation of factors values forecasting processes is considered. The method is suggested of explanations construction for qualitative cognitive maps.

Keywords: cognitive maps, verification, explanation of forecasts.

*Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии Д. А. Новиковым*