УДК 004.822(824,827)

СЕМИОТИЧЕСКИЕ КОГНИТИВНЫЕ КАРТЫ. Ч. 2. Основные определения и алгоритмы

А.А. Кулинич

Предложена модель представления семиотических когнитивных карт в виде концептуального каркаса в структурированном семантическом пространстве. Определены условия активности метазнака и правила смены состояний семиотической системы. Для конкретной когнитивной карты предложен алгоритм построения интерпретирующего концептуального каркаса, предназначенного для поддержки процессов интерпретации результатов моделирования и верификации когнитивных карт.

Ключевые слова: когнитивная карта, когнитивное моделирование, знак, знаковая система, семиотика, концептуальный каркас, понятийная система.

ВВЕДЕНИЕ

В первой части статьи были проанализированы семиотические подходы в процессах анализа, проектирования и принятия решений в областях информатики и управления [1]. Во второй части приводятся основные определения модели представления семиотических когнитивных карт в семантическом пространстве, предлагается метод структуризации семантического пространства в виде концептуального каркаса. Формулируются условия активности метазнака семиотической системы, определяющие правила смены ее состояний.

Показано, что конкретным причинно-следственным отношениям между значениями признаков ситуации (на когнитивной карте) соответствует конкретный интерпретирующий концептуальный каркас предметной области, в которой эта когнитивная карта построена. Этот факт позволяет применять интерпретирующий каркас для поддержки процессов интерпретации и верификации когнитивной карты. Предложен алгоритм и приведен пример построения интерпретирующего концептуального каркаса.

1. КОГНИТИВНАЯ КАРТА КАК ФОРМАЛЬНАЯ СИСТЕМА

Вначале рассмотрим множество символов, с помощью которых будут описываться сложные динамические ситуации. Это множества:

— объектов $\{v_j\}$;

— имен объектов $\{d^{vj}\}$;

— имен признаков объектов $\{F^j\}$;

— лингвистических значений признаков $\{Z_i^j\}$;

— имен классов объектов $\{d^{Hj}\}$.

На множестве объектов и их имен определено множество семантических отношений $\{r_q\}$. Отметим два вида отношений — это отношение «часть — целое», обозначим его через r_0, и отношение «род — вид» обозначим через r_1. Например, для сложных объектов запись $v_1\ r_0\ v_0$ означает, что объект v_1 является частью объекта v_0. Для имен классов объектов запись $d^{1j}\ r_1\ d^{2j}$ означает, класс объектов d^{1j} является видом класса объектов d^{2j}.

Пусть эксперт (аналитик) наблюдает некоторый объект управления v. Будем считать, что объект простой, т. е. его декомпозиции на составные части не требуется. Используя перечисленные выше символы, эксперт описывает наблюдаемый объект, который будем формально представлять как когнитивную карту объекта управления v, названного d^v, и определять кортежем

$$\langle d^v,\ F,\ Z^*,\ Z^*(0),\ W^*,\ Z^*(t+1)\rangle, \qquad (1)$$

где:

d^v — имя наблюдаемого объект управления;

$F = \{f_i\}$ — множество признаков объекта v, f_i — название признака, $i = 1, ..., n$;

$Z^* = \{Z_i^*\}$ — множество значений признаков; для каждого признака определено упорядоченное множество возможных лингвистических значений, т. е. $Z_i^* = \{z_{i1}^*, ..., z_{iq}^*\}$, $z_{ij+1}^* > z_{ij}^*$, $i = 1, ..., n$, $j = 1, ..., q$, $q = |Z_i^*|$;

$Z^*(0) = (z_1^*, ..., z_n^*)$ — вектор начальных значений всех признаков;

W^*: $\underset{i}{\times} Z_i^* \to \underset{i}{\times} Z_i^*$, где W^* — множество правил отображения значений признаков; это правила продукции «если, то», которые задают причинно-следственные отношения на множестве значений признаков;

$Z^*(t + 1) = W \circ Z^*(t)$ — уравнение динамики, где $\circ$ — правило вывода, $Z^*(t+1)$, $Z^*(t) = (z_{1r}^*, ..., z_{nu}^*)$ — векторы значений признаков — это состояния в последовательные моменты времени, $z_{ie}^* \in Z_i^*$.

В этом определении все значения признаков лингвистические, которые в дальнейшем будем представлять их числовыми эквивалентами. Для этого определим отображение упорядоченного множества лингвистических значений на отрезок числовой оси, т. е. определим шкалу φ: $Z_i^* \to Z_i$, где $Z_i^* = \{z_{i1}^*, ..., z_{ij}^*\}$, $z_{iq+1}^* > z_{iq}^*$, $Z_i = \{z_{i1}, ..., z_{iq}\}$, $z_{ij+1} > z_{ij}$, $z_{ij} \in [0, 1]$, $\forall ij$.

Существует и обратное отображение: φ^{-1}: $Z_i \to Z_i^*$, которое позволяет представить числовое значение признака его лингвистическим эквивалентом φ^{-1}: $z_{ij} \to z_{ij}^*$, $\forall ij$.

На множестве числовых значений признака Z_i определены арифметические операции: сложение (+) и вычитание (−). Определим приращение значения признака z_{ij}, $\forall j$, относительного его начального значения z_{im} как разность $p_i = z_{im} - z_{ij}$, $\forall j$, где $z_{im} \in Z(0)$. Значение любого признака может быть выражено через его приращение, а именно $z_{ij} = z_{im} + p_i$, где $p_i \in [-1, 1]$ приращение значения признака.

Правила W^*: $\underset{i}{\times} Z_i^* \to \underset{i}{\times} Z_i^*$ также могут быть представлены с помощью числовых эквивалентов лингвистических значений: W: $\underset{i}{\times} Z_i \to \underset{i}{\times} Z_i$, т. е. лингвистическое и числовое представление когнитивной карты взаимно-однозначны (эквивалентны), $\langle d^v, F, Z^*, Z^*(0), W^*, Z^*(t + 1)\rangle \Leftrightarrow \langle d^v, F, Z, Z(0), W, Z(t + 1)\rangle$.

В самой общей постановке когнитивного моделирования правила W^* (W) задаются в виде таблицы, в которой всевозможным векторам состояния (ситуациям) ставится в соответствие некоторый иной вектор (ситуация), т. е. правила выражают зависимости между состояниями объекта управления. Задание таких таблиц соответствий достаточно трудоемкая экспертная задача. Поэтому в когнитивном моделировании принято допущение, что эти зависимости в числовом представлении когнитивной карты могут быть заданы аналитически в виде системы простых линейных зависимостей между значениями признаков объекта.

Полученные в результате экспертной оценки коэффициенты линейной зависимости между значениями признаков (w_{ij}) представляются в виде матрицы смежности $W = |w_{ij}|$ ориентированного графа (F, W), который называют когнитивной картой.

В этом случае получение прогнозов развития ситуаций сводится к решению системы конечно-разностных уравнений $Z(t + 1) = W \circ Z(t)$, причем значения признаков $Z(t + 1)$ в прогнозе принимают значения на интервале [0, 1] или на интервале [−1, 1], если конечно-разностные уравнения записаны для приращений.

Отображение числовых значений в лингвистические значения в этом случае станет сюръективным, т. е. числовой интервал $z_{iq} \pm 1/(2(m - 1))$ соответствует лингвистическому значению z_{iq}^*, где $m = |Z_i^*|$, т. е. φ: $z_{iq} \pm 1/(2(m - 1)) \to z_{iq}^*$, $\forall q$, где $z_{iq} \in Z_i$, $z_{iq}^* \in Z_i^*$.

В настоящее время такая линейная аппроксимация в общем вербальной модели объекта управления общепринята в когнитивном моделировании. Такого рода модели называют линейными когнитивными картами, которые воспринимаются и исследуются как чисто математический объект. При этом лингвистическая природа исходного описания объекта управления забывается и не рассматривается. Понятно, что такая линейная аппроксимация вербальной модели объекта верна для моделирования классов объектов управления, в которых множество значений признаков заданы как упорядоченные множества. Если значения признаков заданы как неупорядоченное множество (номинальная шкала), то допущение о линейной зависимости значений признаков неверно. В настоящее время это обстоятельство, как правило, игнорируется, и классы моделируемых систем, также как и область применения когнитивных карт, ничем не ограничивается. Это порождает множество проблем, краткий обзор которых был приведен во Введении к статье [1].

Отметим, что далее в теоретических построениях семиотической когнитивной карты, для упрощения подачи и понимания материала, мы будем

пользоваться числовым описанием линейной когнитивной карты.

Итак, формально семиотическая система включает в себя множества $FS = \langle T, R, A, P\rangle$ определяющие формальную систему и множество правил ее модификации $M_{FS} = \langle \tau, \rho, \alpha, \pi\rangle$. Можно установить соответствие между формальной системой [2, 3] и приведенным выше определением когнитивной карты. Действительно, множество признаков F объекта v и множество их значений Z образуют множество основных символов формальной системы — T, синтаксическое правило R определяет правило построения вектора состояния $Z = (z_1, ..., z_q) \in \underset{i}{\times} Z_i$, множество знаний о предметной области (A) задано начальным состоянием $Z(0)$, а правила вывода (P) задаются множеством правил W и уравнением динамики $Z(t + 1) = W \circ Z(t)$, т. е. $P = \langle W, Z(t + 1)\rangle$.

Таким образом, когнитивная карта как формальная система FS определяется кортежем

$$\langle d^v, F, Z, Z(0), W, Z(t + 1)\rangle. \qquad (2)$$

Для построения семиотической когнитивной карты в определении [2, 3] необходимо определить правила модификации этой формальной системы, $M_{FS} = \langle \tau, \rho, \alpha, \pi\rangle$. Поэтому далее будут рассмотрены модели представления когнитивной карты в виде знака, понятийной системы предметной области в виде ее концептуального каркаса, а также определим условия активности метазнака и правила смены формальной системы.

2. МОДЕЛЬ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ КОГНИТИВНОЙ КАРТЫ В ВИДЕ ЗНАКА

Пусть задана когнитивная карта (2) в виде формальной системы FS. Вначале выделим в кортеже (2) тройку (имя, смысл, представление), позволяющую определить когнитивную карту как знак. Рассмотрим первые четыре элемента этого кортежа: первый элемент d^v очевидно определяет имя объекта управления; элементы (F, Z, $Z(0)$) — множество признаков и множество их значений определяют смысл знака; вектор начальных значений $Z(0)$ определяет представление конкретного объекта v, имя которого d^v.

Следующие элементы кортежа $\langle W, Z(t + 1)\rangle$, определяющие правила вывода, будем использовать при определении правил модификации формальной системы.

На рис. 1 схематично показано представление когнитивной карты, заданное кортежем (2) в виде знака. Вершины *1*, *2* и *3* представляют, соответственно, имя, смысл (признаки и их значения) и

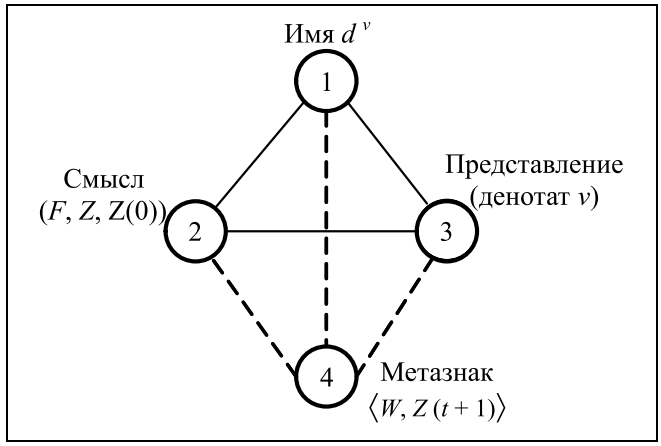

Рис. 1. Когнитивная карта как знак

представление (денотат) конкретной ситуации, представленной когнитивной картой. В вершине *4* представлен метазнак, который реализует активность этого знака. Метазнак задан правилами вывода и при определенных условиях может изменить знак — его смысл, имя и значение. Точное определение метазнака будет рассмотрено далее.

Когнитивную карту, заданную кортежем (2), далее будем рассматривать в семантическом пространстве.

Модель представления экспертных знаний в виде субъективного семантического пространства используется в психологии и в искусственном интеллекте для описания и анализа организации знаний. Субъективное семантическое пространство (от лат. *subjectum* — подлежащее и греч. *semantikos* — обозначающий) — система категорий индивидуального сознания, при помощи которых происходит оценка и классификация различных объектов, понятий [4].

Для целей анализа субъективного семантического пространства система категорий индивидуального сознания с помощью экспертных методов (например, метода репертуарного тестирования [5]) представляется в виде формальных признаковых таблиц, в которых в строках записаны имена анализируемых объектов — это понятия, а в столбцах — название их признаков. В признаковых таблицах на пересечении строки с понятием и каждого столбца с именем признака приводится экспертная оценка значения признака для каждого объекта. Признаковые таблицы могут быть также представлены в виде формального семантического пространства, размерность которого определяется числом признаков объекта. Каждая ось семантического пространства соответствует одному из признаков понятия, а сами понятия представляются в виде точек в этом пространстве. Положение

точки, характеризующее понятие, определяется значениями его признаков. Для оценки и классификации понятий в семантическом пространстве принимается гипотеза, что это пространство метрическое [6]. Семантические пространства в качестве модели представления экспертных знаний находят широкое применение для анализа ситуаций и принятия решений в психологии, социологии, политологии [7, 8].

Модель представления знаний в виде семантического пространства позволяет представлять знаковые системы. Действительно, точки семантического пространства обозначают некоторый реальный объект (денотат) и его состояние, все они именованы (определены имена объектов и их состояний — имена знака) и определены значения всех признаков (координаты точки), которые, по сути, определяют состояние объекта и, в общем, определяют смысл знака.

Определение 1. Семантическим пространством когнитивной карты *FS* будем называть пространство SS^{FS}, определяемое прямым произведением значений всех его признаков, т. е. $SS^{FS} = \underset{i}{\times} Z_i$. ♦

Начальное состояние $Z(0)$ объекта в семантическом пространстве SS^{FS} определяется вектором значений всех его признаков $Z(0) = (z_{1j}, ..., z_{nm})$, $Z(0) \in SS^{FS}$, $z_{1j} \in Z_1, ..., z_{nm} \in Z_n$ и определяет точку в этом пространстве с координатами значений признаков объекта v в начальном состоянии.

На рис. 2 показан пример семантического пространства для абстрактного объекта v, имеющего два признака $F = \{f_1, f_2\}$, значения которых определяются из множеств значений (Z_1, Z_2). Начальное состояние $Z(0) = (z_{1r}, z_{2p})$ объекта показано как точка с координатами (z_{1r}, z_{2p}) в пространстве $SS^{FS} = Z_1 \times Z_2$.

Г. Фреге определил знак тройкой: имя, смысл (понятие) и значение знака. В логике есть синонимичное определение знака — это определение понятия. Формально определим понятие тройкой $\langle d, F(d), V(d)\rangle$, где d — имя понятия, $F(d) = \{f_i, z_{ij}\}$ — содержание понятия (множество признаков и их значений, $z_{ij} \in Z_i$, $\forall j$), $V(d)$ — объем понятия, который включает в себя множество объектов, удовлетворяющих содержанию понятия $F(d)$. Далее будем пользоваться именно этим определением.

В семантическом пространстве можно представить множество состояний значений признаков в виде векторов $Z(t) = (z_{j1}, ..., z_{jm})$, $Z(t) \in SS^{FS}$, $\forall t$. Обычно считается, что в семантическом пространстве задана метрика $\delta(\cdot)$, а состояния, имеющие близкие по значению признаки $\delta(Z(t); Z(t + m)) < \varepsilon$,

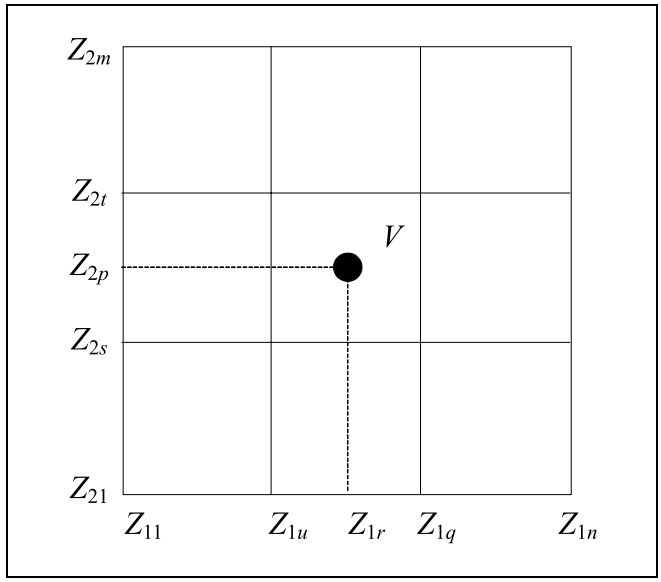

Рис. 2. Семантическое пространство

принадлежат одному классу состояний (понятию), где ε определяет границы класса.

Рассмотрим окрестность точки семантического пространства, представляющей начальное состояние $Z(0) = (z_1 \pm \varepsilon_1, ..., z_m \pm \varepsilon_m)$, где $z_i \pm \varepsilon_I \in Z_i$, $i = 1, ..., m$.

Определение 2. Окрестность $z_i \pm \varepsilon_i$ значений i-го признака состояния $Z(0)$, определяющие класс состояний, будем называть интервалом толерантности класса по этому признаку $\Delta_i = [z_{ik} + \varepsilon_{ik}, z_{ik} - \varepsilon_{ik}]$.

Определение 3. Подпространство семантического пространства $SS(d^0) \subseteq SS^{FS}$, полученное прямым произведением интервалов толерантности всех признаков состояния $Z(0)$ будем называть содержанием базового понятия $F(d^0)$ или областью толерантности базового класса состояний:

$$SS(d^0) = \underset{i}{\times}[z_{ik} + \varepsilon_{ik}, z_{ik} - \varepsilon_{ik}] = \underset{i}{\times}\Delta_i,$$

$$SS(d^0) \subseteq SS^{FS}, \quad F(d^0) = SS(d^0).$$

Определение 4. Объемом $V(d^0)$ понятия d^0 будем называть множество состояний $V(d^0) = \{Z(t), ..., Z(t + m)\}$, значения признаков которых попадают в область толерантности этого понятия $Z(t), ..., Z(t + m) \in SS(d^0)$. ♦

В базовый класс состояний вначале включено только одно известное нам состояние — это начальное состояние $Z(0)$, однозначно определяющее объект v.

Определение 5. Базовый класс состояний или базовое понятие определены тройкой $\langle d^0, SS(d^0)$,

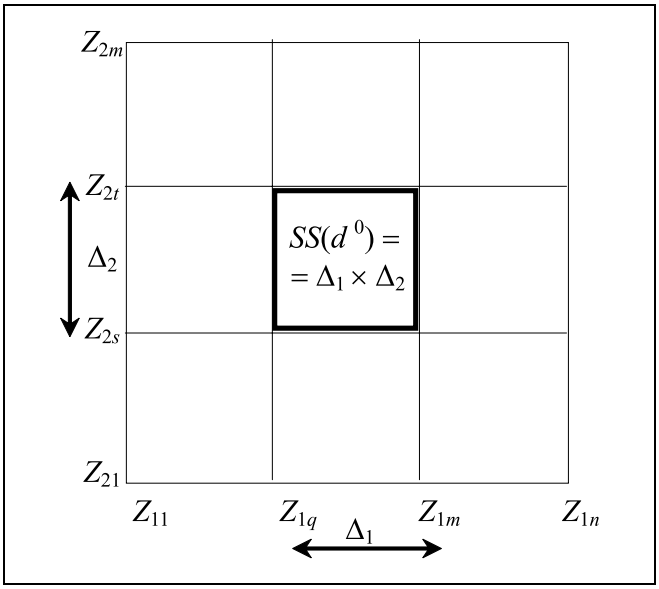

Рис. 3. Базовое понятие

$V(d^0)\rangle$, где d^0 — имя базового класса состояний, его содержание — $SS(d^0)$ и объем — $V(d^0)$.

На рис. 3 показан пример базового понятия d^0, содержание которого определено как подпространство $SS(d^0) = \Delta_1 \times \Delta_2$ семантического пространства SS^{FS}. В подпространство включен объект с именем d^v, значения признаков которого определены начальным состоянием $Z(0)$.

Строго говоря, мы можем рассматривать не один объект v с множеством состояний $V(d^0) = \{Z(t), ..., Z(t + m)\}$, а множество объектов $\{v_1^0, ..., v_p^0\}$, значения признаков которых — состояния $Z_1(0), ..., Z_p(0)$ принадлежат подпространству $SS(d^0)$. Все эти объекты будут иметь имя класса d^0 и включаться в его объем $V(d^0) = \{Z_1(0), ..., Z_p(0)\}$ и отличаться только значениями признаков — состояниями.

Любой объект v_j^0 из этого множества $v_j^0 \in V(d^0)$ описывается кортежем $\langle d^{vk}, F, Z, Z_k(0), \langle W_k, Z_k(t+1)\rangle\rangle$, $k = 1, ..., p$, и, строго говоря, может иметь свое, отличное от других объектов правило вывода — $\langle W_k, Z_k(t + 1)\rangle$.

Допущение 1. Все объекты $\{v_k\}$, включенные в объем базового понятия $V(d^0)$ с общим именем базового понятия d^0, имеют одинаковое правило вывода, т. е. $\langle W_k, Z_k(t + 1)\rangle = \langle W, Z(t + 1)\rangle$, $\forall k$. ♦

Тогда, подставляя в выражение (2) определение базового понятия (определение 5), получим следующее определение когнитивной карты для базового класса состояний объектов:

$$\langle\langle d^0, SS(d^0), V(d^0)\rangle, F, Z, \langle W, Z(t + 1)\rangle\rangle. \quad (3)$$

Выражение (3), с учетом сделанного допущения 1, обобщает выражение (2) для класса аналогичных объектов управления. С позиций семиотического управления это означает, что решения, принимаемые на основе семиотической модели, верны для любого нового объекта, состояние которого попадает в класс базового понятия.

3. МОДЕЛЬ ПОНЯТИЙНОЙ СИСТЕМЫ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

Обычно при построении когнитивных карт аналитики структурируют ту предметную область, для которой когнитивная карта будет построена. В обзорной работе [9] описан ряд методов и подходов структуризации ситуации, применяемых разными исследователями когнитивного подхода. В основном эти методы ориентированы на декомпозицию ситуации, описание ее составных частей, причинно-следственных отношений между их параметрами. Все эти методы и соответствующие приемы, конечно, используются для построения семиотических когнитивных карт. Но отличие семиотических когнитивных карт, ориентированных на знаковое представление ситуации, заключается в том, что здесь нужна не только структурная декомпозиция ситуации, рассмотренная в разных аспектах, но и структуризация понятийной системы (знаковой системы) предметной области, в которой когнитивная карта построена.

Понятийная система предметной области представляется в виде множества понятий этой области. Каждое понятие определяет класс объектов предметной области тройкой: имя класса, атрибуты (признаки) класса и экземпляры класса — это объекты реального мира. По сути, каждое понятие в понятийной системе предметной области, определено тройкой в смысле знака Г. Фреге: имя, смысл — это множество атрибутов (признаков) и значение — это экземпляры предметной области (денотаты). В понятийной системе предметной области, между понятиями определены отношения «род — вид», что позволяет представить их в виде иерархии. В иерархии понятий, понятия верхнего уровня — это «род», обобщают, связанные с ним понятия нижнего уровня «вид». При этом понятия нижнего уровня наследуют все свойства своего родового понятия верхнего уровня. Иначе понятийные системы предметной области называют онтологиями.

Обычно онтологии строятся экспертным способом. В этом случае онтологии плохо определенных предметных областей, отражая уровень знаний экспертов об этой области, оказываются бедными и малополезными для интерпретации результатов когнитивного моделирования. Поэтому в работе [10] для плохо определенных предметных областей вместо подробных онтологий предметной области было предложено при принятии решений использовать качественные концептуальные каркасы понятийных систем (онтологий), построенных в семантическом пространстве этой области.

Концептуальный каркас отражает возможную идеализированную структуру знаний о предметной области. Он включает в себя множество обобщенных понятий предметной области, для которых определены отношения «род — вид», но при этом точно определены только смысл (содержания) обобщенных понятий предметной области, а их имена и объемы (экземпляры — денотаты) должен доопределить эксперт.

В концептуальном каркасе все возможные обобщенные понятия предметной области определяются путем логического обобщения базового понятия. Например, логическое обобщение в случае, если понятие задано конъюнкцией признаков (значения признаков бинарные: признак есть; признака нет), заключается в отбрасывании признаков. В работе [2] такой тип обобщения называется структурным обобщением. В работе [10] этот подход логического обобщения применяется для понятий, признаки которых заданы упорядоченным множеством лингвистических значений и представлены в семантическом пространстве.

Кратко поясним, как строится концептуальный каркас в семантическом пространстве. Допустим, в семантическом пространстве эксперт определил базовое понятие $\langle d^0,\ SS(d^0),\ V(d^0)\rangle$ и некоторое другое понятие также тройкой: $\langle d^H,\ SS(d^H),\ V(d^H)\rangle$, где d^H — имя понятия, $SS(d^H)$ — содержание понятия, заданное как подпространство семантического пространства, и $V(d^H)$ — объем понятия. Показано, что подпространство $SS(d^H) \subset SS^{FS}$, определяющее понятие с именем d^H, является обобщением базового понятия d^0, определенное подпространством $SS(d^0) \subset SS^{FS}$, в том и только в том случае, если $SS(d^0) \subset SS(d^H)$ [10].

Действительно, пусть имеется включение подпространств $SS(d^0) \subset S(d^H)$. Допустим, что определены: объем понятия d^0, $V(d^0) = \{Z_j^0\}$, где $Z_j^0 \in SS(d^0)$ — состояние объекта ν_j^0, и объем понятия d^H, $V(d^H) = \{Z_j^0,\ Z_q^0\}$, где $Z_j^0,\ Z_q^0 \in SS(d^H)$ — состояния объектов ν_j^0 и ν_q^0. Тогда, при условии включения подпространств ($SS(d^0) \subset SS(d^H)$), будет выполняться достаточное условие для определения обобщенного понятия, а именно, включение объемов $V(d^0) \subset V(d^H)$, т. е., объем обобщенного понятия d^0 включен в объем обобщающего понятия d^H.

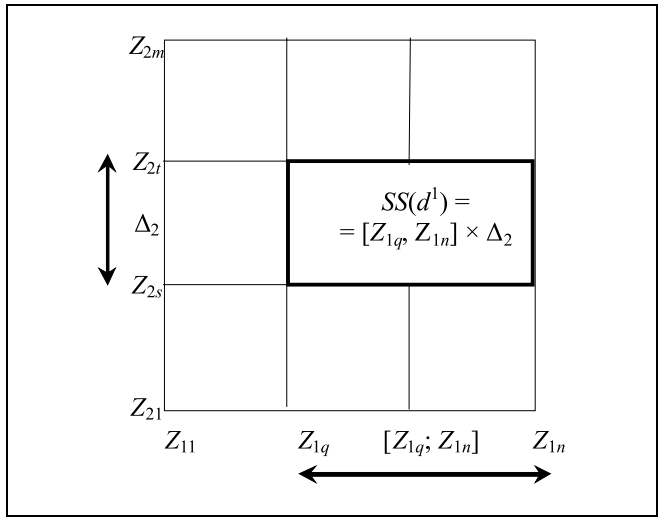

Рис. 4. Положительное обобщение базового понятия

Определение 6. Обобщенное понятие (класс) d^H называется реальным обобщенным понятием, если разность объемов обобщенного понятия $V(d^H)$ и обобщаемого понятия $V(d^0)$ есть не пустое множество, т. е. $V(d^H) \setminus V(d^0) \neq \varnothing$, в противном случае это обобщенное понятие будем называть виртуальным. ♦

В работе [10] были определены качественное положительное или отрицательное обобщение базового понятия по одному признаку и обобщение по нескольким признакам.

Определение 7. Содержание качественного положительного обобщенного понятия базового понятия d^0 по признаку q, $SS(d^H)$, определяется как подпространство семантического пространства SS^{FS}:

$$SS(d^H) = \underset{i \neq q}{\times} \Delta_i \times [\min\Delta_q;\ \max Z_q],$$

$$SS(d^H) \subset SS^{FS}, \quad SS(d^0) \subset SS(d^H). \ \blacklozenge$$

Пример качественного положительного обобщения базового понятия представлен на рис. 4. Здесь показано обобщение базового понятия по

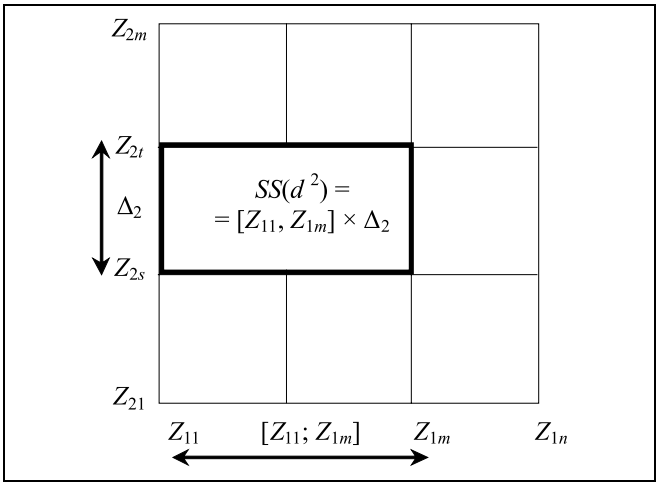

Рис. 5. Отрицательное обобщение базового понятия

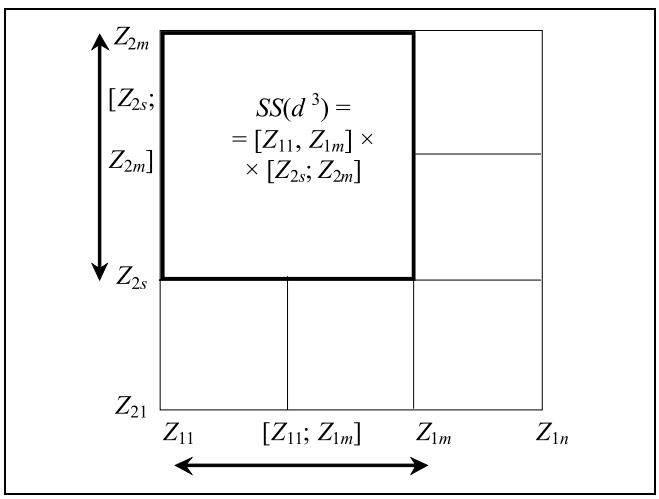

Рис. 6. Обобщение базового понятия по двум признакам

признаку Z_1, т. е. образуется новое понятие с именем d^1 и содержанием $SS(d^1) = [Z_{1q}; Z_{1n}] \times \Delta_2$.

Определение 8. Содержание качественного отрицательного обобщенного понятия базового понятия d^0 по признаку q определяется из соотношения

$$SS(d^H) = \underset{i \neq q}{\times} \Delta_i \times [\max \Delta_q; \min Z_q],$$

$$SS(d^H) \subset SS^{FS}, \quad SS(d^0) \subset SS(d^H). \ \blacklozenge$$

Пример качественного отрицательного обобщения базового понятия представлен на рис. 5. Показано отрицательное обобщение базового понятия по признаку Z_1, т. е. образуется новое понятие с именем d^2 и содержанием $SS(d^2) = [Z_{11}; Z_{1m}] \times \Delta_2$.

Определение 9. Содержание качественного обобщенного понятия базового понятия d^0 по нескольким признакам определяется из соотношения:

$$SS(d^H) = \underset{i \in A}{\times} \Delta_i \underset{k \in B}{\times} [\min \Delta_k; \max Z_k] \underset{g \in C}{\times} [\max \Delta_g; \min Z_g],$$

$$SS(d^H) \subset SS^{FS}, \quad SS(d^0) \subset SS(d^H),$$

где A — множество индексов необобщенных признаков, B — множество индексов положительно обобщенных признаков, C — множество индексов отрицательно обобщенных признаков $|A \cup B \cup C| = |F|$. ♦

Пример качественного обобщения базового понятия по двум признакам представлен на рис. 6. Согласно правилу обобщения базового понятия по двум признакам получаем новое понятие с именем d^6 и с содержанием $SS(d^6) = [Z_{11}; Z_{1m}] \times [Z_{2s}; Z_{2m}]$.

Рассмотрим множество всех подпространств $\{SS(d^H)\}$, $\forall H$, полученных в результате качественного положительного или отрицательного обобщения базового понятия по одному, двум и так далее признакам в семантическом пространстве SS^{FS}, $SS(d^H) \subset SS^{FS}$, $\forall H$, $H = 1, ..., 3^N$.

Множество подпространств $\{SS(d^H)\}$ удовлетворяет свойствам рефлективности, антисимметричности и транзитивности, для любой пары которых определены верхняя и нижняя границы [10]. В этом случае это множество подпространств образует решетку $(\{SS(d^H)\}, \cap, \cup)$, структурирующую семантическое пространство [10].

Определение 10. Решетку подпространств $(\{SS(d^H)\}, \cap, \cup)$, $\forall H$, $H = 1, ..., 3^N$, будем называть качественным концептуальным каркасом этого семантического пространства [10]. ♦

Обобщенные понятия по включению подпространств образуют решетку, которая может быть представлена в виде диаграммы Хассе. Пример концептуального каркаса в виде диаграммы Хассе для рассмотренного примера показан на рис. 7.

Для рассмотренного примера с двумя признаками число обобщений базового понятия составит: по признаку Z_1 — два обобщения (положительное d^1, отрицательное d^2); по признаку Z_2 — два обобщения (положительное d^3, отрицательное d^4), по двум признакам Z_1 и Z_2 — четыре обобщенных понятия (положительное по признаку Z_1 и отрицательное по признаку Z_2 – d^8; положительное по признаку Z_1 и положительное признаку по признаку Z_2 – d^5; отрицательное по признаку Z_1 и

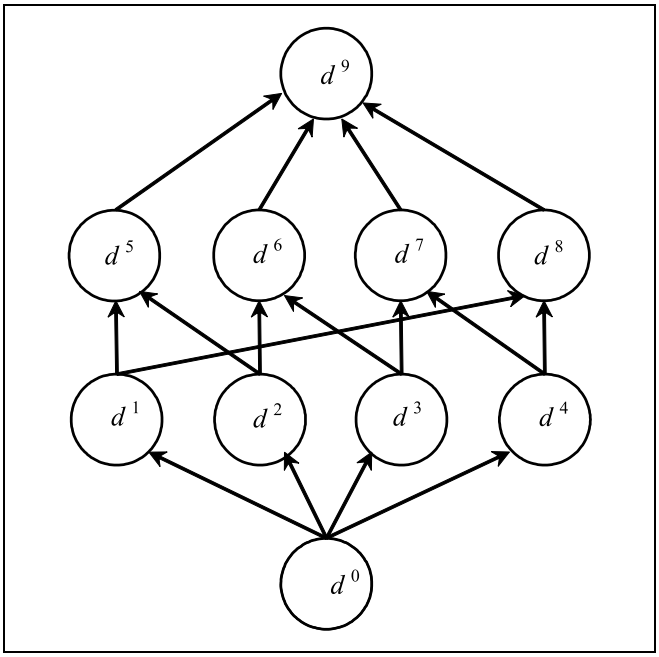

Рис. 7. Концептуальный каркас в семантическом пространстве

положительное признаку по признаку Z_2 – d^6; отрицательное по признаку Z_1 и отрицательное признаку по признаку Z_2 – d^7).

Самый верхний уровень — понятие d^9 — это самое обобщенное понятие этой предметной области, совпадающее с семантическим пространством предметной области SS^{FS}. Дуги на диаграмме Хассе означают вложение подпространств. Так, дуги между базовым понятием d^0 и понятиями d^1, d^2, d^3 и d^4 означают, что его содержание включено в содержание этих понятий. Соответственно, включение содержаний понятий, обобщенных по одному признаку, в содержание понятий, обобщенных по двум признакам, также показано соответствующими дугами.

Такая семантическая структура — концептуальный каркас — является идеализированной качественной онтологией предметной области, в которой построена когнитивная карта. Фактически концептуальный каркас поделил все семантическое пространство на вложенные подпространства $SS(d^H)$, для каждого из которых может быть определено имя d^H и объем $V(d^H)$, $\forall H$.

3.1. Состояние семиотической когнитивной карты

Отметим, что концептуальный каркас был построен для базового понятия d^0, в объем которого включался конкретный объект v, имеющий вектор значений признаков $Z(0)$. Но в этой предметной области могут быть и другие объекты v_j^H с вектором значений признаков Z_j^H, но не попадающие в область $SS(d^0)$ базового понятия, т. е. $Z_j^H \notin SS(d^0)$, $Z_j^H \in SS^{FS}$. Такие объекты попадают в область обобщенных понятий, $Z_j^H(t) \in SS(d^H)$, имеют имя d^H и объем $V(d^H) = \{Z(0), Z_j^H\}$, и, строго говоря, правила вывода $\langle W_j^H, Z_j^H(t+1)\rangle$ для этих объектов (ситуаций) могут не совпадать с правилом вывода для объектов из базового класса d^0, т. е. $\langle W_j^H, Z_j^H(t+1)\rangle \neq \langle W, Z(t+1)\rangle$.

Ранее было сделано допущение 1, согласно которому все объекты базового класса имеют одно и то же правило вывода $\langle W, Z(t+1)\rangle$. Теперь сделаем такое же допущение для объектов, попадающих в класс обобщенных состояний.

Допущение 2. Множество ситуаций с состояниями $Z_j^H \in SS(d^H)$, принадлежащие объему обобщенного понятия (классу состояний), имеют одинаковое правило вывода $\langle W^H, Z^H(t+1)\rangle$, т. е. $\langle W_j^H, Z_j^H(t+1)\rangle = \langle W^H, Z^H(t+1)\rangle$, $\forall j$. ♦

Определение 11. Правило вывода $\langle W^H, Z^H(t+1)\rangle$ будем называть правилом вывода обобщенного понятия d^H, которое справедливо для всех ситуаций или объектов v_j^H с состоянием Z_j^H, $\forall j$, принадлежащих разности объемов обобщенного $V(d^H)$ и необобщенного понятия $V(d^0)$, т. е., $Z_j^H \in V(d^H) \setminus V(d^0)$. ♦

Тогда семиотическая когнитивная карта определится кортежем:

$$\langle d^H, SS(d^H), V(d^H), F, Z, \langle W^H, Z^H(t+1)\rangle\rangle, \forall H, \quad (4)$$

где $H = 0, ..., 3^N$, d^H — имя, $SS(d^H) \in (\{SS(d^H)\}, \cap, \cup)$ — содержание, $V(d^H)$ — объем, $\langle W^H, Z^H(t+1)\rangle$ — правило вывода для обобщенного класса состояний.

В отличие от определения (3) в определении (4) базовое понятие $\langle d^0, SS(d^0), V(d^0)\rangle$ $(SS(d^0) \subset SS(d^H), \forall H)$, исходная ситуация с состоянием $Z(0)$, $(V(d^0) = \{Z(0)\})$ стали частью структурированной понятийной системы, в которой появилось множество других имен обобщенных понятий (классов состояний) d^H, с содержанием $SS(d^H)$ и объемом $V(d^H)$, $\forall H$ (по сути это новые знаки), связан-

ных с базовым классом состояний отношением «род — вид».

С позиций прикладной семиотики это означает, что кроме исходного семиотического описания объекта управления, заданного в виде знака кортежем (3), в предметной области существует множество других, обобщенных описаний, представленных другими знаками: (d^H, $SS(d^H)$, $V(d^H)$), правилом вывода $\langle W^H, Z^H(t+1)\rangle$, структурированных в качественном концептуальном каркасе предметной области.

Определение 12. Состоянием семиотической когнитивной карты будем называть описание ситуации кортежем (4) для конкретного значения уровня обобщения H. ♦

Например, при $H = 0$ имеет место начальное описание ситуации с кортежем (2).

Поясним сказанное на простом (без строгой формализации) примере вербального описания ситуации конфликта в семье: «Жена желает приобрести собаку, но муж против этого». Описание этой ситуации может быть представлено в виде сети знаков, в виде некоторой семантической сети, узлами которой будут имена знаков: жена, муж и собака. Заданы также и отношения между этими знаками (желает приобрести и против приобретения). Рассмотрим один из знаков этой семиотической системы: собаку. В терминах концептуального каркаса, на первом уровне обобщения этого знака (собака это вид домашних животных) описание конфликта будет выглядеть так: «Жена желает приобрести домашние животное, но муж против этого». Это описание будет новым состоянием семиотической системы. В этом случае в сети знаков знак «собака» заменен знаком «домашние животные». Отношения между узлами не изменились.

Теперь обратимся к определению 11, согласно которому новые правила вывода (возможно разрешающие конфликт) могут быть определены для объектов из разности объемов обобщенного и необобщенного понятия. Разностью объемов понятия «домашние животные» за исключением объема базового понятия — «собака» может быть, например, «кошка». Тогда описание ситуации может выглядеть так: «Жена желает приобрести кошку, и муж не против этого». Это описание уже неконфликтно и, следовательно, основано на других правилах вывода. Конечно, не обязательно «муж» изменит свое отношение к домашним животным — это вопрос его личных оценок ситуации, и он будет рассмотрен далее.

Не любое из 3^N возможных состояний могут быть верными в семиотическом описании (объекта) ситуации. Для определения возможных состояний семиотической когнитивной карты и возможных переходов между состояниями в данной предметной области определим метазнак, который реализует активность семиотической системы.

4. МЕТАЗНАК, УСЛОВИЯ АКТИВНОСТИ

Под метазнаком в настоящей работе понимается управляющая система, оценивающая текущее состояние знака и предлагающая действия, направленные на изменение этого знака. По сути, метазнак реализует правила M_{FS} смены формальной системы FS.

В нашем случае изменение состояния семиотической когнитивной карты, согласно определению 12, заключается в замене описания ситуации базовым понятием $\langle d^0, SS(d^0), V(d^0)\rangle$ на обобщенное описание понятием $\langle d^H, SS(d^H), V(d^H)\rangle$. Естественно, что такое обобщение возможно в рамках концептуального каркаса предметной области с учетом отношений «род — вид» между разными классами состояний.

Рассмотрим правила смены состояний когнитивной карты семиотического типа.

4.1. Правила смены состояния семиотической когнитивной карты

Правила смены состояния основаны на правилах формальной системы P, которые ранее были определены парой $P = \langle W^0, Z^0(t+1)\rangle$. Правила W^0, связывающее различные вектора значений признаков и уравнение динамики $Z^0(t+1) = W^0 \circ Z^0(t)$ были описаны при формальном определении когнитивной карты в § 2.

При определении правил смены состояния семиотической когнитивной карты считается, что если в векторе состояния $Z(t)$, $\forall t$, значение хотя бы одного признака z_q вышло за пределы базового понятия $SS(d^0) = \underset{i}{\times}\Delta_i$, $z_q \in Z(t)$, $z_q \notin SS(d^0)$, то изменяется состояние семиотической когнитивной карты.

Изменение состояния семиотической когнитивной карты, согласно ее определению кортежем (4) и определению 12, означает изменение: имени — $d^0 \to d^H$; содержания $SS(d^0) \to SS(d^H)$; объема $V(d^0) \to V(d^H)$ и правил вывода $\langle W^0, Z^0(t+1)\rangle \to \langle W^H, Z^H(t+1)\rangle$.

Далее мы рассмотрим правила изменения содержания обобщенного состояния когнитивной карты, предполагая, что это изменение приведет к изменениям имени, объема и правил вывода.

Правило 1. Если значение признака $z_q \in Z(t)$ превысило максимальное значение интервала то-

лерантности этого признака, $z_q > \max\Delta_q$, то содержание обобщенного состояния определится из соотношения

$$SS(d^q) = \underset{i \neq q}{\times} \Delta_i \times [\min\Delta;\ \max Z_q].$$

Иначе это правило запишем как

$$\exists z_q \in Z(t) \,|\, z_q \notin SS(d^0)\ \&\ z_q > \max\Delta_q \rightarrow SS(d^q) = \underset{i \neq q}{\times} \Delta_i \times [\min\Delta;\ \max Z_q]. \ \blacklozenge$$

Например, качественное положительное обобщение базового понятия (см. рис. 6) произойдет, если при моделировании динамики системы значение $z_1(t)$ признака Z_1 превысило значение верхней границы интервала толерантности $\Delta_1 = [Z_{1q};\ Z_{1m}]$, т. е. $z_1(t) > z_{1m}$. Тогда, согласно правилу смены семиотической системы, происходит обобщение базового понятия по признаку Z_1, т. е. образуется новое понятие с именем d^1 и содержанием $SS(d^1) = [Z_{1q};\ Z_{1n}] \times \Delta_2$ и объемом $V(d^1) = \{Z(t+1)\}$, $Z(t+1) = (z_{1m},\ z_{2r})$, $z_{2r} \in \Delta_2$.

Правило 2. Если значение признака $z_q \in Z(t)$ меньше минимального значения интервала толерантности этого признака, $z_q < \min\Delta_q$, то содержание обобщенного состояния определится из соотношения:

$$SS(d^q) = \underset{i \neq q}{\times} \Delta_i \times [\max\Delta_q;\ \min Z_q].$$

Иначе это правило запишется как

$$\exists z_q \in Z(t) \,|\, z_q \notin SS(d)\ \&\ z_q < \min\Delta_q \rightarrow SS(d^q) = \underset{i \neq q}{\times} \Delta_i \times [\max\Delta_q;\ \min Z_q]. \ \blacklozenge$$

Например (см. рис. 7), если при моделировании значение признака Z_1, $z_1(t+1)$ стало меньше значения нижней границы интервала толерантности $\Delta_1 = [Z_{1q};\ Z_{1m}]$, т. е. $z_1(t) < z_{1q}$, то согласно правилу смены семиотической системы происходит отрицательное обобщение базового понятия по признаку Z_1, т. е. образуется новое понятие с именем d^2 и содержанием $SS(d^2) = [Z_{11};\ Z_{1m}] \times \Delta_2$.

Представим вектор значений признаков в некоторый момент времени t в виде:

$$Z(t) = Z_A(t) \cup Z_B(t) \cup Z_C(t),$$

где $Z_A(t)$ — часть вектора состояния, содержащего элементы $z_i(t)$, значения которых не пересекли границ интервалов толерантности, т. е. $z_i(t) \in \Delta_i$, $i \in A$, где A — множество индексов элементов $Z_A(t)$; $Z_B(t)$ — часть вектора состояния, содержащего элементы $z_k(t)$, значения которых больше верхней границы их интервалов толерантности, т. е. $z_k(t) > \max\Delta_k$, $k \in B$, где B — множество индексов элементов $Z_B(t)$; $Z_C(t)$ — часть вектора состояния, содержащего элементы $z_k(t)$, значения которых меньше нижней границы их интервалов толерантности, т. е. $z_g(t) < \min\Delta_g$, $k \in C$, где C — множество индексов элементов $Z_C(t)$.

Правило 3. Если в векторе значений признаков есть множества признаков значения, которых: $z_i \in \Delta_i$, превысили максимальное значение $z_k > \max\Delta_k$, меньше минимального значения $z_g < \min\Delta_g$ интервалов толерантности этих признаков, то содержание обобщенного состояния определится из соотношения

$$SS(d^q) = \underset{i \in A}{\times} \Delta_i \underset{k \in B}{\times} [\min\Delta_k;\ \max Z_k] \underset{g \in C}{\times} [\max\Delta_g;\ \min Z_g].$$

Иначе это правило запишем в виде

$$\exists\, Z_A^*(t+1) = \{z_i(t+1)\} | z_i(t+1) \in \Delta_i,\ i \in A\ \&$$

$$\exists\, Z_B^+(t+1) = \{z_k(t+1)\} | z_k(t+1) > \max\Delta_k,\ k \in B\ \&$$

$$\exists\, Z_C^-(t+1) = \{z_g(t+1)\} |\ z_g(t+1) < \min\Delta_g,\ k \in C \rightarrow$$

$$SS(d^q) = \underset{i \in A}{\times} \Delta_i \underset{k \in B}{\times} [\min\Delta_k;\ \max Z_k] \underset{g \in C}{\times} [\max\Delta_g;\ \min Z_g]. \ \blacklozenge$$

Например, рассмотрим качественное обобщение базового понятия по двум признакам (рис. 6). Здесь значение $z_1(t+1)$ признака Z_1 стало меньше значения нижней границы интервала толерантности $\Delta_1 = [Z_{1q};\ Z_{1m}]$, т. е. $z_1(t+1) < z_{1q}$, а значение признака Z_2 стало больше интервала толерантности $z_2(t+1) > z_{2r}$. Тогда, согласно правилу обобщения базового понятия по двум признакам, получаем новое понятие с именем d^3 и с содержанием $SS(d^3) = [Z_{11};\ Z_{1m}] \times [Z_{2s};\ Z_{2m}]$.

Правило 3 — это общее правило смены состояния, будем обозначать его R_{ch}. Оно позволяет представить любое состояние динамической системы, заданное вектором значений признаков $Z(t) \in SS^{FS}$, $\forall t$, в виде знака концептуального каркаса предметной области, заданное уже тройкой: $\langle d^H,\ SS(d^H),\ V(d^H)\rangle$, где $SS(d^H) \in (\{SS(d^H)\},\ \cap,\ \cup)$, $Z(t) \in V(d^H)$.

Таким образом, правило R_{ch} указывает на новый обобщенный класс состояний, элементы объема которого $Z_j^H \in V(d^H)$, $\forall j$ могут принадлежать другой формальной системе $FS(t)$. Динамичес-

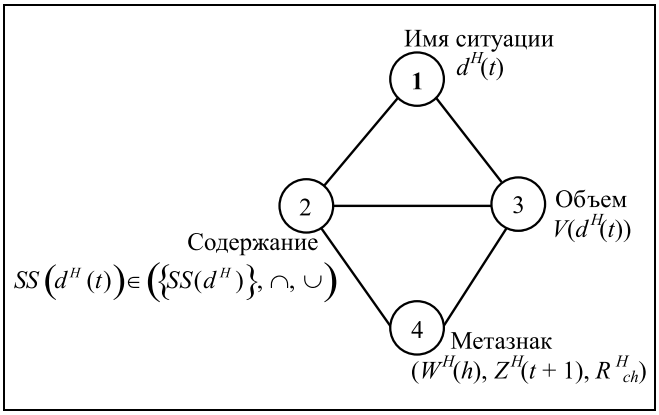

Рис. 8. Динамическая семиотическая когнитивная карта

кую семиотическую когнитивную карту определим кортежем

$$\langle d^H(t),\ SS(d^H(t)),\ V(d^H(t)),\ F,\ Z,\ \langle W^H(t),\ Z^H(t+1)\rangle,\ R_{ch}\rangle, \quad (5)$$

где $H = 0, \ , 3^N$, $d^H(t)$ — имя, $SS(d^H(t)) \in (\{SS(d^H)\}, \cap, \cup)$ — содержание, $V(d^H(t))$ — объем, $\langle W^H(t), Z^H(t+1)\rangle$ — правило вывода для обобщенного класса состояний в некоторый момент времени t, R_{ch} — правило смены состояния семиотической системы.

Этот кортеж определяет динамическую когнитивную карту семиотического типа, поскольку правила вывода $\langle W^H, Z^H(t+1)\rangle$ определяют новые значения признаков $Z(t)$, а правило смены состояний семиотической системы R_{ch} определяет ее новые состояния в разные моменты времени в виде знака $\langle d^H(t),\ SS(d^H(t)),\ V(d^H(t))\rangle$.

На рис. 8 схематично показана динамическая семиотическая когнитивная карта, соответствующая кортежу (5). В вершине «Содержание» определен концептуальный каркас — как множество вложенных подпространств $(\{SS(d^H)\}, \cap, \cup)$ — и текущее содержание $SS(d^H(t))$ обобщенного понятия, в вершине «Имя ситуации» определено имя $d^H(t)$, соответствующее подпространству $SS(d^H(t))$ концептуального каркаса, и в вершине «Объем» $V(d^H(t))$ определен объем обобщенных понятий с именем $d^H(t)$, $\forall H$. В вершине «Метазнак» заданы множество правил вывода $\langle W^H, Z^H(t+1)\rangle$ для каждого из обобщенных понятий d^H и правило смены состояния семиотической системы R_{ch}.

Три вершины «Содержание», «Имя ситуации» и «Объем» связаны семиотическими отношениями. Это означает, что элементы множеств, определенных в этих вершинах: различные имена, содержания и объемы, образуют знак. Один из этих знаков в концептуальном каркасе точно определен — это начальное состояние или базовое понятие, для которого определено имя — d^0, содержание — $SS(d^0)$, объем — $V(d^0)$ и правила вывода — $\langle W, Z(t+1)\rangle$. Для остальных обобщенных понятий концептуального каркаса, которые также представляются знаками, точно определены только их содержание.

Далее считаем, что методы определения имен, объема и правил вывода для обобщенных понятий концептуального каркаса существуют, и будем рассматривать семиотические когнитивные карты на абстрактном уровне.

4.2. Интерпретирующий концептуальный каркас

Определение семиотической когнитивной карты (5) дано для общего случая. Считается, что любое обобщенное состояние определяется именем, содержанием, объемом и правилами вывода, отличными от имени, содержания, объема и правил вывода базового понятия.

Однако интерес представляет случай, когда для разных семиотических состояний $\langle d^H, SS(d^H), V(d^H)\rangle$ правила вывода $\langle W^H, Z^H(t+1)\rangle$ остаются неизменными, например, это может быть правило базового понятия, т. е. $\langle W^H, Z^H(t+1)\rangle = \langle W, Z(t+1)\rangle$, $\forall H$.

В этом случае часть концептуального каркаса, обобщенные понятия которого имеют общее правило вывода, образуют интерпретирующий концептуальный каркас для этого правила.

Определение 13. Интерпретирующим концептуальным каркасом называется часть (подрешетка) $(\{SS(d^{H^*})\}, \cap, \cup)$ полного концептуального каркаса (полной решетки подпространств семантического пространства) $(\{SS(d^H)\}, \cap, \cup)$, $\{SS(d^{H^*})\} \subseteq \{SS(d^H)\}$, $\forall H$, в каждом из подпространств, определяющих содержание $SS(d^{H^*})$, имя d^{H^*} и объем $V(d^{H^*})$ класса ситуаций, выполняется одно и то же правило вывода $\langle W, Z(t+1)\rangle$, а разности объемов обобщенного и необобщенного классов ситуаций $(d^{H'} = V(d^H)/V(d^q)) \neq \varnothing$, $d^q\ r_1 d^{H^*}$) не пустое множество, т. е. определен денотат для каждого обобщенного понятия. ♦

Поясним это определение на простом примере. Пусть задана семиотическая когнитивная карта кортежем (2), определены два признака X и Y, их значения на интервале z_y, $z_x \in [0, 1]$, определено базовое понятие $\mathrm{SS}(d^0) = [z_{11}, z_{12}] \times [z_{21}, z_{22}]$.

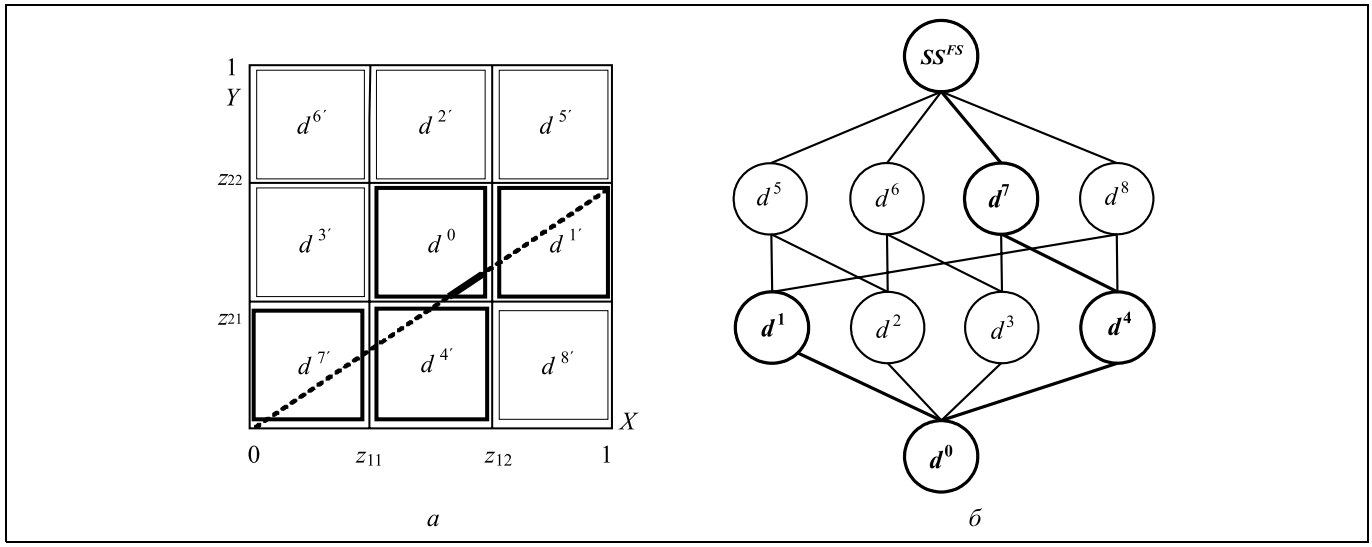

Рис. 9. Представление когнитивной карты (*а*) в семантическом пространстве и интерпретирующий концептуальный каркас (*б*) для зависимости признаков (6)

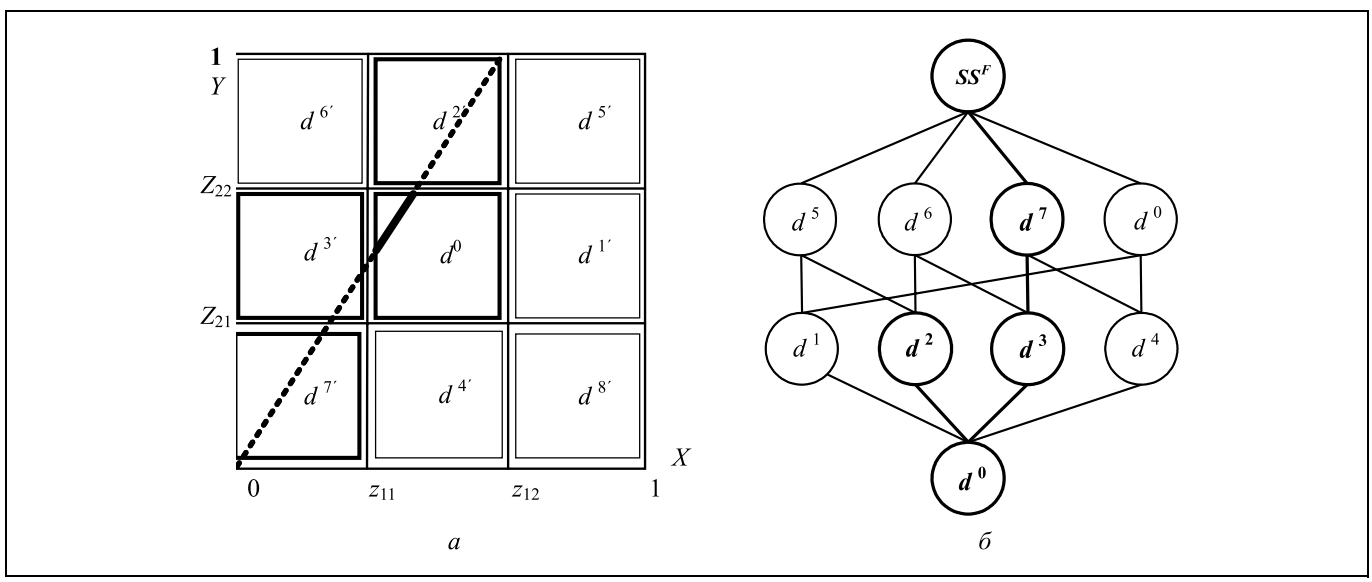

Рис. 10. Представление когнитивной карты (*а*) в семантическом пространстве и интерпретирующий концептуальный каркас (*б*) для зависимости признаков (7)

Пусть два эксперта задают правила вывода для базового понятия d^0, которые записываются уравнениями

$$z_y = 0{,}67z_x, \tag{6}$$

$$z_y = 1{,}5z_x, \tag{7}$$

где $z_y \in [z_{21}, z_{22}]$, $z_x \in [z_{11}, z_{12}]$.

В когнитивном моделировании принято, что линейная аппроксимация зависимости признаков для базового понятия справедлива во всей области определения значений признаков, т. е. $z_y \in [0,1]$, $z_x \in [0,1]$.

Представление этих когнитивных карт в семантическом пространстве, поделенном на вложенные подпространства, определяющие содержание обобщенных понятий концептуального каркаса, показано на рис. 9, *а* и 10, *а*. Подпространства семантического пространства обозначены как d^0 и $d^{1'}$—$d^{8'}$. В работе [10] подпространства $d^{1'}$—$d^{8'}$ были определены как разности содержаний обобщен-

ного и необобщенного понятий, например, для рис. 4—6, эти подпространства определятся из соотношений: $d^{1'} = SS(d^1)/SS(d^0)$, $d^{2'} = SS(d^2)/SS(d^0)$, $d^{6'} = SS(d^6)/SS(d^0) \cup d^{3'} \cup d^{2'}$. Показано, что если значения функции зависимости признаков (например, 6) попадают в подпространства $d^{1'}$—$d^{8'}$, то обобщенные понятия d^1—d^8 будут включены в интерпретирующий концептуальный каркас, соответствующий этой зависимости [10].

На рис. 9, *б* показан интерпретирующий концептуальный каркас, в который включены только те обобщенные понятия (d^0, d^1, d^4, d^7), подпространства (d^0, $d^{1'}$, $d^{4'}$, $d^{7'}$) которых пересекают график функции (6) (см. рис. 9, *а*), а на рис. 10, *б* — интерпретирующий каркас для зависимости между признаками (7) (см. рис. 10, *а*), который включает в себя обобщенные понятия (d^0, d^2, d^3, d^7).

Сравнивая концептуальные каркасы, представленные на рис. 9, *б* и 10, *б*, видим, что разные зависимости признаков порождают разные интерпретирующие концептуальные каркасы.

Здесь возникает естественный вопрос: «Какая из зависимостей (6) или (7) верна?». Согласно определению 13, это будет та зависимость, в концептуальном каркасе которой для всех обобщенных понятий существует объект реального мира — денотат.

Фактически содержания $SS(d^{H^*})$ обобщенных понятий интерпретирующего концептуального каркаса определяют подпространства значений признаков реального объекта (или его состояний) — денотата, существование которого подтверждает правильность правил вывода когнитивной карты. В этом смысле интерпретирующий каркас полезен для верификации когнитивной карты, поскольку явным образом определяет свойства возможного денотата.

С учетом интерпретирующего концептуального каркаса перепишем кортеж (5) в виде:

$$\langle d^{H^*}(t),\ SS(d^{H^*}(t)),\ V(d^{H^*}(t)),\ F,\ Z,\ \langle W,\ Z(t+1)\rangle,\ R_{ch}\rangle. \qquad (8)$$

Определение 14. Описание динамической ситуации, заданное кортежем (8), будем называть семиотической когнитивной картой или когнитивной картой семиотического типа. ♦

Здесь, в отличие от определения (5) концептуального каркаса всей предметной области для множества возможных правил вывода в этой области, определен интерпретирующий концептуальный каркас ($\{SS(d^{H^*})\}$, $\cap$, $\cup$) для конкретного набора правил вывода $\langle W,\ Z(t+1)\rangle$.

В отличие от классического определения когнитивной карты (см. Введение к статье [1]) как множества признаков ситуации, для значений которых определены причинно-следственные отношения, заданные взвешенным графом, в определении (8) появилась «надстройка» в виде интерпретирующего концептуального каркаса. Теперь любое состояние ситуации, заданное вектором значений признаков, можно представлять в виде знака, заданного тройкой: имя, содержание, объем. Это позволяет снять проблему интерпретации результатов когнитивного моделирования, а также решить и проблему верификации когнитивной карты.

В методологии когнитивного моделирования определены методы построения, параметризации когнитивных карт, их анализа и принятия решений [9]. Все эти методы применяются и для построения семиотических когнитивных карт. Специфическим элементом семиотической когнитивной карты является интерпретирующий концептуальный каркас, алгоритм построения которого будет рассмотрен далее.

5. АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕРПРЕТИРУЮЩЕГО КОНЦЕПТУАЛЬНОГО КАРКАСА ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

В данном параграфе предлагается конструктивный метод определения интерпретирующего концептуального каркаса семиотической когнитивной карты.

Итак, задана когнитивная карта семиотического типа кортежем (5). Знания о предметной области W, которые в общей постановке определены как множество правил продукций, аппроксимируются линейными зависимостями и представляются матрицей смежности W, $w_{ij} \in W$, $w_{ij} \in [-1, 1]$, элементы которой есть коэффициенты линейной зависимости значений признаков.

В качестве правила вывода для вычисления прогнозов развития ситуаций применяют метод независимого вычисления положительных и отрицательных влияний в когнитивной карте с помощью положительно определенной матрицы смежности [11]. Матрица смежности $W_{n\times n}$, $w_{ij} \in W_{n\times n}$, $w_{ij} \in [-1, 1]$, представляется матрицей $W_{2n\times 2n}$ по правилу:

$$\text{если } w_{ij} > 0, \text{ то } w_{2i-12j-1} = w_{2i-12j} = w_{ij};$$

$$\text{если } w_{ij} < 0, \text{ то } w_{2i2j-1} = w_{2i-12j} = -w_{ij},$$

где $w_{2i-1,\,2j}$, $w_{2i,\,2j-1}$, $w_{2i-12j-1}$, $w_{2i2j} \in W_{2n\times 2n} \in [0, 1]$.

Входной вектор $Z(0)$ и вектор прогноза развития ситуации $Z(n)$ также имеют размерность $2n$, $(z_1, z_2, \ldots, z_{2i-1}, z_{2i}, \ldots, z_{2n-1}, z_{2n})$. Причем элементы

этого вектора с индексами $2i-1$ характеризуют отрицательное приращение признака, а элементы с индексами $2i$ — положительное [11].

В этом случае интервалы толерантности для каждого признака $\Delta_i = [z_i(0) - \varepsilon_i; z_i(0) + \varepsilon_i]$, определяющие содержание базового понятия, также будут представлены векторами размерности $2n$, т. е. вектор интервалов толерантности будем представлять в виде: $TL = (Tl_1, ..., Tl_i, ..., Tl_n)$, где $Tl_i = (\varepsilon_{2i-1}; \varepsilon_{2i})$, $\forall i$, $i = 1, ..., n$, где $\varepsilon_{2i-1} > 0$ — положительные и $\varepsilon_{2i} > 0$ — отрицательные отклонения до границы интервала толерантности признака i.

Для вычисления прогнозных значений приращений признаков применяется правило *max-product* [11]:

$$Z(t+1) = Z(t) \circ W,$$

где $\circ$ — правило вычисления элементов вектора прогноза — $z_i(t+1) = \max\limits_r z_r(t)\, w_{ri}$, $z_i(t+1) \in Z(t+1)$; $z_i(t) \in Z(t)$, $r = 1, 2, ..., n$.

Задача заключается в нахождении интерпретирующего концептуального каркаса предметной области $\langle d^{H^*}, (\{SS(d^{H^*})\}, \cap, \cup), V(d^{H^*})\rangle$ с учетом причинно-следственных зависимостей значений признаков, определенных правилами вывода $\langle W, Z(t+1)\rangle$.

Нахождение такого концептуального каркаса представлено в виде следующего алгоритма.

Шаг 1. Вычисляем транзитивное замыкание матрицы смежности $W_{2n\times 2n}$:

$$\hat{W} = \bigvee_{i=1}^{n} W^i.$$

Шаг 2. Вычисляем матрицу прогноза развития ситуации из соотношения $Z(n) = E_n\hat{W}$. Здесь E_n — единичная матрица, $e_{ii} = 1$, $e_{ii} \in E_n$, $Z(n)$ — матрица прогноза размерностью $2n\times 2n$. Строки матрицы $Z(n)$ определяют установившиеся значения всех признаков, по сути это прогноз $Z_i = (z_1, ..., z_n)$ при условии, что на i-й фактор будет подано приращение $z_i = 1$, т. е. в уравнении прогноза $Z(n) = Z(0)\circ\hat{W}$ начальный вектор $Z(0) = (0, ..., z_i, ..., 0)$, $\forall i$.

Шаг 3. В матрице прогнозе $Z(n)$ определяются все признаки, значения которых вышли за пределы области толерантности базового понятия. Для этого используется удвоенный вектор интервалов толерантности $TL = (Tl_1, ..., Tl_i, ..., Tl_n)$, $\forall i$. Получаем новую матрицу W^*, в которой представлены все признаки, установившиеся прогнозные значения которых вышли за пределы интервала толерантности. Это квадратная матрица, значения которой определяются с помощью правила:

$$w^*_{i2j-1} = \begin{cases} 1, \text{ если } z_{i2j-1} > \varepsilon_{2j-1}, \\ 0, \text{ если } z_{i2j-1} < \varepsilon_{2j-1}, \end{cases}$$

$$\text{и } w^*_{i2j} = \begin{cases} -1, \text{ если } z_{i2j} < \varepsilon_{2j}, \\ 0, \text{ если } z_{i2j} > \varepsilon_{2j}, \end{cases} \qquad (9)$$

где $\varepsilon_{2i-1}, \varepsilon_{2i} \in Tl_i$, $\forall i$.

Шаг 4. Определяем множество всех входных воздействий. Входные воздействия — это вектор $Z(0) = (e_1, ..., e_n)$, где $e_i \in \{-1, 0, 1\}$. По сути, элементы этого вектора принимают максимально возможные приращения значений, -1 и 1 — максимальные отрицательное (по модулю) и положительное приращения, 0 — отклонений нет. Определим множество всех возможных входных воздействий $Z^*(0) = \{Z_k(0)\}$, где $Z_k(0)$ — всевозможные векторы входных воздействий, $|Z^*(0)| = 3^N$, N — число признаков, $k = 1, ..., 3^N$.

Шаг 5. Вычисляем состояния понятийной системы по правилу:

$$Z^*_k = Z_k(0)\circ W^*,$$

где $Z_k(0)$ — вектор входных воздействий, Z^*_k — вектор, элементы которого принимают значения из множества $\{-1, 0, 1\}$, что отражает их выходы за пределы интервалов толерантности признаков. По сути, Z^*_k — это состояние понятийной системы, которое указывает на ту область семантического пространства, в которую система перейдет, если на ее вход подать начальный вектор $Z_k(0) \in Z^*(0)$.

Элементы вектора Z^*_k вычисляются по правилу агрегации следующим образом:

$$z^*_j = \mathop{\circ}_{r=1}^{n} z_r w^*_{rj}.$$

Правило вычисления значений z^*_j приведено в табл. 1. В первой строке и столбце представлены возможные значения произведения $z_r w^*_{rj}$, а на пересечении соответствующих строк и столбцов — значения элемента z^*_j вектора Z^*_k.

Операция $\circ$

$z_r w^*_{rj}$	1	0	−1
1	1	1	?
0	1	0	−1
−1	?	−1	−1

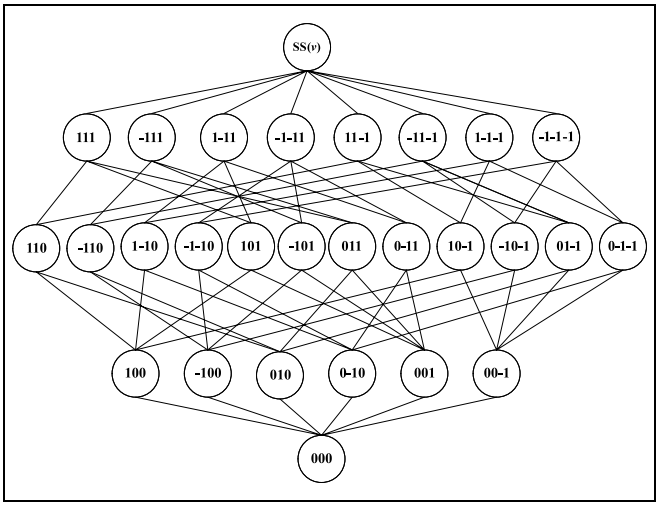

Рис. 11. Концептуальный каркас, не учитывающий зависимости признаков

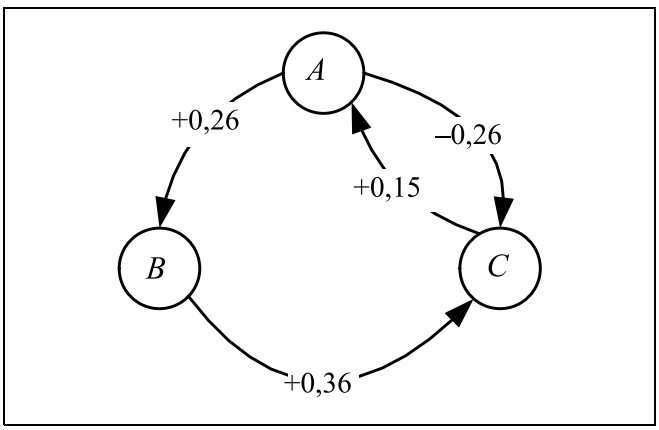

Рис. 12. Когнитивная карта

На пересечении разнополярных значений элементов агрегации z_r w^*_{rj} стоит знак «?». В этом случае возникает противоречие и, следовательно, определить значение элемента z^*_j невозможно.

Шаг 5 выполняется для всех входных векторов из множества $Z^*(0)$, полученных на шаге 4. Таким образом, в результате выполнения этого шага получаем множество векторов $Z^* = \{Z^*_k\}\ \forall k$. В множество Z^* не включаются вектора, содержащие хотя бы один противоречивый элемент, т. е. элемент со знаком «?».

Шаг 6. Определяется частичный порядок на множестве состояний понятийной системы Z^*, что позволяет представить его в виде диаграммы Хассе $(Z^*, \leq)$. По сути, это частично упорядоченное множество определит интерпретирующий концептуальный каркас предметной области, в которой была построена когнитивная карта.

Поясним рассмотренный алгоритм на примере.

Пример построения интерпретирующего концептуального каркаса предметной области семиотической когнитивной карты. Пусть известны три признака A, B и C некоторого объекта v, принадлежащего некоторой предметной области. Пусть известны области определения всех признаков $Z_A = Z_B = Z_C = [0, 1]$ и определен вектор значений признаков. Пусть объект определен точкой с координатами: $v = (0{,}5; 0{,}5; 0{,}5)$. Определен базовое понятие этого объекта, границы которого заданы интервалами $\Delta_A = [0{,}25; 0{,}75]$; $\Delta_B = [0{,}25; 0{,}75]$; $\Delta_C = [0{,}25; 0{,}75]$. Тогда содержание базового понятия $SS(d^0)$ определится из соотношения: $SS(d^0) = \Delta_A \times \Delta_B \times \Delta_C$.

Вектор, определяющий положительные и отрицательные отклонения от текущего положения до выхода значений за пределы интервалов толерантности Δ_A, Δ_B, Δ_C, $TL = (-0{,}25\ 0{,}25;\ -0{,}25\ 0{,}25;\ -0{,}25\ 0{,}25)$.

Если нет гипотез о возможных зависимостях между значениями признаков, то концептуальный каркас для этой когнитивной карты будет включать в себя $3^3 = 27$ элементов и иметь вид, показанный на рис. 11.

В вершинах диаграммы числами 1, −1 и 0 закодированы подпространства $SS(d^H)$. Например, значение в вершине 001 означает, что положительное обобщение получил только признак C и подпространство, определяющее содержание нового понятия, $SS(d^{001}) = \Delta_A \times \Delta_B \times [0{,}25; 1]$.

Пусть эксперт определил зависимости между значениями признаков. Эти зависимости выражены с помощью когнитивной карты, изображенной на рис. 12. Транзитивное замыкание $\hat{W}$, которое совпадает с матрицей прогнозов $Z(n)$, представлено в табл. 2. С учетом вектора толерантности Tl определим все значения признаков, которые в прогнозе вышли за пределы интервала толерантности, и получим новую матрицу транзитивного замыкания W^* по правилу (9) (табл. 3).

Таблица 2

Матрица прогнозов Z для когнитивной карты (см. рис. 14)

	$+A$	$-A$	$+B$	$-B$	$+C$	$-C$
A	0,014	−0,038	0,26	−0,010	0,095	−0,26
B	0,053	−0,002	0,014	−0,0005	0,36	−0,014
C	0,15	−0,006	0,039	−0,0015	0,014	−0,038

Таблица 3

Транзитивное замыкание матрицы смежности W*

	$+A$	$-A$	$+B$	$-B$	$+C$	$-C$
A	0	0	1	0	0	−1
B	0	0	0	0	1	0
C	0	0	0	0	0	0

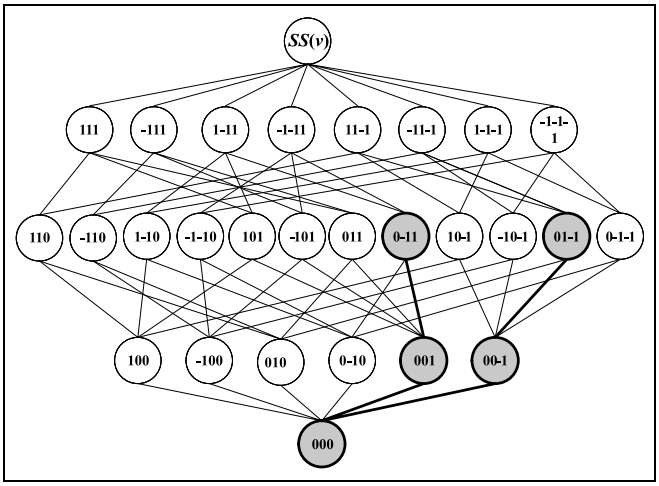

Рис. 13. Концептуальный каркас предметной области для когнитивной карты (см. рис. 10, *б*)

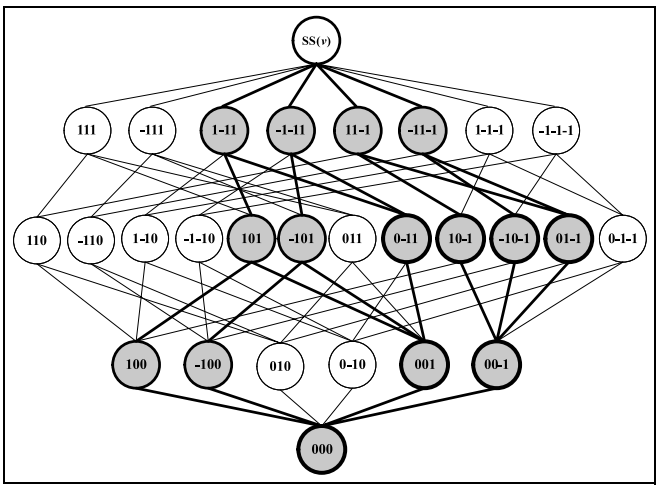

Рис. 14. Концептуальный каркас предметной области для измененной когнитивной карты

Множество всех возможных входных воздействий: $Z^*(0)$ = {100, −100, 010, 0 − 10, 001, 00 − 1, −110, 1 − 0, 101, −101, 011, 0 − 11, 10 − 1, −10−1, 01−1, 0−1−1, −111, 1−11, −11−1, 1−1−1, 110, −1−10, 111, −1−11, 11−1, −1−1−1}.

Отметим, что элементы подмножества входных воздействий: {001, 00−1, 101, −101, 011, 0−11, 10−1, −10−1, 01−1, 0−1−1}, последний, третий элемент которых ненулевой, можно не рассматривать, поскольку третья строка матрицы W^* нулевая и произведение $z_r w^*_{rj}$ всегда будет равно нулю, т. е. $z_r w^*_{rj} = 0$, так как $w^*_{rj} = 0$, $\forall j$.

Элементы подмножества входных воздействий {110, −1−10} дают противоречивые значения векторов состояний понятийной системы Z^*_k: 01?, 0—1?, и поэтому далее не рассматриваются.

Для всех оставшихся элементов входных воздействий $Z(0)$ по правилу агрегации получаем множество непротиворечивых векторов Z^*, характеризующих возможные состояния понятийной системы: Z^* = {01−1, 0−11, 001, 00−1, 0−11, 01−1}.

Диаграмма Хассе интерпретирующего концептуального каркаса для этой когнитивной карты (см. рис. 9, *а*) показана на рис. 13.

Рассмотрим еще один случай. Увеличим вес дуги из вершины C в вершину A от 0,15 до 0,45.

Прогноз развития ситуации, представленной матрицей $Z(n)$ и транзитивным замыканием матрицы смежности W^*, представлен в табл. 4. Матрица транзитивного замыкания W^* для этого случая представлена в табл. 5.

Множество входных воздействий: $Z^*(0)$ = {100, −100, 010, 0 − 10, 001, 00 − 1, − 110, 1 − 10, 101, − 101, 011, 0 − 11, 10 − 1, − 10 − 1, 01 − 1, 0 − 1− 1, − 111, 1 − 11, − 11 − 1, 1 − 1 − 1, 110, − 1− 10, 111, − 1 − 11, 11 − 1, − 1 − 1 − 1}.

Подмножество входных воздействий: {110, −1 − 10, 111, − 1 − 11, 11 − 1, − 1 − 1 − 1} приводят к противоречивым векторам состояний понятийной системы: {01?, 0 − 1?, 1 − 1?, 11?, − 11?, − 1 − 1?}.

Остальные элементы множества входных воздействий дают непротиворечивые состояния понятийной системы: Z^* = {100, − 100, 001, 00 − 1, 101, − 101, 0 − 11, 01 − 1, 1 − 11, − 1 − 11, 11 − 1, − 11 − 1}.

Диаграмма Хассе для когнитивной карты с измененными весами показана на рис. 14. ♦

Как видно из рассмотренного примера, изменения весов когнитивной карты приводят к изменениям интерпретирующего концептуального каркаса предметной области. Это обстоятельство может быть использовано в процессах интерпретации результатов моделирования, для верификации когнитивной карты и поддержки выработки решений для управления сложными ситуациями.

Таблица 4

Транзитивное замыкание измененной матрицы смежности

	$+A$	$-A$	$+B$	$-B$	$+C$	$-C$
A	0,040	−0,11	0,26	−0,029	0,095	−0,26
B	0,15	−0,017	0,040	−0,004	0,36	−0,039
C	0,43	−0,047	0,11	−0,012	0,040	−0,11

Таблица 5

Матрица *W для измененной когнитивной карты**

	$+A$	$-A$	$+B$	$-B$	$+C$	$-C$
A	0	0	1	0	0	−1
B	0	0	0	0	1	0
C	1	0	0	0	0	0

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определены и проанализированы основные проблемы применения методологии когнитивного моделирования для принятия решений в плохо определенных динамических ситуациях, а именно, проблема интерпретации результатов моделирования, полученных с помощью грубых субъективных моделей (когнитивных карт), и проблема верификации этих моделей.

В рамках существующего теоретического базиса решить эти проблемы не удается. Поэтому предложен иной теоретический базис когнитивного моделирования, основанный на принципах прикладной семиотики. В этом случае основным элементом для построения когнитивных карт служит знак, определенный тройкой треугольника Фреге: имя, смысл и значение для конкретных когнитивных карт.

Семиотическая когнитивная карта формально определена в семантическом пространстве предметной области как семиотическая система, имеющая имя, содержание, определенное подпространством семантического пространства предметной области, денотат — конкретную ситуацию реального мира и правила вывода, действующие в рамках содержания когнитивной карты.

Предложен метод структуризации семантического пространства на вложенные подпространства, которые образуют частично упорядоченное множество подпространств, определенных как знак: именем, содержанием, объемом и правилами вывода. Это множество подпространств называется качественным концептуальным каркасом предметной области и представляется как идеализированная качественная онтология этой области.

Показано, что в каждом подпространстве концептуального каркаса определена новая семиотическая когнитивная карта, которая является обобщением исходной когнитивной карты. Дано определение состояния семиотической когнитивной карты и определены правила смены ее состояний. Исследована зависимость структуры концептуального каркаса, определяющего родо-видовую структуру знаний о предметной области, от структуры когнитивной карты, определяющей множество причинно-следственных отношений между значениями признаков в этой предметной.

Предложен алгоритм построения интерпретирующего концептуального каркаса предметной области, направленного на поддержку процессов верификации и интерпретации причинно-следственных отношений в предметной области, заданных конкретной когнитивной картой.

Приведена абстрактная модель когнитивной карты семиотического типа, в которой строго определены содержания классов новых обобщенных состояний, но имена классов состояний и их объемов остаются не определенными. Она может стать теоретической основной нового класса систем поддержки принятия решений семиотического типа.

Имена и объемы обобщенных классов состояния могут быть определены экспертным путем или с помощью разработанных методов и алгоритмов.

Важная особенность такого класса систем поддержки принятия решений заключается в знаковом представлении результатов моделирования, что позволяет в процессах интерпретации результатов моделирования, верификации когнитивной карты, поиска управлений в качестве базы знаний для поддержки принятия решений использовать неструктурированные знания Интернет — семантического WEB'а, а также неструктурированных хранилищ знаний формата NO-SQL.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кулинич А.А.* Семиотические когнитивные карты. Ч. 1. Семиотический подход в информатике и управлении // Проблемы управления. — 2016. — № 1. — С. 2—10.
2. *Поспелов Д.А.* Ситуационное управление: теория и практика. — М.: Наука, 1986. — 288 с.
3. *Поспелов Д.А., Осипов Г.С.* Прикладная семиотика // Новости искусственного интеллекта. — 1999. — № 1. — С. 9—35.
4. *Психологический* словарь. — М.: Педагогика-Пресс, 1999. — 440 с.
5. *Келли Дж.* Теория личности. Психология личных конструктов. — СПб.: Речь, 2000. — 249 с.
6. *Shepard R.N.* Metric structures in ordinal data // Journal of Math. Psychol. — 1966. — Vol. 3, N 2.
7. *Петренко В.Ф.* Психосемантика сознания. — М.: Изд-во МГУ, 1988. — 207 с.
8. *Терехина А.Ю.* Методы многомерного шкалирования и визуализации данных // Автоматика и телемеханика. — 1973. — № 7. — С. 86—94.
9. *Кулинич А.А.* Компьютерные системы моделирования когнитивных карт: подходы и методы // Проблемы управления. — 2010. — № 3. — С. 2—16.
10. *Кулинич А.А.* Концептуальные каркасы онтологий слабо структурированных предметных областей // Искусственный интеллект и принятие решений. — 2014. — № 4. — С. 31—41.
11. *Силов В.Б.* Принятие стратегических решений в нечеткой обстановке. — М.: ИНПРО-РЕС, 1995. — 228 с.

Статья представлена к публикации членом редколлегии чл.-корр. РАН Д.А. Новиковым.

Кулинич Александр Алексеевич — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва,
✉ kulinich@ipu.ru.