

# ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ ПОДДЕРЖКИ УПРАВЛЯЮЩИХ РЕШЕНИЙ И СОЗДАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ

О.П. Кузнецов

Рассмотрены результаты, полученные в Институте проблем управления РАН в области интеллектуализации методов управления. Главное внимание уделено методам поддержки управляющих решений в слабоструктурированных ситуациях на основе когнитивных карт. Описаны основные когнитивные модели: линейные и нечеткие модели, сформулированы задачи анализа слабоструктурированных ситуаций на основе этих моделей, даны краткие характеристики методов их решения и программных технологий, разработанных на основе этих методов.

**Ключевые слова:** поддержка управляющих решений, слабоструктурированные ситуации, линейные когнитивные карты, нечеткие когнитивные карты, интеллектуальные технологии.

## ВВЕДЕНИЕ

Настоящая статья содержит обзор результатов, полученных в Институте проблем управления РАН в области интеллектуализации методов управления. Объем статьи не позволяет подробно описать научное содержание проведенных исследований и дать исчерпывающую библиографию. Будет дана краткая характеристика основных направлений, постановок задач, подходов к их решению и полученных результатов. Эти результаты относятся главным образом к методам и технологиям поддержки управляющих решений в слабоструктурированных ситуациях на основе когнитивных карт. Поэтому в статье им будет уделено основное внимание.

### 1. 1960 — 1970-е гг. — ПЕРВЫЕ РАБОТЫ ПО ИСКУССТВЕННОМУ ИНТЕЛЛЕКТУ

Первые работы в области искусственного интеллекта появились в ИПУ в связи с проблемой машинного понимания естественного языка. В них была выдвинута идея создания такого исчисления, которое могло бы лечь в основу формализма для интерпретации естественного языка. Эти работы докладывались на международных конференциях и публиковались в зарубежных изданиях [1, 2].

Продолжение работ с пониманием естественного языка было связано с появлением общесо-

юзного проекта «Диалог», одним из инициаторов которого был Л.И. Микулич. Проект представлял общественное объединение программистов, лингвистов и психологов и функционировал на протяжении 15 лет в рамках Научного совета по искусственному интеллекту Комитета по системному анализу при Президиуме АН СССР. К этому моменту появились первые практические результаты, показавшие возможность создания вопросно-ответных систем, использующих естественно-языковой интерфейс [3, 4]. Все эти системы могли работать с предметно-ограниченным естественным языком, который впоследствии А.П. Ершов назвал «языком деловой прозы».

Главная идея, положенная в основу семейства таких систем (известных под именем ДИСПУТ), заключалась в выборе примата прагматики перед всеми остальными стадиями анализа естественного языка: морфологией, синтаксисом и семантикой [5, 6]. Предлагалось сначала задавать весь предметно-ориентированный словарь вместе с онтологией задач и только потом приступать к синтаксическому и морфологическому анализу. При узко ограниченной предметной области и сравнительно небольшом словаре надобность в полном морфологическом и частично синтаксическом анализе отпадала, что положительно сказывалось на скорости реакции системы.

До начала 1990-х гг. работы по искусственному интеллекту в ИПУ носили локальный характер.





Серьезный фронт таких исследований возник в 1990-х гг., когда была поставлена проблема управления в слабоструктурированных ситуациях. В этой области, работы в которой продолжаются и в настоящее время, сотрудники Института проблем управления занимают ведущие позиции среди российских исследователей.

## 2. УПРАВЛЕНИЕ В СЛАБОСТРУКТУРИРОВАННЫХ СИТУАЦИЯХ: ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧ

Среди задач управления в сферах, связанных с жизнью общества (социально-экономической, организационной, политической и других сферах), наиболее сложными являются комплексные задачи, цель которых — изменить в желаемую сторону положение дел в целом. В этом случае объектом управления является вся проблемная область, которая рассматривается как *динамическая ситуация*, состоящая из множества разнородных взаимодействующих факторов. Некоторые из этих факторов напрямую зависят от решений ЛПР (лица, принимающего решение), другие зависят от ЛПР косвенно (через цепочки других факторов), третьи не зависят от ЛПР вовсе и рассматриваются как внешние возмущения (такие как неблагоприятные погодные явления, виды на урожай, изменения в законодательстве, действия конкурентов и др.). Динамика ситуации выражается в том, что ситуация изменяется с течением времени под влиянием действий ЛПР, внешних возмущений и влияний одних факторов ситуации на другие.

При попытках использования информационных технологий для решения таких задач, как правило, приходится сталкиваться с тем, что — в отличие от большинства технических систем — объект управления (т. е. ситуация) не только не формализован, но и слабо структурирован. Это выражается в следующем.

- Система понятий (факторов) и связей между ними не определена с достаточной полнотой. Разумеется, основные факторы известны, однако многие факторы, связи и параметры выясняются только в процессе постановки задачи.
- Основные параметры ситуации (значения факторов, степень влияния одних факторов на другие) — после того, как они будут выделены — являются не количественными, а качественными, т. е. представляют собой не числа, а либо интервалы, характеризующие точность оценки, либо нечеткие величины, либо вербальные (лингвистические) оценки, образующие линейно упорядоченную шкалу.
- Значения параметров ситуации получены в основном не на основе объективных измерений, а путем опроса экспертов, и потому представляют собой их субъективные оценки. Это относится и к

тем факторам и связям, которые могут быть выражены количественно в результате обработки данных экономической статистики, социологических опросов и т. д., поскольку одни и те же факторы разными источниками оцениваются по-разному. Соответственно, окончательные значения параметров, вносимые экспертом в модель, являются результатом его личной субъективной обработки этих данных, включающей в себя выбор одной из оценок (или их взвешенную свертку), учет достоверности данных, репутацию источника и др.

- Заранее сформулированные альтернативы в такого рода ситуациях отсутствуют; они возникают в процессе их анализа.

Указанные обстоятельства не позволяют при принятии решений в слабоструктурированных предметных областях применять подходы имитационного моделирования, ориентированные на использование количественных объективных оценок, методов традиционной теории принятия решений, опирающейся на методы выбора лучшей альтернативы из множества четко сформулированных альтернатив [7]. Материал, на основе которого принимаются решения в таких областях, неизбежно содержит существенную долю качественных, нечетких, субъективно оцененных данных и по существу является представлением знаний эксперта (или группы экспертов) о ситуации, описывающей проблемную область.

Подход к анализу слабоструктурированных проблемных областей, учитывающий их особенности, сформировался в последние десятилетия. Он основан на понятии *когнитивной карты* и обычно называется когнитивным анализом ситуаций или когнитивным моделированием. Поскольку термин «когнитивное моделирование» в настоящее время связывается в основном с моделированием когнитивных процессов мозга, в дальнейшем мы будем употреблять термин *когнитивный анализ ситуаций*.

*Когнитивная карта* — это ориентированный граф, ребрам (и, быть может, вершинам) которого поставлены в соответствие веса. Она задается матрицей смежности  $W = [w_{ij}]_{n \times n}$ , где  $n$  — число вершин,  $w_{ij}$  — вес ребра  $(i, j)$ ;  $w_{ij} = 0$  означает, что ребро  $(i, j)$  отсутствует. Вершины  $C_i$  когнитивной карты соответствуют *факторам (концептам)*<sup>1</sup>, определяющим ситуацию, ориентированные ребра — причинно-следственным (каузальным) связям между факторами. Веса ребер графа выражают силу влияния факторов. Кроме того, веса ребер имеют знак «+» или «-», т. е. могут быть положительными или отрицательными. Положительный вес означает, что увеличение значения фактора-причины приводит к увеличению значения фактора-следствия;

<sup>1</sup> В зарубежной литературе наиболее употребителен термин «концепт».



отрицательный вес означает, что увеличение значения фактора-причины приводит к уменьшению значения фактора-следствия. Различные интерпретации вершин, ребер и весов на ребрах, а также различные функции, определяющие влияние связей на факторы (функции агрегации), приводят к различным моделям (модификациям когнитивных карт) и средствам их анализа.

Выбор модели в значительной мере зависит от задач анализа, которые предстоит решать будущим пользователям. Задачи анализа ситуаций на основе когнитивных карт можно разделить на два типа: *статические* и *динамические*. Им соответствуют два типа моделей. *Статический анализ*, или *анализ влияний*, — это анализ текущей ситуации, заключающийся в выделении и сопоставлении каузальных цепочек — путей влияния одних факторов на другие через третьи. *Динамический анализ* — это генерация и анализ возможных сценариев развития ситуации во времени. В обоих случаях цель анализа состоит в формировании возможных альтернатив управляющих решений. Такими альтернативами служат множества управляющих факторов, т. е. факторов, на изменение которых ЛПР может непосредственно влиять.

При постановке задач управления на когнитивной карте используются следующие понятия. *Управляющие факторы* — это факторы, значения которых ЛПР может изменять. Цель управления — достижение определенных значений некоторых выделенных факторов, которые называются *целевыми факторами*. *Внешние, или входные, факторы* — это факторы, на которые не влияют другие факторы когнитивной карты.

Анализ влияний выделяет факторы с наиболее сильным влиянием на целевые факторы, т. е. позволяет определить наиболее эффективные точки приложения управляющих воздействий. Динамический анализ рассматривает развитие ситуации как смену ее состояний в дискретном времени, причем под состоянием ситуации  $X(t)$  в момент  $t$  понимается набор значений всех ее факторов  $(x_1(t), \dots, x_n(t))$  в этот момент. В динамическом анализе решаются две основные задачи. *Прямая задача* — это прогноз развития ситуации при заданных управляющих или внешних воздействиях (изменении значений некоторых управляющих или внешних факторов), т. е. вычисление последовательности  $X(1), X(2), \dots, X(n)$  при заданном изменении состояния  $X(0)$ . *Обратная задача* — вычисление управляющих воздействий, приводящих ситуацию в заданное состояние (например, в состояние, где целевые факторы имеют желаемые значения или близкие к ним).

Можно выделить следующие основные направления в управлении слабо структурированными ситуациями на основе когнитивного подхода.

- Разработка методов анализа когнитивных карт и основанных на них методов поддержки принятия решений.
- Разработка методик структуризации проблемной области, т. е. методик составления когнитивных карт.
- Создание инструментальных средств и информационных технологий, реализующих разработанные методы.

Далее будут кратко охарактеризованы основные результаты, полученные в Институте проблем управления по указанным направлениям.

### 3. МЕТОДЫ АНАЛИЗА КОГНИТИВНЫХ КАРТ

Различные интерпретации вершин, ребер и весов на ребрах, а также различные функции, определяющие влияние связей на факторы, приводят к различным моделям когнитивных карт и средствам их анализа. Наиболее распространенные классы моделей — знаковые графы, линейные модели и нечеткие когнитивные карты.

#### 3.1. Знаковые графы

Основные свойства знаковых графов подробно описаны в известной книге Робертса [8]. *Знаковый граф* — это граф, ребра которого имеют веса  $+1$  или  $-1$ , обозначаемые знаками « $+$ » и « $-$ ». Первый из них означает положительное, второй — отрицательное влияние. Вес пути равен произведению весов его ребер, т. е. положителен, если число отрицательных ребер в нем четно, и отрицателен, если это число нечетно. Если же от вершины  $v_i$  к вершине  $v_j$  ведут как положительные, так и отрицательные пути, то характер суммарного влияния фактора  $v_i$  на фактор  $v_j$  остается неопределенным.

Задача о вычислении влияний определяется так.

*Непрямое влияние*  $I_P$  фактора  $v_i$  на фактор  $v_j$  через путь  $P$ , идущий из  $v_i$  в  $v_j$ , определяется соотношением

$$I_P = \prod_{(k, l) \in E(P)} w_{kl},$$

где  $E(P)$  — множество ребер пути  $P$  и  $w_{kl}$  — вес (знак) ребра  $(k, l)$  в пути  $P$ .

*Суммарное влияние*  $T(i, j)$  равно  $+1$ , если все  $I_P > 0$ , и равно  $-1$ , если все  $I_P < 0$ .

Одна из задач анализа знакового графа заключается в анализе его циклов.

Положительный цикл — это контур положительной обратной связи; если факторам приданы некоторые значения, то увеличение значения фактора в цикле ведет к его дальнейшему увеличению и, в конечном счете, неограниченному росту, т. е. к потере устойчивости. Отрицательный цикл противодействует отклонениям от начального состояния и способствует устойчивости, однако возмож-



на неустойчивость в виде значительных колебаний, возникающих при прохождении возбуждения по циклу.

Первые работы в ИПУ по анализу когнитивных карт касались именно знаковых графов. Работа [9] посвящена применению знаковых графов для анализа устойчивости социально-экономических систем. В работе [10] исследовались структурные свойства знаковых графов. Была разработана методика анализа структуры ориентированных знаковых графов и предложены эвристические оценки значимости элементов графа, позволяющие верифицировать веса графа и степени предпочтения факторов, рассматриваемых в системе.

Основной недостаток знаковых моделей — это отсутствие учета силы влияния по разным ребрам и путям, а также отсутствие механизма разрешения неопределенностей при одновременном наличии положительных и отрицательных путей между двумя вершинами. Основной подход к их устранению заключается во введении весов, характеризующих силу влияния, что приводит к линейным или нечетким моделям.

### 3.2. Линейные модели

Линейные модели и их свойства также подробно описаны в книге [8]. Вычисление их поведения связано с понятием *приращения*  $p_i(t+1) = x_i(t+1) - x_i(t)$  значения фактора  $v_i$ , которое в линейных моделях принято называть *импульсом*. Приращение вычисляется по формуле

$$p_i(t+1) = \sum_{i \in I} w_{ij} p_i(t),$$

где  $I$  — множество всех вершин, из которых ведут ребра в вершину  $v_j$ .

Одна из важнейших характеристик линейной модели — *устойчивость*. Вершина  $v_i$  называется *импульсно устойчивой*, если ее импульс ограничен, т. е. существует положительное число  $B$ , такое, что  $|p_i(t+1)| < B$  для всех  $t$ . Вершина  $v_i$  называется *абсолютно устойчивой*, если ее значение  $x_i(t)$  ограничено. Граф называется *импульсно (абсолютно) устойчивым*, если все его вершины устойчивы в соответствующем смысле. Исследование устойчивости проводится в терминах собственных значений матрицы смежности графа. Показано, что граф импульсно неустойчив, если существует собственное значение, превосходящее 1, и абсолютно устойчив тогда и только тогда, когда он импульсно устойчив для любого импульсного процесса и среди собственных значений нет равного 1 [8].

Исследованиям линейных моделей посвящены работы [11, 12]. В частности, в работе [11] предложено два метода стабилизации неустойчивого графа. Первый из них заключается в изменении матриц смежности (введении или удалении ребер) сильно

связных компонентов графа. Сформулированы допущения, при которых задача стабилизации разрешима. Второй метод заключается в построении дополнительного «графа-регулятора», замыкающего обратной связью выходы и входы исходного графа.

В последние годы интерес к линейным моделям связан с постановкой новой проблемы — *игра на когнитивных картах* [13, 14]. В этой постановке «динамика факторов описывается когнитивной картой, причем эта динамика зависит от действий активных субъектов, имеющих, с одной стороны, возможность так или иначе влиять на факторы, а, с другой стороны, заинтересованных в определенных значениях этих факторов» [13].

Недостаток линейных моделей, существенный для приложений, состоит в их «жесткости», т. е. необходимости задавать веса в виде точных числовых значений, тогда как главная особенность слабоструктурированных ситуаций состоит как раз в невозможности получать достоверные числовые оценки весов. Поэтому более адекватной альтернативой линейным моделям служат нечеткие модели.

### 3.3. Нечеткие модели

Нечеткие когнитивные карты были предложены Б. Коско [15]. В них силы влияния между факторами задаются либо в виде числовых значений из интервала  $[-1, 1]$ , либо в виде значений, выбранных из лингвистической шкалы (линейно упорядоченного множества лингвистических значений, описывающих возможные силы влияний). Значения факторов также задаются в лингвистическом виде.

Пусть  $v_{j1}, \dots, v_{jk}$  — множество всех факторов, входных для фактора  $v_i$  (т. е. начальных вершин ребер, входящих в  $v_i$ ). Тогда в общем случае значение  $x_i$  в момент  $t+1$  зависит от значений входных факторов в момент  $t$  и весов ребер, соединяющих эти факторы с фактором  $v_i$ :

$$x_i(t+1) = f_i(x_{j1}(t), \dots, x_{jk}(t), w_{j1,i}, \dots, w_{jk,i}). \quad (1)$$

Выбор функций  $f_i$  (*функций влияния, или функций агрегации*), которые в общем случае могут быть различными для разных вершин, определяет конкретную модель. В приложениях обычно рассматривается более простой случай, когда эти функции для всех факторов одинаковы. Это позволяет для решения задач анализа ситуаций применять матричные методы. Такие модели в дальнейшем будем называть однородными. Краткий обзор основных моделей для статических задач приведен в обзоре [16]. Основное внимание исследователей ИПУ направлено на однородную динамическую модель, основанную на приращениях. Она задается следующим образом.



Фактору  $v_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) соответствует переменная  $y_i(t)$ , принимающая лингвистические значения. Множество таких значений линейно упорядочено и образует лингвистическую шкалу  $Z_i = \{z_{i1}, z_{i2}, \dots, z_{ir}\}$ , где  $z_{i1}$  и  $z_{ir}$  — минимальный и максимальный элементы множества, а из  $k < l$  следует  $z_{ik} < z_{il}$ . В общем случае у каждого фактора — своя лингвистическая шкала, число элементов  $r$  которой определяется экспертным путем.

Вектор  $Y(t) = (y_1(t), \dots, y_n(t))$  называется *состоянием ситуации* в момент  $t$ .

Веса ребер — числовые и лежат на отрезке  $[-1, 1]$ . Они задаются матрицей смежности  $W = \|w_{ij}\|$ :  $w_{ij}$  — вес ребра  $(v_i, v_j)$ , если  $w_{ij} \neq 0$ ; ребро  $(v_i, v_j)$  отсутствует, если  $w_{ij} = 0$ . Значение веса  $w_{ij}$  характеризует силу влияния фактора  $v_i$  на фактор  $v_j$ , знак веса — характер влияния (положительное или отрицательное).

Для удобства вычислений определим отображение  $\varphi$  лингвистических шкал факторов на числовой отрезок  $[0, 1]$  следующим образом. Для лингвистической шкалы  $Z_i = \{z_{i1}, z_{i2}, \dots, z_{ir}\}$  разобьем отрезок  $[0, 1]$  на  $r$  равных отрезков, границы которых обозначим в порядке возрастания  $b_0 = 0, b_1, \dots, b_{r-1}, b_r = 1$ . Положим  $\varphi(z_{ik}) = (b_{k-1} - b_k)/2$  (элемент  $z_{ik}$  отображается в центр  $k$ -го отрезка).

Отображение  $\varphi: Z_i \rightarrow [0, 1]$  позволяет алгоритмы модели сделать числовыми. Обратное отображение  $\varphi^{-1}: [0, 1] \rightarrow Z_i$  является гомоморфизмом: точки, лежащие в интервале  $(b_{k-1}, b_k)$ , отобразятся в одну точку  $z_{ik}$ . С помощью отображения  $\varphi$  состояние ситуации представляется в числовом виде:  $X(t) = \varphi(Y(t)) = (\varphi(y_1(t)), \dots, \varphi(y_n(t)))$ . Приращение значения фактора  $v_i$  в момент  $t + 1$  — это величина  $p_i(t + 1) = x_i(t + 1) - x_i(t)$ . Приращения могут быть отрицательными, поэтому значения  $p_i$  лежат на отрезке  $[-1, 1]$ . Вектор приращений  $p_1(t), \dots, p_n(t)$  в момент  $t$  обозначим через  $P(t)$ .

Прямая задача (прогноз развития ситуации при заданном начальном приращении), т. е. вычисление последовательностей  $X(1), \dots, X(t), \dots$  и  $P(1), \dots, P(t), \dots$  решается с помощью матричного соотношения:  $P(t + 1) = P(t) \circ W$ , где  $\circ$  — правило max-product:  $p_i(t + 1) = \max_j (|p_j(t) \cdot w_{ji}|)$ .

Таким образом, приращение  $p_i(t + 1)$  — это максимальная из величин  $|p_j(t) \cdot w_{ji}|$ , где максимум берется по всем факторам, входным для фактора  $v_i$  (для остальных факторов  $w_{ji} = 0$ ).

При получении прогноза наряду с вычислением вектора  $P(t + 1)$  вычисляется вектор  $C = \{c_1(t + 1), \dots, c_n(t + 1)\}$ . Величина  $c_i(t + 1)$  называется *консонанс*

*сом*<sup>2</sup> фактора  $v_i$  и определяется следующим образом.

Обозначим через  $p_i^+(t + 1)$  максимум положительных приращений, поступающих на вход фактора  $v_i$ ; т. е.  $p_i^+(t + 1) = \max_j (p_j(t) \cdot w_{ji}), p_j(t) \cdot w_{ji} \geq 0$ . Аналогично,  $p_i^-(t + 1)$  — максимум абсолютных величин отрицательных приращений, поступающих на вход фактора  $v_i$ ; т. е.  $p_i^-(t + 1) = \max_j (|p_j(t) \cdot w_{ji}|), p_j(t) \cdot w_{ji} < 0$ . Тогда

$$c_i(t + 1) = \frac{|p_i^+(t + 1) + p_i^-(t + 1)|}{|p_i^+(t + 1)| + |p_i^-(t + 1)|}.$$

Консонанс  $c_i(t + 1)$  характеризует степень определенности прогноза на момент  $t + 1$ . Он равен 1, если знаки всех входных приращений одинаковы, и равен 0, если  $p_i^+(t + 1) = p_i^-(t + 1)$ .

Таким образом, правдоподобный прогноз развития ситуации к моменту  $t + 1$  определяется парой:  $\langle X(t + 1), C(t + 1) \rangle$ , где  $X(t + 1)$  — вектор значений факторов ситуации в момент  $t + 1$ ,  $C(t + 1)$  — вектор консонанса в момент  $t + 1$ .

Выбор различных управляющих воздействий (приращений управляющих факторов в начальный момент) приводит к различным прогнозам, т. е. к различным сценариям развития ситуации. Эти сценарии образуют множество альтернатив управляющих решений. Для принятия решений необходимо их оценить в смысле предпочтений ЛПР. Информация о таких предпочтениях лежит за пределами когнитивной модели. Поэтому возникает задача построения интегрированной модели, в которой информация о сценариях была бы объединена с описанием предпочтений ЛПР. Решение этой задачи было предложено в работах [20, 21]. В ней предпочтения ЛПР представляются моделью иерархического оценивания Т. Саати [22]. Предложен метод отображения шкал подмножества  $V^*$  факторов когнитивной карты, существенных для оценивания, в шкалы листовых критериев оценочной иерархии, в результате которого значения  $x_{ij}^*(n)$  факторов из множества  $V^*$  отображаются в значения  $\psi_j(x_{ij}^*(n))$  соответствующих листовых

<sup>2</sup> Пара понятий «консонанс — диссонанс» была введена известным психологом Л. Фестингером [17]. *Диссонанс* по Фестингеру — это ощущаемое человеком противоречие в его системе знаний, мешающее ему принять решение и вызывающее поэтому психологический дискомфорт. *Консонанс* — это отсутствие диссонанса. В анализ когнитивных карт понятие консонанса, по-видимому, впервые введено в работе [18]; оно активно используется в книге Силова [19].



критериев. После этого альтернативы  $a_i$  оцениваются по формуле

$$F(a_i) = \sum_j \psi_j(x_{ij}^*(n)) \cdot u_j,$$

где  $u_j$  — вес  $j$ -го листового критерия, а суммирование ведется по всем факторам из множества  $V^*$ , и выбирается альтернатива с максимальной оценкой.

Кроме того, в работе [20] предложена параметрическая оценочная функция, позволяющая учесть в оценках неопределенность прогнозов развития ситуации, полученных с помощью когнитивной карты. Оценочная функция имеет вид:

$$\rho_i = \text{sign}(p_i) |p_i^\alpha| \cdot c_i^\beta.$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  — параметры,  $\alpha, \beta > 0$ ,  $p_i$  — прогнозное значение  $i$ -го фактора,  $c_i$  — степень неопределенности прогнозного значения  $p_i$  (консонанс значения фактора).

Выбор различных параметров  $\alpha$  и  $\beta$  позволяет моделировать различные экспертные предпочтения. Например, чем меньше  $\beta$ , тем меньшую роль в экспертной оценке играет консонанс, т. е. тем меньшее значение придает эксперт точности прогноза.

В работах [23—25] показано, что обратная задача для системы нечетких уравнений (описывающих когнитивную карту) с операцией max-product эквивалентна задаче покрытия и, поэтому, является NP-трудной.

Более точно, рассматривается система уравнений  $S$  следующего вида:

$$x_1 \cdot a_{11} \vee \dots \vee x_i \cdot a_{i1} \vee \dots \vee x_m \cdot a_{m1} = b_1, \quad (s_1)$$

$$\dots$$

$$x_1 \cdot a_{1j} \vee \dots \vee x_i \cdot a_{ij} \vee \dots \vee x_m \cdot a_{mj} = b_j, \quad (s_j)$$

$$\dots$$

$$x_1 \cdot a_{1n} \vee \dots \vee x_i \cdot a_{in} \vee \dots \vee x_m \cdot a_{mn} = b_n, \quad (s_n)$$

где  $x_i, a_{ij}$  и  $b_j \in [0, 1]$ , а знак  $\vee$  означает взятие максимума. Переменная  $x_i$  называется *существенной*, если  $b_j/a_{ij} \leq 1$  хотя бы для одного  $s_j$ , и *несущественной*, если  $b_j/a_{ij} > 1$  для всех  $s_j$ .

Сведение решения этой системы к задаче покрытия связано с распределением в ней так называемых базовых значений переменных. *Базовым значением* существенной переменной  $x_i$  называется величина  $\hat{x}_i = \min_{x_i \in s_j} (b_j/a_{ij})$ . Базовое значение  $\hat{x}_i$

принадлежит уравнению  $s_j$ , если  $\hat{x}_i = b_j/a_{ij}$  (т. е. минимум достигается на данном уравнении). Базовое значение  $\hat{x}_i$  может принадлежать нескольким уравнениям и, наоборот, уравнение  $s_j$  может содержать базовые значения различных переменных.

Показано, что множество решений системы  $S$  соответствует множеству покрытий таблицы  $T$ , строки  $t_j$  которой соответствуют уравнениям  $s_j$ , а

столбцы  $t^i$  — переменным  $x_i$ . Элемент  $t_{ij}^j$  таблицы  $T$ , расположенный на пересечении строки  $t_j$  и столбца  $t^i$ , равен единице, если базовое значение  $\hat{x}_i$  принадлежит уравнению  $s_j$  и нулю в противном случае. Максимальному решению системы  $S$  соответствует максимальное покрытие таблицы  $T$ , а минимальным решениям соответствуют безызбыточные покрытия таблицы  $T$ .

В работах [23—25] рассмотрены приемы упрощения таблицы  $T$ , не изменяющие множества решений, что позволяет понизить трудоемкость решения конкретных задач. Рассмотрены методы нахождения безызбыточных покрытий таблицы  $T$ .

В работе [26] рассмотрены динамические качественные карты, в которых состояние каждого фактора определяется качественной шкалой — упорядоченным набором символических значений. Вводится «естественная» целочисленная метрика, в которой расстояние между качественными значениями равно числу значений шкалы, заключенных между ними. Это позволяет ввести в шкале понятие приращений и операций над ними с учетом конечной размерности шкалы.

Допускается использование промежуточных значений шкалы, которые, однако, не локализируются точно. Промежуточное значение определяется парой коэффициентов уверенности, с которой оно может быть соотнесено с соседними значениями шкалы.

Влияния факторов друг на друга выражаются функциями, отображающими качественную шкалу одного фактора в качественную шкалу другого фактора. Шкалы, для которых определение функций влияния возможно без использования промежуточных значений, считаются согласованными. В противном случае они называются несогласованными.

Несогласованность функций влияния, а также конфликты влияний факторов друг на друга приводят к необходимости рассматривать размытые качественные значения факторов. Размытое значение — это совокупность нескольких значений качественной шкалы, каждое из которых обладает своей степенью (оценкой) уверенности. Сформулированы требования к такой оценке и на их основе выбрана оценка, выражающая степень консолидации компонент размытого значения вокруг его естественного центра. Этот центр может считаться наилучшим дефазификатором размытого значения.

#### 4. МЕТОДЫ СТРУКТУРИРОВАНИЯ ПРОБЛЕМНЫХ СИТУАЦИЙ, МЕТОДИКИ СОСТАВЛЕНИЯ И ВЕРИФИКАЦИИ КОГНИТИВНЫХ КАРТ

Работе с когнитивными картами предшествует процесс их составления. Очевидно, что этот процесс не может быть до конца формализован и в



значительной степени субъективен. С другой стороны, его можно рассматривать как процесс извлечения знаний из эксперта, результаты которого представляются в виде когнитивной карты. Составляющие этого процесса — построение понятийной структуры предметной области (выявление основных факторов и связей между ними), выбор функций агрегации, построение лингвистических шкал (для нечетких карт) и назначение весов ребер.

В работе [27] рассматривается проблема построения понятийной структуры предметной области. Эта структура строится как решетка понятий, основанная на отношении включения понятий по содержанию: понятие *A* включено в понятие *B*, если множество признаков понятия *B* содержится в множестве признаков понятия *A*. В этом случае понятие *B* является более общим, чем понятие *A*. Удаление признаков из понятия приводит к получению более общих понятий, а добавление признаков дает более конкретные понятия. Таким образом, из исходных понятий постепенно строится «понятийный каркас» предметной области. Такая структура оказывается, в частности, полезной при интерпретации результатов анализа когнитивной карты, поскольку она позволяет «свернуть» результаты анализа, полученные в терминах конкретных факторов, выразив их в терминах более общих понятий.

Одним из средств верификации когнитивной карты, т. е. установления ее адекватности предметной области, служит построение объяснений получаемых прогнозов развития ситуации. В работах [28, 29] исследованы вопросы получения объяснений прогнозов в виде трассы движения по дереву вывода. Предложен метод построения объясняющих цепочек, основанный на использовании матрицы прогноза развития ситуации и позволяющий значительно сократить время получения объяснения для любого фактора ситуации при заданном множестве входных факторов.

Технологии построения когнитивных карт для конкретных прикладных задач, относящихся к социально-экономическим проблемам, и связанные с их применением методические вопросы рассмотрены в работах [30–35].

В работе [36] предложен еще один подход (наряду с описанным выше иерархическим методом оценивания [20, 21]) к оценке управленческих стратегий, формируемых на основе анализа когнитивных карт — подход, использующий метод SWOT-анализа [37]. Этот метод заключается в выделении в когнитивной карте четырех групп факторов: с одной стороны, слабых и сильных сторон объекта управления, с другой — возможностей и угроз для объекта, идущих от внешней среды. Оценки управляющих решений производятся в терминах взаимодействия этих групп факторов: использования сильных сторон и объективных

возможностей, минимизации влияния угроз и слабостей объекта на развитие ситуации.

В работе [38] рассмотрены проблемы анализа рисков, которые возникают в результате ошибок экспертов при составлении когнитивных карт, приводящих к неадекватному моделированию реальной ситуации. В ней сделана попытка классификации наиболее типичных ошибок и методов их устранения.

В целом же проблемы верификации и адекватности когнитивных карт, особенно важные в приложениях, не могут быть до конца решены математическими методами. Очень многое зависит от опыта и компетентности экспертов, специфики предметной области. Многие ошибки и неадекватности можно выявить только в процессе эксплуатации когнитивной модели в реальной ситуации.

## 5. РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ

Первые интеллектуальные системы были разработаны в ИПУ в 1970-х гг. [3–6] и были связаны, как уже отмечалось в § 1, с проблемами понимания естественного языка. Со второй половины 1990-х гг. началось создание программных систем, реализующих описанный выше когнитивный подход к поддержке управляющих решений.

Методы анализа ситуаций и генерации управляющих решений на основе когнитивных карт довольно сложны в вычислительном отношении. Поэтому для карт, содержащих более десятка факторов, эти методы нуждаются в программной реализации. Разработка программных комплексов поддержки принятия решений на основе разработанных методов составляет важную часть проводимых работ.

Первыми разработками в этом направлении были программные комплексы «Компас» [39] и «Ситуация» [40]. В основе системы «Компас» лежит нечеткая когнитивная модель. Система «Ситуация» опирается на линейную модель. Дальнейшим развитием системы «Ситуация» стала система «Курс» [41], включающая в себя четыре взаимодействующих диалоговых комплекса «Ситуация-2», «Компас-2», КИТ, МИОС. Существенным развитием системы «Компас» стала система «Канва» [42].

Функциональные схемы этих систем примерно одинаковы. Все они содержат подсистему ввода когнитивной модели ситуации; подсистему обработки, включающую в себя методы решения прямой и обратной задач; подсистему представления результатов анализа и выдачи рекомендаций по принятию решений. Отличия — иногда существенные — заключаются в применении разных методов анализа ситуаций и оценки управляющих решений и в различных пользовательских сервисах, обеспечивающих общение пользователя с сис-



темой и способствующих правильной интерпретации результатов. Так, в системе «Канва»:

— подсистема ввода содержит графический интерфейс для ввода и редактирования нечеткой когнитивной модели ситуации в виде ориентированного знакового графа, блок ввода шкал и конкретных значений факторов и связей в режиме диалога с экспертом;

— подсистема обработки применяет методы анализа нечетких когнитивных карт, описанные в § 3;

— подсистема представления результатов выдает результаты моделирования в графическом и табличном виде, причем выдаются как вычисленные значения выбранных факторов, так и оценки консонанса, характеризующие степень уверенности в полученном прогнозе.

Кроме того, система содержит:

— подсистему объяснения прогноза, которая генерирует описание последовательных шагов получения прогнозного значения любого фактора ситуации, причем это описание включает в себя как положительные, так и отрицательные пути влияния на заданный фактор;

— подсистему поддержки принятия решений, которая содержит средства поддержки сценарного исследования ситуации (ввод, редактирование, инициацию и просмотр сценариев, возникающих при различных управляющих воздействиях) и советующий блок, который в диалоговом режиме предлагает различные управляющие воздействия при заданном целевом факторе.

В аспекте компьютерной поддержки принятия решений к описанным системам примыкают методы и системы, описанные в работах [43—45], которые, впрочем, основаны на других моделях, и описанные здесь методы интеллектуализации в них не применяются.

Разработанные методы и информационные технологии нашли применение при решении задач управления регионами, выработки технической политики в различных областях народного хозяйства (в здравоохранении, транспорте, торговле и др.), ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций и других сферах.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Когнитивная карта — это модель представления знаний эксперта о ситуации. Эта модель отражает субъективное видение субъектом ситуации (отсюда термин «когнитивный»). Разные субъекты могут построить разные когнитивные карты одной и той же проблемной области, отличающиеся не только значениями и знаками весов, но и набором факторов. В этом смысле можно сказать, что когнитивные карты — всего лишь язык грубого, качественного описания ситуации. Когнитивный

анализ с некоторой уверенностью может обозначить возможные тенденции развития ситуации в результате тех или иных управляющих воздействий, выявить различные побочные эффекты, казалось бы, очевидных решений, однако в принципе не способен дать гарантированные прогнозы. Об адекватности той или иной когнитивной модели можно судить только по результатам ее применения.

В заключение отметим некоторые актуальные направления дальнейшего развития когнитивного подхода:

— моделирование развития и управления развитием динамических ситуаций в условиях ограниченных ресурсов;

— моделирование конфликтных ситуаций, угроз и противодействия угрозам в терминах когнитивных карт;

— структурный анализ когнитивных карт: выявление нежелательных циклов, анализ устойчивости (т. е. робастности — нечувствительности к малым возмущениям) данной ситуации и др.;

— физическое время в когнитивных картах;

— неоднородные когнитивные карты (карты, в которых функции (1) для разных факторов могут быть различными) и методы их анализа;

— методики построения когнитивных карт с помощью типовых структур;

— исследование надежности прогнозирования в когнитивных моделях;

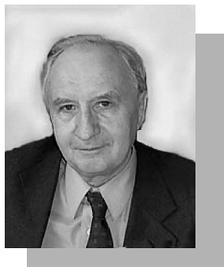
— прикладная адекватность различных моделей когнитивных карт в различных предметных областях.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Микулич Л.И., Червоненкис А.Я.* Об использовании формальных исчислений в диалоговых системах // Тр. IV Международ. объединенной конф. по искусственному интеллекту. — Тбилиси, 1975.
2. *Mikulich L.I., Chervonenkis A.Ya.* On the use of formal calculi in conversational natural language systems // *Firbush News*. — 1976. — N 7.
3. *Mikulich L.I.* Dialogue systems for information retrieval and logical inference // Тр. II междунар. югославской конф. «Информатика — 76». — Блед, Югославия, 1976.
4. *Микулич Л.И.* Диалоговая система для ведения непрерывного графика работы флота // «Планирование в транспортных системах: модели, методы, информационное обеспечение»: Сб. трудов ИПУ. 1978. — Вып. 17.
5. *Микулич Л.И., Червоненкис А.Я.* Диалоговая система ДИС-ПУТ: лингвистический и прагматический процессоры // Докл. II Междунар. совещания по искусственному интеллекту (Репино) / НС «Кибернетика». — М., 1980.
6. *Mikulich L.I.* Natural language dialogue systems: a pragmatic approach // In: «Machine intelligence: 10». — N.-Y.: J. Wiley, 1982.
7. *Ларичев О.И.* Наука и искусство принятия решений. — М.: Наука, 1979.
8. *Робертс Ф.С.* Дискретные математические модели с приложениями к социальным, биологическим и экологическим задачам / Пер. с англ. — М.: Наука, 1986.
9. *Кульба В.В., Миронов П.Б., Назаретов В.М.* Анализ устойчивости социально-экономических систем с использованием знаковых оргграфов // Автоматика и телемеханика. — 1993. — № 7.



10. Марковский А.В. Анализ структуры знаковых ориентированных графов // Изв. РАН. Теория и системы управления. — 1997. — № 5. — С. 144—149.
11. Корноушенко Е.К., Максимов В.И. Управление процессами в слабоформализованных средах при стабилизации графовых моделей среды // Тр. Ин-та проблем управления. — 1999. — Т. II. — С. 82—94.
12. Максимов В.И., Корноушенко Е.К. Аналитические основы применения когнитивного подхода при решении слабоструктурированных задач // Тр. Ин-та проблем управления. — 1999. — Т. II. — С. 95—109.
13. Новиков Д.А. «Когнитивные игры»: линейная импульсная модель // Проблемы управления. — 2008. — № 3. — С. 14—22.
14. Куливец С.Г. Игра на когнитивной карте с импульсным начальным управлением // III Всерос. молодежная конф. по проблемам управления (ВМКПУ'2008): Труды / Под ред. Д.А. Новикова, З.К. Авдеевой. — М.: ИПУ РАН, 2008. — С. 134—135.
15. Kosko B. Fuzzy Cognitive Maps // International Journal of Man-Machine Studies. — 1986. — 24. — P. 65—75.
16. Кузнецов О.П., Кулинич А.А., Марковский А.В. Анализ влияния при управлении слабо структурированными ситуациями на основе когнитивных карт // В сб.: Человеческий фактор в управлении. — М.: СИНТЕГ, 2006. — С. 330—362.
17. Фестингер Л. Теория когнитивного диссонанса. — СПб.: Ювента, 1999.
18. Sawaragi T., Iwai S, Katai O. An integration of qualitative causal knowledge for user-oriented decision support // Control Theory and Advanced Technology. — 1986. — Vol. 2. — P. 451—482.
19. Слов В.Б. Принятие стратегических решений в нечеткой обстановке. — М.: Инпро-Рес, 1995.
20. Поддержка принятия решений в слабо структурированных предметных областях. Анализ ситуаций и оценка альтернатив / А.Н. Аверкин, О.П. Кузнецов, А.А. Кулинич, Н.В. Титова // Изв. РАН. Теория и системы управления. — 2006. — № 3. — С. 139—149.
21. Кулинич А.А., Титова Н.В. Генерация и анализ альтернатив управления в слабоструктурированных ситуациях // Третья междунар. конф. по проблемам управления (20—22 июня 2006 г.): Пленарные доклады и избранные труды. — М.: ИПУ, 2006. — С. 298—304.
22. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Пер. с англ. — М.: Радио и связь, 1993.
23. Марковский А.В. О связи уравнений типа max-product с задачами о покрытии // Тр. ИПУ РАН. — Т. XX. — 2003. — С. 113—119.
24. Марковский А.В. О решении нечетких уравнений типа «max-product» в обратных задачах управления и принятия решений // Автоматика и телемеханика. — 2004. — № 9. — С. 149—159.
25. Markovskii A.V. On the relation between equations with max-product composition and covering problem // Fuzzy Sets and Systems. — 2005. — Vol. 153. — P. 261—273.
26. Markovskii A.V. Some models of dynamic cognitive maps with qualitative scales of factors values // Proc. of the 17th World Congress of IFAC. Seoul, Korea, July 6 — 11, 2008. — P. 695—699.
27. Кулинич А.А. Моделирование динамических процессов в понятийной системе субъекта для генерации креативных решений // Когнитивные исследования: Сб. науч. тр. / Под ред. В.Д. Соловьева. — 2006. — Вып. 1 — С. 94—123.
28. Кулинич А.А. Объяснения в системах моделирования когнитивных карт. Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте // Сб. тр. IV Междунар. конф. (Коломна, 28 — 30 мая 2007 г.) — М.: Физматлит, 2007. — Т. 2. — С. 483—490.
29. Кулинич А.А. Алгоритм объяснения прогнозов развития ситуации в качественных когнитивных картах // Тр. VII междунар. Конф. «Когнитивный анализ и управление развитием ситуации (CASC'2007)» / Под. ред. З.К. Авдеевой, С.В. Ковриги. — М.: ИПУ РАН, 2007. — С. 150—153.
30. Корноушенко Е.К., Максимов В.И. Управление ситуацией с использованием структурных свойств когнитивной карты // Тр. ИПУ РАН. — 2000. — Т. XI. — С. 85—90.
31. Коврига С.В., Максимов В.И. Технология когнитивного моделирования целенаправленного развития регионов РФ // Тр. ИПУ РАН. — С. 91—103.
32. Коврига С.В., Максимов В.И. Применение структурно-целевого анализа развития социально-экономических ситуаций // Проблемы управления. — 2005. — № 3. — С. 39—43.
33. Максимов В.И. Структурно-целевой анализ развития социально-экономических ситуаций // Там же. — 2007. — С. 30—38.
34. Авдеева З.К., Коврига С.В., Макаренко Д.И., Максимов В.И. Когнитивный подход в управлении // Там же. — С. 2—8.
35. Авдеева З.К., Коврига С.В., Макаренко Д.И. Когнитивное моделирование для решения задач управления слабоструктурированными системами (ситуациями) // Управление большими системами. — 2007. — Вып. 16. — С. 26—39.
36. Коврига С.В. Методические и аналитические основы когнитивного подхода к SWOT-анализу // Проблемы управления. — 2005. — № 5. — С. 58—63.
37. Andrews K.R. The Concept of Corporate Strategy. — Richard D. Irvin, 1971.
38. Абрамова Н.А., Коврига С.В. О рисках, связанных с ошибками экспертов и аналитиков // Проблемы управления. — 2006. — № 6. — С. 60—67.
39. Кулинич А.А., Максимов В.И. Система концептуального моделирования социально-политических ситуаций «Компас» / В сб.: Современные технологии управления. — М.: Фонд «Проблемы управления», 1998.
40. Максимов В.И., Григорян А.К., Корноушенко Е.К. Программный комплекс «Ситуация» для моделирования и решения слабоформализованных проблем // Междунар. конф. по проблемам управления (29 июня — 2 июля 1999 г.): Избранные труды. — М., 1999. — Т. 2. — С. 58—65.
41. Авдеева З.К., Максимов В.И., Рабинович В.М. Интегрированная система «Курс» для когнитивного управления развитием ситуаций // Тр. ИПУ РАН. — 2000. — Т. XIV. — С. 89—114.
42. Кулинич А.А. Когнитивная система поддержки принятия решений «Канва» // Программные системы и продукты. — 2002. — № 3.
43. Трахтенгерц Э.А. Компьютерная поддержка принятия решений. — М.: СИНТЕГ, 1998. — 376 с.
44. Трахтенгерц Э.А. Компьютерная поддержка формирования целей и стратегий. — М.: СИНТЕГ, 2005. — 224 с.
45. Самохина А.С. Компьютерные методы и средства управления в чрезвычайных ситуациях, обусловленных биологическими факторами: автореф. дис. д-ра техн. наук. — М.: ИПУ, 2008.



**Кузнецов Олег Петрович** — д-р техн. наук, профессор, зав. лабораторией методов интеллектуализации дискретных процессов ИПУ, председатель Научного совета Российской Ассоциации искусственного интеллекта. Председатель секции «Теория и методы разработки программного обеспечения систем управления» Ученого совета ИПУ. Окончил два факультета МГУ — философский и механико-математический. Специалист по теории автоматов, логическому управлению и искусственному интеллекту. Автор около 110-ти научных работ, в том числе двух книг. Член редколлегии журнала «Проблемы управления». ☎(495) 334-76-39, ✉olkuznes@ipu.rssi.ru.