

# КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОГНИТИВНЫХ КАРТ: ПОДХОДЫ И МЕТОДЫ

А.А. Кулинич

Рассмотрены системы поддержки принятия решений в плохо определенных динамических ситуациях, основанные на моделировании экспертных знаний, представленных в виде когнитивных карт. На примере систем моделирования когнитивных карт, разработанных в России, дан обзор методов реализации основных функциональных подсистем систем поддержки принятия решений этого класса.

**Ключевые слова:** когнитивная карта, «мягкий» системный анализ, архитектура систем моделирования, параметризация, верификация, корректировка.

## ВВЕДЕНИЕ

В процессах управления возникает необходимость принятия решений в слабо структурированных динамических ситуациях, когда параметры (значения переменных), законы и закономерности развития ситуации описываются качественно. Это уникальные ситуации, в которых динамика параметров ситуации сопровождается трудно предсказуемыми изменениями ее структуры.

Для принятия решений в условиях дефицита точной количественной информации эксперты и аналитики вынуждены опираться на собственный опыт и интуицию, используя для принятия решений в качестве модели динамической ситуации субъективную модель, основанную на экспертных оценках аналитиков, т. е. на их знаниях. Субъективную модель слабоструктурированной динамической ситуации называют когнитивной картой.

Деятельность экспертов и аналитиков, направленная на исследование ситуации и принятие решений с помощью когнитивных карт представляет собой методологию — логико-временную структуру [1] применения различных методов и приемов: построения когнитивной карты, ее параметризации, получение прогнозов развития ситуаций, верификации, корректировки когнитивной карты и принятие решений.

За последнее двадцатилетие в зарубежных научных журналах и в трудах международных конференций представлено большое число публикаций,

посвященных теоретическим исследованиям когнитивных карт и методам их анализа. Часто теоретические исследования сопровождаются примерами анализа когнитивных карт, подтверждающих обоснованность предлагаемых методов. При этом программное обеспечение, используемое для получения подтверждающих результатов, в научных статьях не описывается и не рассчитано на широкий круг пользователей. Многочисленные исследования когнитивных карт и методов их анализа заложили теоретический фундамент для создания прикладных коммерческих систем моделирования когнитивных карт и создали необходимые условия их появления. Достаточным условием появления таких систем является их востребованность конечными пользователями для решения актуальных проблем в условиях неопределенности.

Отметим, что состав методов анализа когнитивных карт, заложенных в программные системы, определяется характером актуальных проблем, для решения которых они создавались. Например, зарубежные системы моделирования когнитивных карт Decision Explorer (см. <http://www.banxia.com/dexplore/index.html>) и FCMapper (см. <http://www.fcappers.net/joomla/>) в большей степени ориентированы на анализ структуры когнитивных карт, а не на анализ динамики развития ситуаций, моделируемых когнитивными картами.

В России же, в условиях социально-экономических и политических преобразований, системы моделирования когнитивных карт в основном



ориентированы на анализ динамики развития ситуаций.

Российские научные коллективы, активно занимающиеся применением когнитивных карт для поддержки принятия решений и анализа ситуаций, создавали собственные программные продукты для автоматизации различных этапов процесса принятия решений. За последнее десятилетие в отечественной научной литературе был описан ряд компьютерных систем поддержки принятия решений в динамических ситуациях, основанных на моделировании когнитивных карт. Это системы, разработанные в Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН: система моделирования знаковых и взвешенных орграфов [2], созданная коллективом под руководством В.В. Кульбы; система «Ситуация» [3], интегрированная система «КУРС» [4], включающая в себя системы «Ситуация», «Компас-2» и «КИТ», созданные коллективом под руководством В.И. Максимова и Н.А. Абрамовой; системы «Компас» [5] и «Канва» [6], созданные коллективом под руководством О.П. Кузнецова. Системы моделирования когнитивных карт разрабатывались и в различных регионах РФ: система когнитивного моделирования [7], созданная в научном коллективе Южного Федерального университета под руководством Г.В. Гореловой; система «ИГЛА» [8], Брянский государственный технический университет, разработчики Д.А. Коростелев и др.; система «Стратег» [9], Волгоградский государственный технический университет, разработчики М.А. Заболотский и др. Из систем, созданных за пределами РФ, упомянем систему «Космос» [10], разработанную компанией «Data C» (Украина, Севастополь) под руководством В.Б. Силова.

При таком многообразии систем моделирования когнитивных карт для принятия решений актуальным является их сравнительный анализ. В этой работе сравнительный анализ компьютерных систем моделирования когнитивных карт проводится с точки зрения их полезности для автоматизации различных этапов методологии (логико-временной структуры) принятия решений в слабоструктурированных динамических ситуациях.

Цель настоящей работы заключается в обзоре возможных методов и подходов реализации различных этапов методологии принятия решений в слабоструктурированных динамических ситуациях. Различное сочетание методов и подходов реализации этапов методологии принятия решений, в различных компьютерных системах, перечисленных выше, определяет границы их эффективного применения.

Часть из перечисленных систем позиционируются разработчиками как системы для лаборатор-

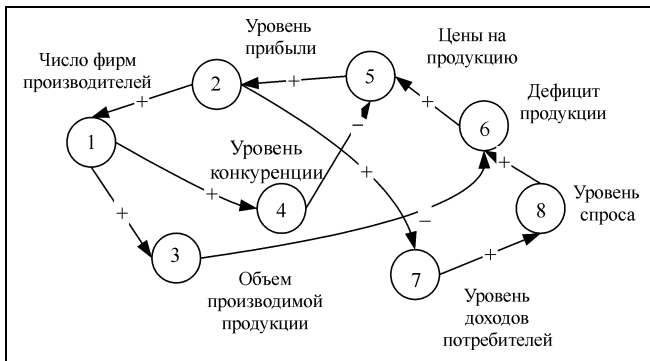
ного исследования проблемных ситуаций и поэтому не имеют ни подробного описания интерфейсов, ни описания математического аппарата, используемого для получения прогнозов развития ситуаций (в лучшем случае имеется ссылка на известный математический аппарат).

Поэтому для анализа компьютерных систем моделирования когнитивных карт выбран ряд систем («Ситуация» [3], «Компас» [5], «Канва» [6], «Космос» [10] и «ИГЛА» [8]), для которых математический аппарат, использованный в системах, достаточно подробно описан. Кроме этого, перечисленные системы позиционируются как коммерческие продукты. Это означает, что демоверсии этих систем могут быть интересны читателям для собственных исследований слабоструктурированных динамических ситуаций.

### **1. МЕТОДОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СИТУАЦИЙ С ПОМОЩЬЮ СУБЪЕКТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ (КОГНИТИВНЫХ КАРТ)**

В общей теории систем [11] выделяются два направления ее развития: теории «жестких» и «мягких» систем. Теория «жестких» систем требует строгих количественных построений, основанных на дедуктивном методе. Для описания «жестких» систем используются строгие формализованные описания, а результаты моделирования объясняются строго доказанными причинными взаимосвязями. Формализация «мягких» систем основана не на точных количественных измерениях, а на качественных, нечетких и гипотетических представлениях о системе в виде экспертных оценок, эвристических рассуждений. В теории «мягких» систем рассматриваются системы, способные адаптироваться к внешним условиям, обладая при этом способностью к развитию. Это — биологические, психологические, социальные системы. Методы моделирования и анализа «жестких» систем не всегда приемлемы для анализа «мягких» систем. Методологической основой принятия решений в плохо определенной динамической ситуации принято считать методологию «мягкого» системного анализа [12].

Для анализа «мягких» систем П. Чекладом [13] была предложена методология «мягкого» системного анализа, представляющая собой системно ориентированное руководство, помогающее аналитику справиться с анализом сложной ситуации. Эта методология является системно организованным процессом исследования плохо определенной системы, включающем в себя ряд последовательно выполняемых этапов: структуризации проблемной ситуации; концептуализации, заключающейся в построении абстрактной модели наблюдае-



Пример когнитивной карты

мой системы; верификации абстрактной модели — сравнения абстрактной модели с реальным миром; корректировки абстрактной модели, и наконец, с помощью скорректированной модели, принятия решений по управлению ситуацией.

Задача поддержки принятия решений по управлению ситуацией в «мягкой» динамической ситуации определяется как задача разработки стратегии для перевода ситуации из текущего состояния в целевое состояние на основе субъективной модели ситуации, включающей в себя экспертно измеренные значения факторов ситуации и модель ее функциональной структуры, описывающей известные аналитику законы и закономерности наблюдаемой ситуации. Эта субъективная модель фиксируется в виде ориентированного знакового графа — когнитивной карты [14]. Пример когнитивной карты экономической ситуации показан на рисунке. Здесь вершины графа — это факторы ситуации, а дуги — причинно-следственные отношения между ними.

Знак плюс на дугах между вершинами-факторами означает, что увеличение значения фактора-причины приводит к увеличению фактора-следствия, а знак минус — увеличение значения фактора-причины уменьшает значение фактора-следствия. Когнитивная карта отражает функциональную структуру анализируемой ситуации, поскольку изменение значения любого фактора ситуации приводит к возникновению «фронта» изменений значений связанных с ним факторов. Этот «фронт» изменений называется импульсным процессом в когнитивной карте и позволяет получать прогнозы развития ситуации.

В рамках методологии «мягкого» системного анализа построение когнитивной карты представляет собой итерационный процесс генерации и проверки гипотез о функциональной структуре ситуации до получения структуры, способной прав-

доподобно объяснить динамику ее развития и включает в себя три основных этапа:

- построение гипотетической когнитивной карты (генерация гипотезы о функциональной структуре ситуации);
- верификация когнитивной карты (проверка правдоподобности гипотезы о функциональной структуре ситуации);
- корректировка когнитивной карты (функциональной структуры) ситуации.

Итерационный процесс «генерации, проверки, корректировки модели (генерации новой гипотезы)» повторяется до получения функциональной структуры, правдоподобно объясняющей поведение наблюдаемой ситуации. В процессе построения когнитивной карты используются интеллектуальные способности экспертов или аналитиков — их знания, которые структурируются в этом итерационном процессе.

С помощью обоснованной когнитивной карты решается задача выработки стратегии управления ситуацией, способной перевести ее из начального состояния в целевое. Причем обоснованность выработываемых стратегий определяется обоснованностью когнитивной карты, полученной в процессе ее генерации.

Таким образом, при принятии решений по управлению плохо определенной ситуацией, на основе моделирования когнитивных карт, знания и интеллект аналитика непосредственно участвуют в процессе принятия решений и в значительной степени определяют его качество. Можно говорить, что системы поддержки принятия решений в плохо определенных ситуациях дают положительные результаты только в тандеме с аналитическими способностями и творческим потенциалом аналитика.

Это обстоятельство предъявляет определенные требования к архитектуре компьютерной системы поддержки принятия решений на основе моделирования когнитивных карт, которые должны найти отражение в субъектно-ориентированной архитектуре системы.

## 2. КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОГНИТИВНЫХ КАРТ

Существует достаточно разнообразный инструментарий компьютерного имитационного моделирования в самых разных предметных областях и видах деятельности. В настоящее время на рынке программных продуктов насчитывается более 50 различных систем компьютерного имитационного моделирования [15]. Все они работают с числовыми данными, отражающими характеристики моделируемых систем, а имитационные модели



систем строятся в рамках концепции анализа «жестких» систем.

К компьютерным системам моделирования знаний, работающим в рамках концепции «мягкого» системного анализа, можно отнести экспертные системы, моделирующие знания и поведение экспертов при решении проблем, для решения которых накоплен значительный опыт принятия решений. Однако этот опыт трудно формализуем в рамках теории «жестких» систем.

Компьютерные системы моделирования когнитивных карт образуют особый класс систем имитационного моделирования, которые по функциональности и принципам организации можно позиционировать между системами имитационного моделирования и экспертными системами. В аспекте программной архитектуры системы моделирования когнитивных карт наследуют свойства систем имитационного моделирования «жестких» систем в плане организации процессов имитационного моделирования и экспертных систем в плане извлечения и представления экспертных знаний, а также их обработки. Все эти системы снабжены эргономичными удобными многооконными интерфейсами, но не поддерживают экспертную работу по разработке когнитивных карт. Автоматизируется в основном вычислительный прогноз развития ситуации. При этом результаты моделирования динамической системы с помощью когнитивных карт неточны, допускают множественные интерпретации. Неточность и качественный характер результатов моделирования в значительной степени определяются грубостью экспертных процедур, которые применяются для построения и настройки когнитивной карты, уровнем знаний, заблуждениями и ошибками аналитика или эксперта, строящего модель.

Методология «мягкого» системного анализа предполагает наличие экспертных ошибок и предусматривает избавление от них в рамках итерационного процесса «генерация — верификация — корректировка» когнитивной карты. Очевидно, что компьютерная система поддержки принятия решений, реализующая методологию «мягкого» системного анализа, позволит избавиться от множества экспертных ошибок и повысить качество принимаемых решений. Программная архитектура системы поддержки принятия решений, ориентированная на поддержку цикла «генерация — верификация — корректировка» когнитивной карты может считаться некоторым идеалом, относительно которого мы в дальнейшем будем анализировать перечисленные ранее программные системы моделирования когнитивных карт.

Идеализированная архитектура системы поддержки принятия решений на основе моделирова-

ния когнитивных карт должна включать в себя функциональные подсистемы, поддерживающие следующие этапы построения модели и принятия решений по управлению ситуацией: генерация — верификация — корректировки когнитивной карты и собственно принятие решений — разработка стратегии для перевода ситуации из текущего состояния в целевое. Рассмотрим содержание каждой функциональной подсистемы с точки зрения пользователя систем поддержки принятия решений, выбранных для анализа.

### 3. ГЕНЕРАЦИЯ ГИПОТЕТИЧЕСКОЙ КОГНИТИВНОЙ КАРТЫ

На этом этапе выдвигается гипотеза о функциональной структуре ситуации на основе знаний, опыта субъекта — его интеллектуальных способностях, воображении и интуиции. Выдвижение гипотезы представляет собой экспертную процедуру выделения базовых (наиболее существенных) факторов ситуации. На множестве выделенных факторов ситуации экспертом выдвигаются гипотезы о существовании и силе причинно-следственного отношения между любой парой факторов ситуации. Результатом выполнения этого этапа является субъективная модель ситуации, представленная знакомым взвешенным ориентированным графом — когнитивной картой.

Генерация гипотетической когнитивной карты состоит из двух этапов:

- создание абстрактной когнитивной карты;
- ее параметризация.

Рассмотрим каждый из них.

#### 3.1. Создание абстрактной когнитивной карты

Данный этап заключается в выделении множества факторов, описывающих ситуацию, и определении причинно-следственных отношений между ними. Это экспертная процедура, сильно зависящая от уровня знаний и предпочтений эксперта. Разные эксперты, наблюдая одну и ту же ситуацию, могут выделить разные значимые для них факторы и связи между ними, получая таким образом разные модели ситуации и, следовательно, разные стратегии управления ситуацией.

Снизить субъективизм этого этапа можно с помощью различных подходов и методик организации интеллектуальной деятельности в процессах структуризации плохо определенной ситуации, как-то: структурно-функциональный подход [16]; SWOT, PEST [17, 18], объектно-структурный подход [19] и др.

Методологической основой структуризации ситуации для представления ее в виде когнитивной

карты служит системный подход, в основе которого лежит рассмотрение объекта или ситуации как системы. Основными понятиями системного подхода служат понятия элемента, структуры, функции. В центре внимания системного подхода находится изучение структуры объекта или ситуации и места элементов в ней. Специфика системного подхода определяется тем, что он ориентирует исследование на раскрытие целостности объекта и обеспечивающих ее механизмов, на выявление многообразных типов связей сложного объекта и сведение их в единую теоретическую картину. Системный подход направлен на изучение целостности и установление состава целого и его элементов, исследование закономерностей соединения элементов в систему, т. е. структуры системы, изучение функций системы и ее составляющих, т. е. на структурно-функциональный анализ системы [16].

В последнее время в моделировании когнитивных карт применяются методы структуризации SWOT и PEST, известные из методологии стратегического менеджмента. В работах [17, 18] на этапах структуризации ситуации предлагается использовать модель ситуационного анализа SWOT (Strengths — сильные стороны, Weaknesses — слабые стороны, Opportunities — возможности, Threats — опасности, угрозы) для выявления сильных и слабых сторон ситуации (проблемных характеристик) и построения так называемого проблемного поля ситуации. Определение проблемного поля ситуации позволяет четко сформулировать цели и задачи моделирования когнитивных карт и поиска стратегии разрешения проблемной ситуации.

Для анализа внешнего окружения наблюдаемой ситуации в работе [18] предлагается использовать модель анализа внешней среды PEST (Policy — политика, Economy — экономика, Society — общество, Technology — технология). Согласно этой модели выделяются четыре основные группы факторов, посредством которых анализируется политический, экономический, социокультурный и технологический аспекты внешней среды вокруг исследуемого объекта.

Интерес представляет и методология структуризации знаний экспертов в виде так называемого поля знаний [19]. Здесь предложен объектно-структурный подход (ОСП) структуризации знаний, согласно которому анализ и представление знаний осуществляется в стратегическом, организационном, концептуальном, функциональном, пространственном, временном, каузальном и экономическом аспектах (стратах).

Применение перечисленных подходов позволяет несколько снизить субъективизм когнитивной

карты, но в любом случае когнитивные карты, построенные на ранних этапах анализа ситуации, характеризуются неполнотой и фрагментарностью, отражающей неполноту и фрагментарность знаний субъекта о ситуации.

Неполнота и фрагментарность выделенных факторов приводит к ошибкам, которые допускает эксперт на этапе определения причинно-следственных отношений между выделенными факторами. Характерные ошибки этого этапа: установление неочевидной связи, ошибки в определении знака влияния, установление транзитивных замыканий связей между факторами.

Перечисленные методы не включены в компьютерные системы поддержки принятия решений, предназначенных для моделирования когнитивных карт, а выбираются на основе личных предпочтений аналитика и выполняются вручную.

Интерфейсами ввода когнитивных карт в перечисленных системах служат либо графические редакторы, либо табличные формы, отражающие матрицу смежности когнитивной карты. Например, в системе «Канва» [6] графический редактор обеспечивает: построение и редактирование когнитивной карты (ориентированного знакового графа), отражающей функциональную структуру ситуации; ввод нового фактора; установку причинной связи между факторами; определение направления и типа связи (положительная, отрицательная); удаление фактора, удаление связи. С помощью графического редактора экспертным путем определяется когнитивная карта  $(F, W)$ , где  $F$  — множество вершин- факторов ситуации,  $W = |w_{ij}|$  — матрица смежности ориентированного графа.

Для снижения субъективизма построения когнитивной карты в системе «ИГЛА» [8] предложен метод ее коллективного создания. Здесь когнитивную карту создают множество экспертов, представляя свои мнения о факторах и связях между ними на согласование координатору. Координатор согласовывает мнения разных экспертов и корректирует ее. Такой метод поддержан архитектурой «клиент — сервер», обеспечивающей независимую работу экспертов.

### 3.2. Параметризация когнитивной карты

В результате параметризации абстрактная когнитивная карта, построенная на предыдущем этапе, превращается в модель конкретной динамической системы. В процессе параметризации когнитивной карты определяются шкалы:

значений факторов и текущих значений факторов;

силы влияния фактора на фактор и их значений.



### 3.2.1. Определение шкал значений факторов и текущих значений факторов

При определении шкал факторов важно определить тип когнитивной карты, моделируемой конкретной компьютерной системой, т. е. определить, как интерпретируются значения факторов и силы связи между ними. В работе [20] рассмотрены две возможные интерпретации когнитивных карт — недетерминированные и детерминированные.

В *недетерминированных* когнитивных картах вес дуги и значения в вершинах интерпретируются как коэффициенты уверенности, характеризующие, соответственно, уверенность эксперта в существовании связи между факторами, и уверенность в том, что фактор, характеризующий некоторое событие, будет иметь место.

В *детерминированных* когнитивных картах, значение фактора в вершине интерпретируется как его абсолютное значение, выраженное в соответствующих единицах измерения (рубли, километры и др.) либо лингвистическими оценками («*Большой*», «*Средний*», «*Малый*»), при этом вес дуги интерпретируется как коэффициент передачи, связывающий изменение абсолютных значений факторов признака и причины.

По этому признаку системы «Космос» и «ИГЛА» следует отнести к системам, ориентированным на моделирование недетерминированных, а системы «Ситуация», «Компас», «Компас-2» и «Канва» — детерминированных когнитивных карт.

В моделировании когнитивных карт доминирует подход, направленный на исследование реакции системы на некоторое начальное возмущение (приращение) значений ее факторов.

**Шкала уверенности.** Шкалы приращений значений факторов для недетерминированных когнитивных карт характеризуют приращение показателя неопределенности (уверенности) значения фактора и представляются на числовых интервалах  $[-1, 1]$ . Интерпретация отрицательных значений показателя уверенности затруднительна и мало понятна для эксперта.

В работе [21] Б. Коско предложил решать эту проблему, дополняя любой фактор ситуации  $f_i \in F$  фактором, имеющим противоположный смысл, т. е.  $\bar{f}_i$ . Этот подход удобен для описания систем, моделирующих разнополярные приращения значений факторов. Эксперт задает два показателя неопределенности: показатель неопределенности положительного приращения  $p_i^+ \in [0, 1]$  для фактора  $f_i$  и показатель неопределенности его отрицательного приращения  $p_i^- \in [0, 1]$ . При таком определении приращения показателя неопреде-

ленности возможно представление неопределенности в так называемых «серых» шкалах [22], для которых не выполняется условие нормировки  $p_i^+ + p_i^- = 1$ . Считается, что «серые» шкалы лучше отражают экспертные оценки в условиях неопределенности. Конфликт оценок  $p_i^+$  и  $p_i^-$  определяется с помощью показателя когнитивного консонанса  $c_i = |p_i^+ - p_i^-| / (p_i^+ + p_i^-)$  [23].

Степени уверенности представляются в виде упорядоченного множества лингвистических значений уверенности  $Z^p = \{\text{«Невозможно»}, \text{«Слабо возможно»}, \text{«Почти возможно»}, \text{«Возможно»}, \text{«Очень возможно»}, \text{«Почти достоверно»}, \text{«Достоверно»}\}$ . Шкала уверенности представляется как отображение  $\varphi: Z^p \rightarrow [0, 1]$  на отрезок числовой оси.

Экспертная процедура определения показателей неопределенности на интервале значений  $[0, 1]$  для положительных и отрицательных приращений понятна эксперту и интерпретируется следующим образом: 0 как невозможное, а 1 как достоверное приращение.

**Оценочные шкалы приращений значений факторов.** Несколько более сложной и более субъективной является экспертная процедура определения шкал приращений факторов для детерминированных когнитивных карт.

В системах «Ситуация» и «Компас» считается, что эксперт, имея некоторое интуитивное представление о текущих значениях всех факторов, которые в реальности измеряются абсолютными числовыми значениями или же в оценочных лингвистических шкалах, может представить изменение значения факторов в терминах оценочной шкалы приращений значений факторов от текущего значения.

Примером такой шкалы может служить биполярная оценочная шкала приращений, представленная упорядоченным множеством лингвистических значений  $Z = \{\text{«Сильно растет»}, \text{«Средне растет»}, \text{«Слабо растет»}, \text{«Не меняется»}, \text{«Слабо падает»}, \text{«Средне падает»}, \text{«Сильно падает»}\}$ .

Оценочная шкала приращений значений факторов строится как отображение элементов множества  $Z$  на отрезок числовой оси  $[1, -1]$  в виде равноотстоящих точек, т. е.  $\varphi: Z \rightarrow [-1, 1]$ .

Оценочная шкала приращений обладает большим уровнем субъективизма, эксперт может допускать ошибки, поскольку эксперт явным образом не фиксирует текущее абсолютное значение фактора и плохо представляет различные оценки степени приращения значений факторов в абсолютной шкале.

**Шкалы с «абсолютными» лингвистическими значениями.** В системе «Канва» [6] для снижения субъективизма шкал факторов использована лингвистическая шкала с «абсолютными» лингвистическими значениями [24]. Здесь при определении лингвистических значений используются «абсолютные» лингвистические значения фактора, а не субъективные его оценки типа «*Большой*», «*Средний*», «*Малый*». Например, лингвистическим значением температуры может служить лингвистическое значение «*так горячо, что едва можно приложить ладонь*» или оценка «*так холодно, что рука сразу замерзает*» [24], а не просто «*Очень горячо*» или «*Очень холодно*». При таком определении лингвистических значений факторов ситуации экспертом задается «абсолютное» лингвистическое текущее значение фактора, что облегчает работу экспертов при определении силы влияния факторов и уменьшает экспертные ошибки.

Для фактора  $f_i$  определено упорядоченное множество лингвистических значений  $Z_i = \{z_{i1}, \dots, z_{im}\}$ . Причем для элементов множества лингвистических значений определен не только строгий порядок значений  $z_{i1} < z_{i2} < \dots < z_{im}$ , но и равенство интервалов между лингвистическими значениями. Равенство интервалов между значениями устанавливается с помощью экспертного метода деления отрезка пополам Торгерсона [25].

Шкала фактора определена как отображение каждого лингвистического значения фактора в точку числовой оси,  $\varphi: Z_i \rightarrow X_i$ ,  $X_i = \{x_{i1}, \dots, x_{im}\}$ ,  $x_{i1}, \dots, x_{im} \in [0, 1]$ .

Определено также и обратное отображение  $\varphi^{-1}: x \rightarrow z_i$ ,  $x \in [0, 1]$ , позволяющее интерпретировать любое значение  $x$  в лингвистическое значение фактора  $z_i$ ,  $z_i \in Z_i$ .

В терминах шкал факторов и приращений определено начальное состояние ситуации в лингвистическом виде  $Z(0) = (z_{1k}, z_{2d}, \dots, z_{m})$  и, соответственно, в числовом  $X(0) = (x_{1k}, x_{2d}, \dots, x_{m})$  как вектор начальных значений факторов. Определен также начальный вектор приращений факторов ситуации  $P(0) = (p_1, p_2, \dots, p_n)$ .

Приращение значения фактора определяется для текущего значения фактора и характеризуется направлением приращения — положительным, отрицательным приращением и значением приращения. Для заданного текущего состояния  $z_{ic}$  элементы множества  $z_{i(c+1)}, z_{i(c+2)}, \dots, z_{in} \in Z_i$  будут характеризовать положительное приращение, а отрицательные приращения характеризуется элементами  $z_{i(c-1)}, z_{i(c-2)}, \dots, z_{i1} \in Z_i$ .

Текущему состоянию на интервале  $[0, 1]$  соответствует точка  $x_{ic}$ . Положительные приращения определяются как интервалы (отрезки) числовой оси:  $p_{i1}^+ = x_{i(c+1)} - x_{ic}$ ;  $p_{i2}^+ = x_{i(c+2)} - x_{ic}$ ;  $\dots$ ;  $p_{i(n-c)}^+ = x_{in} - x_{ic}$ , а отрицательные приращения — это интервалы числовой оси:  $p_{i1}^- = x_{ic} - x_{i(c-1)}$ ;  $p_{i2}^- = x_{ic} - x_{i(c-2)}$ ;  $\dots$ ;  $p_{i1}^- = x_{ic} - x_{i1}$ .

Приращения факторов в системе «Канва», полученные при вычислении прогнозов развития ситуации вербализуются, т. е. представляются в виде утверждений вида: «Значение фактора  $f_i$  увеличилось (уменьшилось) от текущего значения  $z_{ic} = \varphi^{-1}(x_{ic})$  до значения  $z_{in} = \varphi^{-1}(x_{in})$ ». Такой подход позволяет снизить субъективизм экспертных оценок.

### 3.2.2. Шкалы силы влияния факторов

При определении силы влияния факторов эксперт определяет вес дуги, связывающей фактор причины и фактор следствия. Шкалы силы влияния для детерминированных и недетерминированных когнитивных карт по-разному интерпретируют значение веса дуги знакового орграфа.

**Шкала силы влияния в недетерминированных когнитивных картах.** В недетерминированных когнитивных картах вес дуги определяет уверенность в существовании связи между вершинами и представляется числом в интервале  $[-1, 1]$ . Специфика представления приращений в недетерминированных когнитивных картах в виде пары значений — положительного  $p_i^+$  и отрицательного приращения  $p_i^-$  фактора приводит к следующему представлению связей факторов. Для причинно-следственной связи  $w_{ij} \in [-1, 1]$  между фактором причины  $f_i \in F$  и фактором следствия  $f_j \in F$  положительная связь связывает положительные приращения с положительным, а отрицательное с отрицательным приращениями, т. е.  $w_{ij}^+: p_i^+ \rightarrow p_j^+$ ,  $w_{ij}^+: p_i^- \rightarrow p_j^-$ . Отрицательная связь, соответственно, положительные приращения с отрицательными, а отрицательные с положительными приращениями, т. е.  $w_{ij}^-: p_i^+ \rightarrow p_j^-$ ,  $w_{ij}^-: p_i^- \rightarrow p_j^+$ . Это приводит к удвоению размера матрицы смежности когнитивной карты, но при этом все элементы матрицы, определяющие показатель неопределенности существования связи положительны и определены на интервале  $[0, 1]$ .

Элементы двойной положительно определенно матрицы смежности  $W' = |w'_{ij}|_{2n \times 2n}$  определя-



ются из матрицы смежности  $W = |w_{ij}|_{n \times n}$  следующим образом [10]:

если  $w_{ij} > 0$ , то  $w'_{(2i-1)(2j-1)} = w_{ij}$ ,  $w'_{2i2j} = w_{ij}$ ;

если  $w_{ij} < 0$ , то  $w'_{2i(2j-1)} = -w_{ij}$ ,  $w'_{(2i-1)2j} = -w_{ij}$ .

В этом случае степени уверенности в существовании связи представляются в виде упорядоченного множества лингвистических значений уверенностей  $Z^{pw} = \{\text{«Невозможно»}, \text{«Слабо возможно»}, \text{«Почти возможно»}, \text{«Возможно»}, \text{«Очень возможно»}, \text{«Почти достоверно»}, \text{«Достоверно»}\}$ . Шкала уверенности в существовании связи представляется как отображение  $\varphi: Z^{pw} \rightarrow [0, 1]$ .

Экспертная процедура определения показателей неопределенности связей факторов на интервале значений  $[0, 1]$  понятна эксперту, поскольку 0 интерпретируется как невозможная, а 1 как достоверная связь.

**Шкала силы влияния факторов в детерминированных когнитивных картах.** Сложнее ситуация при определении весов связей в детерминированных когнитивных картах. Здесь вес связи определяет коэффициент передачи. Определяя этот коэффициент, эксперт должен ответить на вопрос: «Как влияет фактор  $f_i$  на фактор  $f_j$  и с какой силой?». В системах «Ситуация» и «Компас» ответ может быть выбран из упорядоченного множества лингвистических значений оценок силы влияния:  $Z^W = \{\text{«Сильно увеличивает»}, \text{«Средне увеличивает»}, \text{«Слабо увеличивает»}, \text{«Не влияет»}, \text{«Слабо уменьшает»}, \text{«Средне уменьшает»}, \text{«Сильно уменьшает»}\}$ .

Каждый элемент упорядоченного множества  $Z^W$  отображается на отрезок числовой оси  $[-1, 1]$  в виде равноотстоящих точек,  $\varphi: Z^W \rightarrow [-1, 1]$ .

Такая шкала силы влияния факторов обладает высоким уровнем субъективизма. Дело в том, что когнитивные карты моделируют, как правило, нелинейные динамические системы, в которых сила влияния между факторами зависит от текущих значений факторов причины. Линейная когнитивная карта аппроксимирует участок нелинейной системы вблизи текущего значения фактора причины, и если текущее значение фактора при экспертном определении силы влияния определено неявно, то это приводит к существенным искажениям оценки силы влияния факторов при их экспертном определении.

В системах «Ситуация» и «Компас» значения весов дуг, определяющие интервал значений силы влияния ограничен интервалом  $w_{ij} \in [-1, 1]$ . Однако здесь вес интерпретирован как коэффициент передачи и поэтому его значения могут находиться за пределами обозначенного интервала. Многочис-

ленные примеры когнитивных карт, для которых  $w_{ij} \notin [-1, 1]$ , можно найти в работе Робертса [26].

Параметризация силы влияния факторов абстрактной когнитивной карты с помощью оценочных шкал факторов, в которых явным образом не определено текущее состояние фактора, обладает высоким уровнем субъективизма, приводит к множеству ошибок, вызванных некорректно поставленным вопросом эксперту.

Если когнитивная карта параметризована с помощью описанных оценочных шкал приращения и шкал силы влияния, то возникают трудности при ее верификации.

**Косвенные методы определения силы влияния факторов.** Для уменьшения субъективизма в определении силы влияния факторов в системе «Канва» применяются косвенные методы определения силы влияния. Эксперт определяет силу влияния, отвечая на вопросы о возможном изменении значения фактора следствия при фиксированном изменении фактора причины. Такая процедура позволяет определить силу влияния с учетом текущего состояния фактора причины, что уменьшает ошибку экспертного оценивания. Генерация вопросов эксперту для определения силы влияния между признаками автоматически осуществляется в двух режимах: прямого оценивания и парного сравнения.

В режиме прямого оценивания сила влияния определяется как коэффициент передачи, вычисляемый по заданным экспертом в лингвистическом виде приращениям фактора причины и фактора следствия. Приращения могут быть заданы точно или в виде нечеткого множества.

При точном задании значений приращений факторов эксперт отвечает на вопрос: «Оцените, как изменение значения фактора  $f_i$  от  $z_i^0$  до  $z_i^p$  влияет на изменение значения признака-следствия  $f_s$ », определяя правдоподобное, с его точки зрения, «абсолютное» лингвистическое значение фактора причины  $z_s^r$ . Далее сила влияния определяется как коэффициент передачи

$$w_{is} = p_i^p / p_s^r, \quad (1)$$

где  $p_i^p = (x_i^0 - x_i^p) / x_i^0$  — отклонение значения фактора-причины, а  $p_s^r = (x_s^0 - x_s^r) / x_s^0$  — отклонение фактора-следствия,  $x_i^0 = \varphi_i(z_i^0)$  и  $x_s^0 = \varphi_s(z_s^0)$  начальные значения соответственно фактора-причины и фактора-следствия;  $x_i^p = \varphi_i(z_i^p)$  и  $x_s^r = \varphi_s(z_s^r)$  значения факторов после экспертного определе-



ния приращения их значений,  $z_i^0$  и  $z_s^0$  — начальные лингвистические значения факторов  $f_i$  и  $f_s$ ,  $z_i^p$  и  $z_s^r$  — лингвистические значения факторов  $f_i$  и  $f_s$  после приращения,  $\varphi_i$  и  $\varphi_s$  — отображения лингвистических значений  $z_i^0$ ,  $z_s^0$ ,  $z_i^p$  и  $z_s^r$  факторов  $f_i$  и  $f_s$  на отрезок числовой оси  $[0, 1]$ .

Задание отклонений значений факторов причины или следствия в виде *нечеткого множества* используется в случаях, когда эксперт затрудняется точно определить отклонение фактора-следствия, вызванное отклонением фактора-причины. Функция принадлежности значения отклонения фактора-следствия представляется в треугольной или трапециевидальной форме и задается нечетким множеством:

$$\mu_{[0,1]}(x_s^r) = \{x_{s1}^r \setminus v_1, x_{s2}^r \setminus v_2, \dots, x_{sh}^r \setminus v_h\},$$

где  $x_{s1}^r, \dots, x_{sh}^r$  — значения фактора после приращения,  $v_1, \dots, v_h$  — субъективные оценки возможности соответствующих приращений фактора-следствия при заданном приращении фактора-причины.

Значение отклонения фактора, заданного функцией принадлежности  $\mu_{[0,1]}(x_s^r)$ , определяется путем дефазификации функции принадлежности путем вычисления центра тяжести фигуры, образованной функцией принадлежности  $\mu_{[0,1]}(x_s^r)$ :

$$x_s^r = \sum_h x_{sh}^r v_h / \sum_h v_h.$$

После дефазификации сила влияния признаков  $w_{is}$  определяется с помощью соотношения (1).

**Режим парного сравнения** применяется в случаях, когда эксперту проще упорядочить факторы-причины из множества  $F_i = \{f_p, f_s, \dots, f_z\}$  по силе влияния на фактор-следствие  $f_i$ . Факторы-причины упорядочиваются с помощью метода парного сравнения, смысл которого заключается в экспертном определении: изменение какого из двух факторов-причин, предложенных для оценки, сильнее влияет на изменение значения фактора-следствия. Эксперт определяет свои предпочтения, используя ранговую шкалу, предложенную Т. Саати [27]. Необходимое условие корректного упорядочивания факторов из множества  $F_i$  состоит в транзитивности оценок эксперта. Нарушение транзитивности считается противоречием в предпочтениях эксперта, которое необходимо обнаружить и исправить. Система «Канва» автоматически обнаруживает та-

кого рода противоречия и позволяет субъекту их исправить. Предусмотрено два режима корректировки противоречий эксперта: ручной и автоматизированный. В ручном режиме эксперт получает возможность переопределить свои предпочтения, заданные на предыдущем шаге парной оценки, а в автоматизированном режиме применяется эвристический алгоритм корректировки, позволяющий заменить нетранзитивную оценку на наиболее близкую транзитивную.

В системе «Канва» все интерфейсы настройки когнитивной карты оформлены в виде удобных интерфейсов, позволяющих снизить трудоемкость настройки когнитивной карты.

Применение «абсолютных» лингвистических шкал факторов и косвенных методов определения весов дуг позволяет снизить субъективизм настройки когнитивной карты. Снижение субъективизма связано в первую очередь с использованием в системе «Канва» автоматически сгенерированных вопросов эксперту на ограниченном естественном языке, в виде стандартных шаблонов вопросов. В вопросе для косвенного определения силы влияния факторов явным образом определено: «абсолютные» значения текущего состояния оцениваемых факторов причины и следствия; «абсолютные» значения оцениваемых отклонений значений факторов причины и следствия, определяющих силу влияния. Явное указание «абсолютных» значений и отклонений факторов в вопросе оценивания приводит к пониманию экспертом сути экспертной оценки определения силы влияния факторов, что снижает субъективизм оценки.

#### 4. ВЕРИФИКАЦИЯ КОГНИТИВНОЙ КАРТЫ

Верификации когнитивной карты (проверка гипотезы о функциональной структуре) заключается в получении на модели прогноза развития ситуации и его объяснении на основе имеющихся данных и здравого смысла. Моделирование ситуации позволяет выявить рассогласование между прогнозом развития ситуации, полученным с помощью когнитивной карты, и реальным развитием ситуации в прошлом. Выявленные рассогласования свидетельствуют об ошибочных представлениях аналитика о законах и закономерностях развития ситуации, заложенных в субъективную модель, и служат стимулами эксперту или аналитику для поиска новой или корректировки текущей функциональной структуры наблюдаемой системы.

На этапе верификации когнитивной карты эксперт пытается понять: насколько верна построенная им когнитивная карта, и можно ли с ее по-



мощью вырабатывать решения по управлению ситуацией?

Будем рассматривать два подхода выполнения верификации когнитивной карты: прямая и обратная верификация. Обратная верификация основана на установлении правдоподобности прогнозов развития ситуации, полученных с помощью когнитивной карты путем сравнения их с известной динамикой ситуации в прошлом. Прямая верификация основана на анализе правдоподобности процессов, приводящих к изменению значений факторов в прогнозе.

Верификация когнитивной карты основана на анализе прогнозов развития ситуации, которые в разных системах [2—10] различны. Поэтому рассмотрим методы получения прогнозов в разных системах.

#### 4.1. Методы получения прогнозов развития ситуации

Общая постановка задачи получения прогнозов развития ситуации следующая.

Задано множество факторов ситуации  $F$ , определены шкалы факторов (см. п. 3.2) и когнитивная карта задана матрицей смежности  $W$  ориентированного графа. Пусть факторы ситуации характеризуются некоторым начальным значением, представленным в виде вектора начального состояния  $X(0) = (x_1(0), \dots, x_n(0))$ . Эксперт может увеличить или уменьшить начальные значения любых факторов  $X(1) = (x_1(1), \dots, x_n(1))$ . Приращение значения фактора  $p_i(0) = x_i(1) - x_i(0)$  называется начальным импульсом, а вектор приращений  $P(0) = (p_1(0), \dots, p_n(0))$  — начальным вектором приращений. Требуется получить прогноз развития ситуации.

Для получения прогноза развития ситуации в моделировании когнитивных карт записывается система конечно-разностных уравнений вида

$$P(t+1) = WP(t), \quad (2)$$

где  $P(t)$  и  $P(t+1)$  — векторы приращений значений факторов в моменты времени  $t$  и  $t+1$  (векторы импульсов).

Состояние ситуации в момент времени  $t+1$  определяется из соотношения  $X(t+1) = X(t) + P(t+1)$ , где  $X(t)$  — состояние ситуации в момент времени  $t$ .

Совокупность векторов приращений  $P(t)$ ,  $P(t+1)$ , ...,  $P(t+n)$  в последовательные дискретные моменты времени называется импульсным процессом [26], а состояния ситуации  $X(t)$ ,  $X(t+1)$ , ...,  $X(t+n)$  характеризуют динамику ее изменения при управляющих воздействиях  $P(t)$ .

#### 4.1.1. Метод получения прогноза развития ситуации при моделировании недетерминированных когнитивных карт

В системах «Космос» и «ИГЛА» применяется метод получения прогнозов, основанный на теории нечетких множеств. Для вычисления прогнозных значений факторов ситуации используется правило max-product — (умножение и взятие максимума) и двойная положительно определенная матрица смежности  $W' = |w'_{ij}|_{2n \times 2n}$  [10].

Прогноз развития ситуации определяется с помощью матричного уравнения:

$$P'(n) = P'(0) \circ W'^*, \quad (3)$$

где  $\circ$  — правило max-product:  $p'_i(n) = \max_j (p'_j(0) w'_{ij})$ ,  $p'_i(n) \in P'(n)$ ,  $p'_i(0) \in P'(0)$ ,  $w'_{ij} \in W'^*$ ,  $W'^*$  — транзитивное замыкание матрицы смежности когнитивной карты.

В начальном  $P(0)$  и прогнозном  $P(n)$  векторах приращений размерностью  $2n$  ( $p_1^-, p_1^+, \dots, p_n^-, p_n^+$ ), значение фактора  $f_i$  характеризуют два элемента: элемент с индексом  $2i$  характеризуют положительное  $p_i^+$ , а с индексом  $2i-1$  — отрицательное  $p_i^-$  приращения фактора. Это позволяет моделировать когнитивный консонанс в представлениях субъекта о значении фактора [23] и характеризовать уверенность субъекта в результатах моделирования. Степень когнитивного консонанса  $c_i(t)$  определяется из соотношения:

$$c_i(n) = \frac{|p_i^+(n) - p_i^-(n)|}{p_i^+(n) + p_i^-(n)}, \quad 0 \leq c_i(n) \leq 1. \quad (4)$$

При  $c_i(n) \approx 1$ , т. е.  $p_i^+(n) \gg p_i^-(n)$  или  $p_i^-(n) \gg p_i^+(n)$  уверенность субъекта в приращении фактора  $p_i(n)$  максимальна, а при  $c_i(n) \approx 0$ , т. е.  $p_i^+(n) \approx p_i^-(n)$ , минимальна.

Транзитивное замыкание положительно определенной когнитивной карты определяется из соотношения:  $W'^* = \bigvee_{k=1}^{\infty} (W')^k$ .

С учетом когнитивного консонанса значения фактора компонента  $p_i(n) \in P(n)$  вектора прогноза развития ситуации представляется парой  $(p_i(n), c_i(n))$ , где  $p_i(n) = \text{sign}(p_i^+(n) - p_i^-(n)) \max(p_i^+(n), p_i^-(n))$  — значение приращения фактора,  $c_i(n)$  — консонанс значения фактора.

Знак приращения  $p_i(n)$  положителен, если  $p_i^+(n) > p_i^-(n)$ , и отрицателен, если  $p_i^+(n) < p_i^-(n)$ .

В этом случае, прогнозное состояние ситуации будем определять парой

$$(X(n), C(n)), \quad (5)$$

где  $X(n) = X(0) + P(n)$  — вектор состояния ситуации (его компонента  $x_i(n) = x_i(0) + p_i(n)$ ), когнитивный консонанс значения  $c_i(n) \in C(n)$ .

Из матрицы транзитивного замыкания  $W^{*} = [w_{ij}']_{2n \times 2n}$  получают матрицы [10]  $C_S = [c_{ij}]_{n \times n}$  — взаимного консонанса,  $D_S = [d_{ij}]_{n \times n}$  — взаимного диссонанса,  $d_{ij} = 1 - c_{ij}, \forall ij, P_S = [p_{ij}]_{n \times n}$  — взаимного положительного влияния,  $N_S = [n_{ij}]_{n \times n}$  — взаимного отрицательного влияния.

#### 4.1.2. Метод получения прогноза развития ситуации при моделировании детерминированных когнитивных карт

В рассматриваемых системах моделирования детерминированных когнитивных карт используются два разных метода получения прогноза развития ситуации — с суммированием и без суммирования приращений значений факторов.

**А. Метод получения прогноза развития ситуации с суммированием приращений** значений факторов применен в системе «Ситуация». Эта модель была предложена в работе Робертса [26], затем анализировалась и модифицировалась в работах [28, 29]. Для вычисления компонентов  $p_i(t + 1)$  вектора прогнозных приращений  $P(t + 1)$  в уравнении (2) используется соотношение:

$$p_i(t + 1) = \sum_j w_{ij} p_j(t).$$

Прогноз развития ситуации представляется в виде вектора значений всех факторов  $(x_1(n), \dots, x_n(n))$ ,

где  $x_i(n) = x_i(0) + \sum_{t=0}^n p_i(t)$ ,  $x_i(0) \in [0, 1]$  — начальное состояние моделируемой ситуации.

Поскольку в этом методе текущие значения факторов задаются абстрактно, (без привязки к конкретным значениям факторов), то можно считать начальное состояние всех факторов нулевым  $x_i(0) = 0, i = 1, \dots, n$ , и прогнозный вектор значений

всех факторов  $x_i(n) = \sum_{t=0}^n p_i(t)$  определяется накоп-

ленными приращениями значений факторов за  $n$  тактов работы моделирующего комплекса.

В этом случае компоненты вектора прогноза  $x_i(n) \in [-1, 1]$  могут быть представлены в лингвистических оценочных шкалах приращения.

**В. Метод получения прогноза развития ситуации без суммирования приращений** применяется в системах «Компас» и «Канва».

Метод получения прогноза развития ситуации в системе «Компас» отличается от метода прогноза систем «Космос» и «ИГЛА» детерминированной интерпретацией когнитивной карты.

Для вычисления компонентов  $p_i(n)$  вектора прогнозных приращений  $P(n)$  в уравнении (2) используется соотношение:

$$p_i(n) = \max_j w_{ij} p_j(0).$$

В системе «Компас», моделирующей детерминированные когнитивные карты, для определения значений факторов используются оценочные шкалы приращений, без фиксации текущего значения факторов, т. е.  $X(0) = 0$ . Прогнозы развития ситуации представляются парой  $(X(n), C(n))$ , где значение  $X(n) = P(n)$  получается с помощью соотношения (3), а консонанс  $C(n)$  значений вычисляется по соотношению (4).

Компоненты  $p_i(n) \in P(n)$  вектора прогноза определены на интервале  $[-1, 1]$  и могут быть представлены в терминах оценочной шкалы приращений «Сильно растёт», ..., «Сильно падает».

Система «Канва» также ориентирована на моделирование детерминированных когнитивных карт. В ней применяется метод вычисления прогнозов систем «Космос» и «ИГЛА» в детерминированной интерпретации когнитивных карт. В отличие от системы «Компас», в системе «Канва» используются «абсолютные» лингвистические шкалы, поэтому здесь явным образом определяется начальное состояние ситуации как вектор значений всех факторов ситуации в лингвистическом  $Z(0) = (z_1^0, \dots, z_n^0)$  и числовом виде  $X(0) = (x_1^0, \dots, x_n^0)$ , а также начальный вектор приращений факторов  $P(t) = (p_1, \dots, p_m)$ .

Прогноз развития ситуации также определен парой  $(X(n), C(n))$ , где  $X(n) = X(0) + P(n)$  получаются с помощью соотношений (3) и (5) консонанс  $C(n)$  значений — с помощью соотношения (4).

Прогноз развития  $X(n)$  ситуации в системе «Канва» вербализуется с помощью обратных отображений шкал  $\varphi^{-1}: X(n) \rightarrow Z(n)$  и представляется пользователю в «абсолютных» лингвистических значениях.

#### 4.2. Обратная верификация когнитивной карты

Прогнозы, полученные с помощью одного из описанных методов, служат основой процесса верификации когнитивной карты. Обратная вери-



фикация когнитивной карты основана на анализе правдоподобности прогнозов развития ситуации и представляется как экспертная процедура сравнения полученных прогнозных значений факторов с известными значениями факторов в прошлом, полученными при начальных условиях прошлого. Корректность такой процедуры верификации зависит от ряда объективных сложностей формализации плохо определенной динамической ситуации и, соответственно, упрощений, сделанных на этапе построения когнитивной карты.

Выделим два основных упрощения.

- Моделируются плохо определенные нелинейные динамические системы, в которых параметры связей между факторами (вес дуг) зависят от текущего состояния системы  $W(X(t))$ . Динамика изменения состояния такой системы определяется как отображение  $W(X(t)): X(t) \rightarrow X(t+1)$  текущего состояния  $X(t)$  в будущее  $X(t+1)$ . Когнитивные карты аппроксимируют нелинейную динамическую систему линейной в  $\varepsilon$ -окрестностях текущего состояния  $X(0)$ , считая веса на дугах неизменными  $W(X(0)) = \text{const}$ . Динамика изменения состояния ситуации определяется в этом случае из соотношения  $W(X(0)): X(t) \rightarrow X(t+1)$ ,  $t = 0, \dots, n$ .
- Динамика развития процессов в модели ситуации, представленной когнитивной картой, протекает в дискретном модельном времени, не учитывающим задержки распространения влияний между факторами, существующие в реальной моделируемой системе.

Из-за первого упрощения верификация линейных когнитивных карт на основе сравнения прогнозов развития ситуации с динамикой развития нелинейной ситуации в прошлом может быть и бесполезной из-за нелинейности самой ситуации. Из-за второго упрощения короткие циклы, существующие в когнитивной карте, при условии накопления приращений значений факторов могут сильно исказить прогноз значения факторов. Кроме этого, модельный прогноз отражает установившиеся значения факторов, но утверждать об установившихся значениях факторов реальной ситуации в момент ее наблюдения и выполнения ее верификации затруднительно.

Поэтому определение близости прогнозных значений и реальных значений параметров динамической ситуации оказывается некорректным. Действительно, реальное развитие ситуации обычно точно фиксируется в абсолютных значениях или относительных приращениях этих значений (например, в процентах), и их сравнение с прогнозными значениями, представленными с помощью интуитивно полученных шкал оценок прираще-

ний не позволяет говорить ни о строгости такого сравнения, ни о доверии к результатам такого сравнения.

В этом случае верификация осуществляется путем анализа тенденций прогнозов развития ситуации путем определения их правдоподобности. Правдоподобность прогнозов проверяется сравнением тенденций изменения значений факторов в прогнозе, полученных с помощью когнитивной карты, и известной динамикой (тенденций) развития ситуации в прошлом. Тенденция развития ситуации в прогнозе и реальное развитие ситуации в прошлом в этом случае формализуется направлением изменения значений факторов, выбираемым, например, из множества лингвистических значений тенденций: {«Растет», «Не меняется», «Падает»} без указания степени роста или падения значений факторов.

Если для выполнения такого сравнения используются прогнозы, полученные в оценочных шкалах приращений («Сильно растет», ..., «Сильно падает»), полученные с интуитивным представлением о текущих знаниях факторов, то сложность и некорректность самого процесса верификации прогнозов развития ситуации сильно возрастает.

Снизить субъективизм этого этапа, сократив экспертные ошибки, можно в системах моделирования, в которых параметризация когнитивной карты выполнена с помощью лингвистических шкал с «абсолютными» лингвистическими значениями, а в качестве модели прогноза используется метод без суммирования приращений. Прогнозы развития ситуации, получаемые с помощью когнитивных карт, представляются в «абсолютных» шкалах приращений, т. е. указывается точное текущее значение и возможный рост или падение значения фактора в прогнозе в лингвистическом виде с указанием уверенности, что такое изменение произойдет. Поскольку отсутствует суммирование приращений, то прогноз значения факторов считается нижней гарантированной границей прогноза.

При использовании лингвистических шкал с «абсолютными» лингвистическими значениями прогноз развития ситуации можно представить виде относительных изменений, с указанием уверенности их изменения (консонанса). Такое представление прогноз значения облегчает его сравнение с реальными изменениями значений факторов ситуации, представленных абсолютными значениями или относительными изменениями.

Компьютерная поддержка процесса верификации во всех системах, рассматриваемых в данной статье, осуществляется экспертным путем на основе графической визуализации прогнозов разви-

тия ситуации и их вербализации в оценочных шкалах приращения или в шкалах с «абсолютными» лингвистическими значениями.

### 4.3. Прямая верификация когнитивной карты

При прямой верификации правдоподобность прогноза проверяется методами, отличными от метода, которым он был получен. Прямая верификация когнитивной карты основана на анализе правдоподобности процессов в ситуации и тесно связана с анализом структуры когнитивной карты. Действительно, структура когнитивной карты определяет процессы, изменяющие значения факторов в прогнозах. При анализе структуры когнитивной карты важны «структурные картины» взаимодействия факторов. Один из нестрогих критериев правдоподобности структуры когнитивной карты рассматривался в работах Идена [30]. Он считает, что простая и понятная субъекту структура когнитивной карты, позволяющая объяснить процессы, происходящие в действительности, правдоподобна. Это простая и понятная структура в психологии называется гештальт-образом [31] наблюдаемой ситуации, представленной когнитивной картой. К сожалению, формализовать гештальт-образ когнитивной карты, из-за его субъективности, достаточно трудно и поэтому использовать его в качестве объективного критерия для верификации когнитивной карты на основе анализа правдоподобности процессов невозможно. Все это приводит к тому, что процесс верификации когнитивных карт на основе анализа процессов достаточно субъективный, содержит множество ошибок и заблуждений, связанных с индивидуальными особенностями экспертов и особенностями параметризации когнитивной карты.

В работах [32—34] предложен подход к верификации когнитивных карт, основанный на анализе типичных систематических ошибок, совершаемых их разработчиками. Выявлены два вида рисков, приводящие к ошибкам в когнитивных картах:

- риск ложной транзитивности, связанный с представлением в когнитивной карте в качестве факторов понятий разного уровня общности (ложная транзитивность возникает при установлении причинно-следственного отношения между понятиями (факторами) разного уровня общности);
- риск недопонимания математического смысла связей, что приводит к искажению содержательного смысла связей когнитивной карты относительно их математической интерпретации и, соответственно, к ошибкам в определении силы связей.

Риски первого из перечисленных видов предлагается снижать, применяя критерий соразмернос-

ти факторов по объемам понятий, позволяющий обнаружить несоразмерные по объемам понятия и понизить уровень общности путем расщепления вершин когнитивной карты на понятия более низкого уровня. Риски второго вида предлагается обнаруживать с помощью критерия понятности математического смысла конструкций карты по вербальному шаблону и снижать их, применяя для определения силы связи определенные шаблоны.

Еще один метод прямой верификации когнитивных карт предполагает применение так называемых подсистем «как-объяснения» [35] прогнозов развития ситуации. В системах моделирования когнитивных карт «Космос», «Компас» и «Канва» поддержка процесса верификации структуры когнитивной карты осуществляется с помощью встроенных подсистем объяснения прогнозов развития ситуации. Подсистемы объяснения прогнозов развития ситуации в когнитивных картах описывают последовательность процессов получения прогнозных значений факторов в виде цепочки сработавших в вершинах когнитивной карты правил. Объясняющие цепочки описывают процессы, изменяющие прогноз значения факторов, вербализуя их и облегчая таким образом понимание процессов в когнитивной карте и, соответственно, верификацию ее структуры.

В системе «Канва» блок объяснения прогноза развития ситуации обеспечивает автоматическую генерацию отчета, включающего в себя описание последовательных шагов (причинно-следственных цепочек) получения прогноз значения любого фактора ситуации. Отчет содержит положительную и отрицательную причинно-следственные цепочки. Положительная цепочка объясняет причину увеличения значения признака, а отрицательная — причину его уменьшения. В системе «Канва» предложен метод нахождения объяснений прогнозов развития ситуации, основанный на анализе матрицы прогноза развития ситуации [36]. Предложенный метод позволяет получать объяснения прогнозов развития ситуации в больших когнитивных картах.

Опираясь на подсистемы объяснений, пользователь экспертным путем определяет правдоподобность процессов, описанных в модели ситуации, и таким образом определяет правдоподобность когнитивной карты.

## 5. КОРРЕКТИРОВКА КОГНИТИВНОЙ КАРТЫ

Корректировка когнитивной карты заключается в ее изменении на основе результатов выполнения этапа верификации. В процессе корректировки могут быть изменены шкалы факторов, силы



связи факторов, удалены или добавлены новые факторы и причинно-следственные связи. Процесс корректировки субъективен, опирается на интуицию и воображение аналитиков или экспертов, создающих когнитивную карту.

Поскольку когнитивная карта — это, как правило, сильно связанный ориентированный граф, и любая дуга оказывается включенной во множество процессов, определяющих прогнозные значения множества факторов ситуации, то удаление (добавление), изменение знака или веса влияния может полностью изменить прежний прогноз развития ситуации. Компьютерные системы поддержки корректировки когнитивной карты автору этой работы неизвестны. Однако существует ряд теоретических разработок методов поддержки процессов корректировки когнитивной карты.

Наиболее известный метод основан на анализе так называемой структурной устойчивости когнитивных карт [26]. Когнитивная карта (орграф) представляется в виде обобщенной знаковой «розы», связывающей ее устойчивость со структурой. Анализ обобщенной «розы» позволяет найти изменения структуры карты, позволяющие добиться ее устойчивости [26]. Этот метод не дает однозначных решений и ориентирован на стимуляцию интеллектуальной деятельности аналитика по поиску возможных изменений орграфа. Причем формально получаемые структурные решения требуют субъективной интерпретации в предметной области, в которой была построена когнитивная карта и не всегда возможны. Метод позволяет скорректировать когнитивную карту, т. е. выявить те ошибки эксперта, которые привели к ее неустойчивости, а также найти структурные решения, т. е. решения, направленные на изменение структуры карты в целях обеспечения ее устойчивости.

В работе [37] предложен метод поиска структурных решений, основанный на представлении альтернатив управления ситуацией в модели кластерной понятийной системы предметной области. Поиск структурного решения основан вначале на поиске класса допустимых интерпретаций, а затем на поиске структурного решения (изменений структуры), попадающего в этот класс.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены системы моделирования когнитивных карт, разработанные в России. Подробно рассмотрены и проанализированы методы и подходы представления когнитивной карты в разных системах, вопросы ее параметризации и корректировки.

Автор стремился показать архитектурные особенности разных систем моделирования когнитивных карт, определяющие области применения и характерные задачи, решаемые с их помощью.

При выборе системы моделирования плохо определенной ситуации аналитику приходится решать компромиссную задачу, выбирая между точностью, адекватностью (правдоподобностью) модели ситуации и временем и трудоемкостью ее создания.

Системы «Ситуация», «Компас», «Космос» и «ИГЛА» обеспечивают небольшие время и трудоемкость создания моделей сложных предметных областей. Это связано с тем, что в системах используются одинаковые стандартные оценочные шкалы приращений для всех факторов и сил влияния факторов. Как было показано в данной статье, за малые трудоемкость и время приходится расплачиваться точностью, адекватностью (правдоподобностью) модели. С помощью этих систем целесообразно создавать абстрактные модели, не привязанные к конкретному состоянию моделируемой ситуации. Естественно, что результаты моделирования абстрактных моделей будут абстрактно выражены в терминах оценочных шкал.

Время и трудоемкость создания моделей ситуации в системе «Канва», несмотря на хорошие интерфейсы и поддержку пользователя, больше чем в упомянутых системах. Здесь для каждого фактора создаются шкалы с «абсолютными» лингвистическими значениями, кроме этого, индивидуально, по косвенным характеристикам, настраивается вес связи. Однако такая дополнительная экспертная работа позволяет снизить субъективизм когнитивной карты, превратить ее из абстрактной модели ситуации в модель, отражающую особенности текущего момента ее развития.

Прогнозы развития ситуации, полученные в системе «Канва», легче верифицируются, поскольку представлены в терминах «абсолютных» лингвистических значений, что облегчает аналитическую работу. Данную систему целесообразно применять в ситуациях поддержки принятия решений, когда важен учет текущего состояния ситуации.

Рассмотренные системы могут применяться для концептуального анализа и моделирования сложных и плохо определенных политических, экономических или социальных ситуаций, разработки стратегий управления и механизмов их реализации, разработки программных документов стратегического развития страны, региона, предприятия, фирмы и т. д., а также в качестве инструментария для непрерывного мониторинга состояния ситуации, порождения и проверки гипотез механизмов развития и механизмов управления ситуацией.

Применение систем моделирования когнитивных карт значительно расширяет горизонты аналитических возможностей экспертов, освобождая их интеллект от рутинной работы, стимулирует воображение и интуицию для генерации оригинальных решений и находок управления в запутанной ситуации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Новиков А.М., Новиков Д.А. Методология. — М.: СИНТЕГ, 2007. — 668 с.
2. Методы формирования сценариев развития социально-экономических систем / В.В. Кульба, Д.А. Кононов, С.А. Косяченко, А.Н. Шубин. — М.: СИНТЕГ, 2004. — 296 с.
3. Максимов В.И., Григорян А.К., Корноушенко Е.К. Программный комплекс «Ситуация» для моделирования и решения слабоформализованных проблем. Междунар. конф. по проблемам управления. Москва, ИПУ РАН, 29 июня — 2 июля 1999 г. — М., 1999. — Т. 2. — С. 58—65.
4. Авдеева З.К., Максимов В.И., Рабинович В.М. Интегрированная система «КУРС» для когнитивного управления развитием ситуаций // Тр. ИПУ РАН. — М., 2001. — Т. XIV. — С. 89—114.
5. Кулинич А.А., Максимов В.И. Система концептуального моделирования социально-политических ситуаций «Компас» // Сб. докл. «Современные технологии управления». Науч.-практ. семинар «Современные технологии управления для администрации городов и регионов». — М., 1998. — С. 115—123.
6. Кулинич А.А. Когнитивная система поддержки принятия решений «Канва» // Программные продукты и системы. — 2002. — № 3. — С. 25—28.
7. Горелова Г.В., Радченко С.А. Программная система когнитивного моделирования социотехнических систем // Изв. ТРТУ. Тем. вып. «Актуальные проблемы экономики, менеджмента и права». — Таганрог, 2004. — № 4 (39). — С. 218—227.
8. Коростелев Д.А., Лагерев Д.Г., Подвесовский А.Г. Система поддержки принятия решений на основе нечетких когнитивных моделей «ИГЛА» // Одиннадцатая нац. конф. по искусственному интеллекту с международным участием КИИ—2008, г. Дубна, 28 сентября — 3 октября 2008 г. — М., 2008. — Т. 3. — С. 327—329.
9. Заболотский М.А., Полякова И.А., Тихонин А.В. Применение когнитивного моделирования в управлении качеством подготовки специалистов // Управление большими системами. — 2007. — № 16. — С. 91—98.
10. Силов В.Б. Принятие стратегических решений в нечеткой обстановке. — М.: ИНПРО-РЕС, 1995. — 228 с.
11. Дж. Ван Гиг. Общая прикладная теория систем. — М.: Мир, 1981.
12. Плотинский Ю.М. Модели социальных процессов. — М.: Логос, 2001. — 296 с.
13. Checkland P.B. Systems Thinking, Systems Practice. — New York: Wiley, 1981.
14. Axelrod R. The Structure of Decision: Cognitive Maps of Political Elites. — Princeton: University Press, 1976.
15. Swain J.J. Simulation Software Boldly Goes ..., // OR/MS Today. — 2007. — Vol. 36, N 5. — P. 50—61.
16. Парсонс Т. Система современных обществ — М.: Аспект Пресс, 1997. — 270 с.
17. Давыдов С.В., Максимов В.И. Технология выбора проблемных полей из окна возможностей в SWOT-анализе // Материалы 1-й междунар. конф. «Когнитивный анализ и управление развитием ситуаций». — Москва, ИПУ РАН, октябрь 2001 г. — М., 2001. — С. 161—172.
18. Коврига С.В., Максимов В.И. Когнитивная технология стратегического управления развитием сложных социально-экономических объектов в нестабильной внешней среде // Там же. — С. 104—160.
19. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. — СПб.: Питер, 2000. — 384 с.
20. Кулинич А.А. Систематизация когнитивных карт и методов их анализа // Тр. VII междунар. конф. «Когнитивный анализ и управление развитием ситуации (CASC'2007)», Москва, ИПУ РАН. — М., 2007. — С. 50—57.
21. Kosko B. Fuzzy cognitive maps // Man-Machine Studies. — 1986. Vol. 24. — P. 65—75.
22. Нечеткие гибридные системы. Теория и практика / Под ред. Н.Г. Ярушкиной. — М.: Физматлит, 2007. — 208 с.
23. Фестингер Л. Теория когнитивного диссонанса. — СПб.: Ювента, 1999. — С. 15—52.
24. Ларичев О.И., Мошкевич Е.М. Качественные методы принятия решений. — М.: Наука, 1996. — 208 с.
25. Torgerson W.S. Theory and Methods of scaling. — New York, 1958.
26. Робертс Ф.С. Дискретные математические модели с приложениями к социальным, биологическим и экологическим задачам. — М.: Наука, 1986.
27. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Пер. с англ. — М.: Радио и связь, 1993. — 320 с.
28. Корноушенко Е.К., Максимов В.И. Управление ситуацией с использованием структурных свойств ее когнитивной карты // Тр. ИПУ РАН. — М., 2000. — Т. XI. — С. 85—90.
29. Максимов В.И. Структурно-целевой анализ развития социально-экономических ситуаций // Проблемы управления. — 2005. — № 3. — С. 30—38.
30. Eden C. Cognitive mapping // European Journal of Operational Research. — 1988. — N 36. — P. 1—13.
31. Вертгеймер М. Продуктивное мышление. — М.: Прогресс, 1987. — С. 336.
32. Абрамова Н.А., Коврига С.В. О рисках, связанных с ошибками экспертов и аналитиков // Проблемы управления. — 2006. — № 6. — С. 60—67.
33. Абрамова Н.А., Коврига С.В. Некоторые критерии достоверности моделей на основе когнитивных карт // Проблемы управления. — 2008. — № 6. — С. 23—33.
34. Коврига С.В. Верификация конкретных моделей на основе когнитивных карт / Тр. междунар. конф. «Когнитивный анализ и управление развитием ситуаций» (CASC'2009), Москва, ИПУ РАН, 17—19 ноября 2009 г. — М., 2009. — С. 47—54.
35. Поспелов Д.А. Десять «горячих точек» в исследованиях по искусственному интеллекту. Интеллектуальные системы. — 1996. — Т. 1, вып. 1—4. — С. 47—56.
36. Кулинич А.А. Верификация качественных динамических моделей. Вторая междунар. конф. «Системный анализ и информационные технологии» САИТ—2007. Обнинск, 10—14 сентября 2007 г. — М., 2007. — Т. 1. — С. 35—38.
37. Кулинич А.А. Моделирование динамических процессов в понятийной системе субъекта для генерации креативных решений // Когнитивные исследования: Сб. науч. тр. — М., 2006. — Вып. 1. — С. 94—122.

Статья представлена к публикации членом редколлегии О.П. Кузнецовым.

**Кулинич Александр Алексеевич** — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ☎(495) 334-76-39, ✉kulinich@ipu.ru.