

© 2022 г. А.Я. ФРИДМАН, д-р техн. наук (fridman@iimm.ru)
(Институт информатики и математического моделирования
Кольского научного центра РАН, Апатиты)

ОПЫТ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ МЕТОДОВ СИТУАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИСКРЕТНЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ¹

Рассматривается применение идей искусственного интеллекта в задачах ситуационного моделирования и управления дискретными пространственными динамическими системами. Представлен комплекс методов синтеза и количественного сопоставления альтернативных структур и сценариев развития объекта моделирования, синтезированных с учетом предпочтений лица, принимающего решения. В качестве примера реализации указанных методов описана ситуационная система моделирования, ядром которой служат концептуальная модель предметной области и интегрированные с ней экспертная и геоинформационная системы. Модель формализована в парадигме семиотической формальной системы, что позволило дать строгие определения основным понятиям ситуационного управления Д.А. Поспелова, отсутствующие в прототипах, и за счет этого обеспечить унифицированную обработку разнородной информации, автоматизировать детальный анализ консистентности модели и ее оперативную модификацию.

Ключевые слова: промышленно-природный комплекс, концептуальная модель предметной области, структурный синтез, ситуационное управление, интеллектуальная прикладная система.

DOI: 10.31857/S0005231022060113, EDN: ADHKCB

1. Введение

В статье рассматривается задача интеллектуализации методов исследования сложных динамических пространственных систем — экосистем, технологий добычи полезных ископаемых, административных территорий и т.п. Они названы автором промышленно-природными комплексами (ППК) и включают в себя промышленные подсистемы, чьи режимы работы нужно оптимизировать по некоторому критерию качества, и природные компоненты, задающие ограничения на работу технических объектов.

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания ИИММ КНЦ РАН (НИР «Разработка теоретических и организационно-технических основ информационной поддержки управления жизнеспособностью региональных критических инфраструктур Арктической зоны Российской Федерации», проект № FMEZ-2022-0023).

Актуальность темы связана с порожденным развитием Интернета вещей (IoT) повышением доступности большого количества разнородных временных рядов, содержащих значения различных характеристик составных частей ППК, а также с ростом риска возникновения и масштабов ущерба от комплексных (зависимых) отказов, вызванных усложнением и взаимопроникновением различных ППК, сочетанием случайных факторов и несанкционированными воздействиями, в частности, хакерства.

При компьютерных исследованиях сложных систем обычно переходят либо к моделированию средних значений характеристик (энтропии, математических ожиданий и других статистических свойств) [1, 2], либо к анализу их графовых свойств, например, достижимости тех или иных состояний, с помощью сетей Петри [3] или E-сетей [4]. Если требуется оценивать количественные параметры более детально, необходимо вернуться к причинно-следственным моделям, в той или иной степени отражающим реальные потоки информации, материалов, сигналов (далее будем называть их *ресурсами*), которые циркулируют в системе. Для сложных систем обычно не удается найти достаточно адекватную аналитическую модель, поэтому используют имитационные модели, изоморфные (в заданном масштабе) реальному объекту. С такой целью часто применяют модели системной динамики (например, [5]) или их аналоги, но они не рассчитаны на объекты моделирования с иерархической структурой, вследствие чего быстро теряют консистентность при росте сложности реальной системы.

Построение иерархий возможно по нескольким принципам, основные из них — разделение общей функции системы на подфункции, организационная или структурная декомпозиция и декомпозиция по состояниям. Программное обеспечение для реализации перечисленных видов декомпозиции поддерживается соответственно методами SADT [6], DFD [7] и STD [8]. Для исследования сложных систем необходимо организовать сочетание и совместное применение всех указанных видов декомпозиции, чего не позволяет ни один из упомянутых программных продуктов. Преодолеть эту проблему предполагалось с помощью объектно-ориентированного языка программирования UML [9], но и он не свободен от недостатков, главный — необходимость писать все программные модули в одной среде программирования и встраивать их в диаграмму классов, что затрудняет применение ранее созданных модулей и не допускает применения интеллектуальных процедур обработки информации.

Судя по известным автору публикациям, наиболее близка к описанной в настоящей работе ситуационной системе моделирования (ССМ) [10, 11] интеллектуальная гибридная система поддержки принятия решений РДО («Ресурс-Действие-Объект», см., например, [12]), предназначенная для моделирования сложных систем, функционирование которых требуется представить в форме производственных правил. Как и в ССМ, в РДО объект моделирования рассматривается как гибкая дискретная неупреждаемая система, непрерывные параметры дискретизируются с шагом, позволяющим достаточ-

но точно описать их изменения, используется дискретно-событийный подход к имитации [13]. Допускается построение иерархических моделей и подключение внешних имитаторов работы составных частей системы. В плане рассматриваемой здесь задачи моделирования ППК недостатки РДО состоят в следующем:

- основным механизмом моделирования служит логический вывод над системой продукций, что снижает эффективность моделирования при росте сложности модели;

- не обеспечивается удобное сопоставление альтернативных вариантов реализации исследуемого объекта;

- иерархия модели не согласуется с организационной структурой объекта моделирования, она либо структурирует производственные правила с целью повышения скорости логического вывода, либо порождается системой классов в рамках объектно-ориентированного подхода;

- не предусмотрены средства учета географических характеристик исследуемого объекта, которые весьма существенны для ППК.

Общий недостаток известных автору систем моделирования для целей исследования ППК — отсутствие в них средств полноценной реализации всех аспектов ситуационного подхода, наиболее перспективного для решения поставленной задачи.

В связи с изложенным далее описана ССМ, не имеющая отмеченных выше недостатков, которая разработана при участии и под руководством автора в парадигме теории иерархических систем М. Месаровича [14] и теории ситуационного управления Д.А. Поспелова [15] и отличается от аналогов и прототипов в следующем:

- ядро ССМ составляет открытая для оперативной модификации иерархическая ситуационная концептуальная модель (СКМ) ППК, отражающая его организационную структуру и взаимодействия между составными частями. Эта модель позволяет учитывать все вышеупомянутые типы декомпозиции ППК, осуществлять детальный контроль консистентности при создании и корректировках модели, поддерживать современный сценарный подход к имитации, автоматически генерировать исполнительную среду для выполнения вычислительных экспериментов, интегрировать в ССМ подмодели различной природы, включая специализированную экспертную и геоинформационную системы;

- для СКМ конкретизирован ситуационный подход к моделированию, в том числе предложены формальные определения ситуации и сценария, отсутствующие у прототипов, что дало возможность корректно формировать, исследовать и сравнивать ситуации в статике и динамике (в имитационном режиме), реализовать все основные аспекты ситуационного управления [15] и традиционную для интеллектуализированных систем технологию «быстрого прототипа», а также выявлять и синтезировать наиболее предпочтительные для лица, принимающего решения (ЛПР), альтернативы структуры ППК,

обеспечивать детальный контроль корректности модели на всех этапах ее работы;

— в модели не используется нечеткая логика, примененная в ряде реализаций метода ситуационного управления, например, [16]. Это позволяет исследовать ППК с целью поиска так называемых «узких мест», которые порождают наиболее опасные зависимые отказы, поскольку такие отказы появляются при определенных (детерминированных) сочетаниях параметров частей ППК. Кроме того, появляется возможность строить модели нештатных и чрезвычайных ситуаций как расширение модели нормального функционирования ППК, используя один и тот же аппарат.

Повышение мощности вычислительных систем, развитие многопроцессорных методов обработки информации и Интернета вещей, соответствующий рост объема доступной информации о параметрах ППК и т.д., — все это создает новые возможности применения причинно-следственных моделей для исследования сложных систем [17], поскольку лишь такие модели позволяют выявлять зависимые отказы.

2. Синописис ситуационной системы моделирования

Модель ППК [10, 11] формируется из трех типов сущностей (элементов): объектов $o_i \in O$ ($i = \overline{1, N_O}$), процессов $p_j \in P$ ($j = \overline{1, N_P}$) и ресурсов (данных) $r_k \in R$ ($k = \overline{1, N_R}$) (прописными буквами обозначены множества элементов СКМ). Конструирование модели начинается с построения дерева *объектов* — составных частей ППК, в результате объекты распределяются по L уровням иерархии управления:

$$(1) \quad O = \{o_i\} = \left\{ \alpha o_{\beta\alpha}^{\gamma} \right\} = \bigcup_{\alpha=1}^{N_L} O_{\alpha},$$

где $\alpha = \overline{1, N_L}$ — индекс уровня, на котором находится некоторый объект;

$\beta_{\alpha} = \overline{1, N_{\alpha}}$ — место объекта на уровне;

$\gamma = \overline{1, N_{\alpha-1}}$ — номер объекта, управляющего данным на предыдущем уровне.

Иерархия (1) отражает организационную структуру ППК, а также пространственное расположение объектов: при разработке модели хотя бы один объект в каждой ветви дерева привязывается к карте с помощью встроенной геоинформационной системы (ГИС). Так устанавливается и поддерживается взаимно-однозначное соответствие между концептуальной схемой и географическими характеристиками ППК, что обеспечивает равноправное использование последних на всех стадиях моделирования. Взаимодействия объектов задаются посредством назначения *ресурсов* — любых информационных или материальных потоков/сигналов, которыми обмениваются объекты. Ресурсы соответствуют переменным в уравнениях модели. Трансформации ресурсов внутри объектов формализуются связыванием каждого из них с рядом *процессов* получения некоторого множества выходных ресурсов из множества

входных ресурсов. При создании модели в нее вводятся структурные альтернативы реализации ППК либо декомпозицией объектов на подобъекты с назначением отношения ИЛИ, либо указанием альтернатив обмена ресурсами (наборами ресурсов) для каких-либо объектов, а процессы приписываются определенным объектам, формируя основные отношения СКМ:

– дерево объектов $H = \bigcup_{\alpha=1}^{N_{L-1}} H_{\alpha}$, где $H \subseteq O_{\alpha-1} \times B(O_{\alpha})$; (B – разбиение множества);

– отношение порождения объектами входных ресурсов процесса $PO \subseteq P \times B(O)$;

– отношение порождения процессами выходных ресурсов объекта $OP \subseteq O \times B(P)$.

В процессе имитации каждое выполнение одного из процессов переводит модель из текущего состояния в другое. Для компьютерной спецификации этой процедуры любой элемент модели атрибутируется *исполнителем*, определяющим способ реализации этого элемента. У процессов исполнитель организует доступ к имитатору процесса, для ресурсов — задает способ генерации последовательностей значений ресурса, у объектов — формирует их графическое представление. Исполнители процессов могут иметь любую природу (логические, аналитические и др.), но должны моделироваться разностным уравнением. В современной терминологии исполнители процессов реализуют их цифровых двойников, а цифровой двойник объекта получается агрегированием цифровых двойников приписанных к нему процессов с возможностью учета пространственных параметров этого объекта.

Атомарная информация в ССМ — *факт*. Это имя и список значений одного ресурса. Факты делятся на «факты за», в которых перечисляются возможные значения ресурса, и «факты против», задающие недопустимые значения ресурса:

$$(2) \quad \begin{aligned} &\text{«факты за»}: r_k \in R_k^+, \text{ где } R_k^+ \subset R_k, \\ &\text{и «факты против»}: r_k \notin R_k^-, \text{ где } R_k^- \subset R_k, \end{aligned}$$

а R_k , $k = \overline{1, K}$ — области значений (*домены*) соответствующих ресурсов, дискретные или дискретизированные, поскольку ППК исследуются в классе дискретных систем.

Исходная ситуация есть список фактов вида (2), задаваемых пользователем при постановке задачи сеанса моделирования и трактуемых системой как текущая цель анализа модели. *Полная ситуация* формируется автоматически дополнением исходной ситуации до связного фрагмента модели, содержащего все ресурсы исходной ситуации, и рассматривается как область интересов ЛПР в этом сеансе. Корневой объект такого фрагмента называется *объектом принятия решения* и определяет организационный уровень, которому соответствует данная полная ситуация; она может включать несколько возможных структур ППК из-за введенных ранее альтернатив. Каждая такая безыз-

быточная (не содержащая вариантов) альтернативная структура называется *достаточной ситуацией* (ДС), поскольку соответствует конкретному варианту реализации полной ситуации, из которой она получена, и формирует корректное задание на имитацию. Некоторая достаточная ситуация является *управляющей*, если требует перехода из текущего класса ситуаций в другой путем выбора альтернативной ДС. В таком случае ССМ предлагает ЛПР предпочтительную структуру из нового выбранного им класса следующим образом. Для статического сопоставления ДС с другими ДС того же объекта принятия решений каждому объекту приписывается обобщенный критерий качества (ОКК) [18], представляющий собой среднеквадратическое значение взвешенных относительных отклонений скалярных критериев качества этого объекта от их номинальных значений, задаваемых вышестоящим ЛПР. Он же задает допуски на отклонения скалярных критериев от их номинальных значений, обратные значения этих допусков используются как коэффициенты важности (веса) некоторого скалярного критерия, что согласуется со здравым смыслом. Нулевое значение ОКК возможно только при идеальном функционировании объекта (полном совпадении всех критериев с пожеланиями ЛПР верхнего уровня); ОКК будет равен 1, когда все критерии находятся на грани допусков, и существенно превысит единицу, если режим работы объекта станет недопустимым [19]. Это позволяет быстро выявить источник проблем, найдя самый нижележащий объект с большим значением ОКК. Удельная чувствительность ОКК к изменениям скалярных критериев используется в СКМ для вычисления обобщенных затрат на удовлетворение этого критерия и дает основу для сопоставления ДС в статике, т.е. *классификации ситуаций*. В один класс относятся те ДС, в которых один и тот же скалярный критерий вносит минимальный вклад в ОКК, в пределах одного класса ситуация тем лучше, чем меньше вклад этого критерия в ОКК. При необходимости каждую ДС можно более детально анализировать в имитационном режиме, для чего СКМ автоматически синтезирует соответствующую вычислительную сеть, обеспечивая корректное подключение исполнителей задействованных элементов модели и синтез баз данных для хранения исходных данных и результатов имитации. *Сценарием* в ССМ называется последовательность ДС для одного и того же объекта принятия решений, рассмотренная в одном сеансе имитации при одних исходных данных.

3. Методы искусственного интеллекта в ССМ

Главным средством интеллектуализации процедур моделирования в ССМ служит встроенная статическая продукционная экспертная система (ЭС) с комбинированным (двунаправленным) выводом и двумя решателями — детерминированным и вероятностным. Наряду с СКМ и ГИС, ЭС является базовой подсистемой ССМ, применяемой на всех этапах моделирования и решающей следующие основные задачи:

— доопределение, классификация и обобщение ситуаций [15] с целью выявления наиболее эффективных структур ППК в каждом классе ситуаций.

Результаты этих процедур сохраняются в виде правил ЭС ССМ и используются во всех процедурах обработки ситуаций;

— реализация исполнителей процессов и ресурсов, еще не имеющих программ имитации, с целью построения «быстрого прототипа» модели. Если ЭС назначена исполнителем некоторого ресурса, все его возможные значения должны вычисляться в следствиях продукций ЭС. Если ЭС играет роль имитатора какого-либо процесса, все значения всех его входных ресурсов должны использоваться в предпосылках продукций, а все значения всех его выходных ресурсов — определяться в следствиях продукций;

— сопровождение пространственно-временных функций [20], используемых для учета и корректировки географических характеристик объектов; в некоторых из запросов к ГИС применяются вероятностные форматы данных. В левые части продукций ЭС ССМ можно включать следующие функции этого типа: *в_течение*, выполняющая ретроспективную выборку данных за определенный интервал времени; *соседние*, отбирающая объекты по географическому положению; *сходные*, возвращающая объекты, которые имеют один и тот же заданный набор характеристик; и *ближайший*, определяющая объект, наиболее близкий к заданным координатам. Поскольку все пространственно-временные функции возвращают логическую переменную, показывающую успешность запроса, допускается однократное вложение различных функций, когда результат запроса к «внутренней» функции используется как условие запуска «внешней»;

- анализ чувствительности результатов моделирования к вариациям исходных данных и параметров ППК;

- контроль корректности и разрешимости модели в стиле семиотической формальной системы [15, 20] путем анализа типов и категорий элементов модели, правильности сечений специальных частичных функций, определенных на отношениях СКМ, и предложений вычислимости элементов модели. Частичные функции обозначаются теми же символами, которые использованы в названиях отношений, но строчными буквами, а их сечения по некоторому элементу или подмножеству областей определения — такими же строчными, но жирными, символами (пример см. ниже, теоремы 1 и 2). Разрешимость проверяется в двух аспектах: потенциальная достижимость всех элементов СКМ при завершении каждой итерации ее конструирования и изменения, а также при анализе ситуаций — с целью проверки возможности построения минимального фрагмента СКМ, который описывает текущую полную ситуацию с учетом всех содержащихся в ней альтернатив.

3.1. Семиотический подход к моделированию ППК

Формальная система, описывающая ядро ССМ (СКМ + ЭС + ГИС), включает:

— *алфавит* из: символов, образующих имена элементов модели; функциональных и предикатных символов, обозначающих операции, отношения и связи этих элементов; специальных и синтаксических символов;

- множество формул, включающих символы алфавита и соотношения для вычисления функций и множеств, определенных в схеме СКМ;
- выражения вычислимости для всех элементов модели;
- аксиомы вычислимости всех ресурсов, внешних по отношению к ядру ССМ;
- правила вывода: следование с равенством

$$(3) \quad F_1, F_1 = F_2, \quad F_2 \Rightarrow F_3 \mid -F_3$$

и непосредственное следование

$$(4) \quad F_1, F_1 \Rightarrow F_2 \mid -F_2.$$

В (3) и (4) $F_{(*)}$ — любые формулы, построенные по правилам этой формальной системы.

Концептуальная модель анализируется «снизу-вверх» циклами из следующих шагов.

Шаг 1. По правилу (4) выводятся все следствия из формул и аксиом.

Шаг 2. По правилам (3), (4) выводятся все следствия из аксиом и формул из шага 1.

Шаг 3. По предложениям вычислимости расширяется список вычисляемых объектов.

Ситуационная концептуальная модель относится к семиотическим моделям [15], поскольку процедуры обработки ситуаций (доопределение исходной ситуации до полной; классификация ситуаций по ОКК и когнитивная классификация, представленная далее в разделе 3.3; обобщение ситуаций по прагматическим признакам) используют три соответствующие группы логико-трансформационных правил, которые хранятся в ЭС ССМ и оперативно меняют состав модели.

Применение унифицированных списковых форматов для представления ресурсов различных типов (числовых, строковых и др.) дает возможность вычислять одни и те же параметры аналитическими, логическими процедурами, а также средствами ГИС, что относится к элементам новизны описываемой системы моделирования.

Существенная часть контроля корректности СКМ — проверка условий, гарантирующих иерархичность структуры модели и, в частности, обеспечивающие выполнение принципа приоритета действия [14] для иерархических структур. Рассмотрим их несколько подробнее. Дадим их определения, а затем контролируемые соотношения (теоремы, доказательства которых [11] опущены для экономии места).

Анализ корректности структуры модели основан на отношениях порождения.

Определение 1. Отношение $OO \subseteq O \times B(O)$, которое сопоставляет каждый объект модели всем другим объектам, чьи выходные ресурсы (без

промежуточных объектов, непосредственно) подаются на входы данного объекта, называется отношением порождения объектов.

Теорема 1. $oo(o_i) = po(oo(o_i)) \setminus \{o_i\}$,

где символ \setminus – операция взятия разности множеств; отношение PO введено выше, а отношение $OA \subseteq O \times B(P)$ связывает объект со множеством его внутренних процессов.

Определение 2. Отношение $PP \subseteq P \times B(P)$, которое сопоставляет каждый процесс модели всем другим процессам, чьи выходные ресурсы (без промежуточных процессов, непосредственно) подаются на входы данного процесса, называется отношением порождения процессов.

Теорема 2. $pp(p_i) = op(po(p_i)) \setminus \{oa^{-1}(p_i)\}$.

Соотношения теорем 1 и 2 проверяются для поиска циклов по ресурсам. Цикличность не всегда означает некорректность в СКМ, вызванные этим конфликты определяются в ходе имитации. Например, в приложениях, касающихся экономических связей между объектами модели, цикличность взаимодействий относится к их нормальным и часто встречающимся свойствам. Поэтому циклы, найденные с применением теорем 1 и 2, выдаются для утверждения либо запрета пользователю, который учитывает семантику ППК. Автоматически запрещаются только пути между элементами альтернативных ДС, а также объектами-синонимами и объектами из их множеств подчиненности.

Кроме ограничений, содержащихся в теоремах 1 и 2, при контроле СКМ проверяются соотношения другого типа, связанные с корректностью структуры иерархии. В частности, принцип приоритета действия [14] запрещает передачу материальных ресурсов от суперобъектов их подобъектам, поскольку подобные связи «обходят» межуровневые процессы настройки и агрегирования данных, что способно нарушить координируемость элементов иерархии. Тот же принцип ограничивает отношения следования между параметрами межуровневых процессов. Еще одна группа ограничений связана с выбором того или иного типа декомпозиции в иерархии (многоэшелонной, многослойной или стратифицированной [14]). Все структурные ограничения проверяются в СКМ с помощью транзитивных замыканий отношений порождения (см. определения 1 и 2) OO^* и PP^* . Так как процессы определяют динамику моделирования и порождения ресурсов в СКМ, с каждым процессом связана процедура контроля, обеспечивающая корректность работы модели в ходе имитации. Этот набор процедур контроля основан на новом определении шаблона процесса как подструктуры модели. Шаблон дает концептуальное описание преобразования множества входных ресурсов от других объектов внутри того объекта, к которому приписан процесс-владелец шаблона.

Структура схемы шаблона та же, что и у схемы модели в целом [11]:

$$(5) \quad S_{III} = \langle O_{III}, P_{III}, H_{III}, OP_{III}, PO_{III} \rangle,$$

где $O_{III} \subset O$, $P_{III} \subset P$, $H_{III} \subset H$, $OP_{III} \subseteq O_{III} \times B(P_{III}) \subset OP$, $PO_{III} \subseteq P_{III} \times B(O_{III}) \subset PO$.

Теорема 3. $O_{III} = \mathbf{po}(\mathbf{pp}(p_i))$;

$$P_{III} = (\mathbf{pp}(p_i)) \cup (\mathbf{oa}(\mathbf{po}(p_i))) \cap (\mathbf{pp}^*(p_i)) \cup (\mathbf{pp}^*)^{-1}(p_i).$$

Теоремы 1–3 позволили доказать следующие утверждения, значительно упростившие процедуры анализа СКМ при ее разработке и оперативной модификации.

Теорема 4. *Ситуационная концептуальная модель разрешима, если:*

- она корректна по правилам назначения имен и отношений;
- разрешим каждый специфицированный в модели шаблон для внутренних процессов и процессов агрегирования.

Теорема 5. *Если успешно проведены все процедуры контроля, то:*

- ситуационная концептуальная модель консистентна (связна и непротиворечива);
- возможен автоматический синтез исполнительной среды для имитации.

Далее проверяются свойства межуровневых процессов, необходимые для корректности иерархии объектов (согласованности и координируемости взаимодействий объектов модели). Процедура проверки основана на отношениях следования, в том числе заданных неявно.

На этой стадии анализа модели исходят не от объектов или процессов, как на вышеописанных этапах, а от конкретного ресурса (настроечного параметра или выходного значения функции качества какого-либо объекта). Цель проверки — запрет циклов по таким ресурсам, поскольку они относятся к информационным ресурсам, и их вычисление не итеративно. Здесь также используются сечения транзитивных замыканий отношения PP (см. определение 2), начиная от того процесса p_i , на выходе которого имеется данный ресурс. На каждой итерации вычисления сечений расширяется множество процессов P_{k+1} , для которых строятся эти сечения отношения порождения процессов (см. теорему 2): в него включаются процессы, найденные на предыдущей итерации,

$$(6) \quad \begin{aligned} P_0(p_i) &= \{p_i\}; \\ P_{k+1}(p_i) &= P_k(p_i) \cup \mathbf{pp}(P_k(p_i)). \end{aligned}$$

Вычисление сечений (6) прекращается и декларируется конфликт, если на каком-либо шаге k множество $P_k(p_i)$ содержит процессы, соответствующие условию констатации конфликта, которое установлено заранее. Если конфликт не возникает, расчет (6) продолжается до совпадения множеств $P_{k+1}(p_i)$ и $P_k(p_i)$, что считается (для выбранного ресурса) отсутствием конфликтов.

Доказано, что принцип приоритета действий [14] выполняется, если не диагностировано *основное условие конфликта*, которое описывает на языке СКМ отсутствие иерархических связей по материальным ресурсам, идущих вдоль связей подчиненности:

$$(7) \quad (\exists p_m \in P_{k+1}(p_i)) ((oa^{-1}(p_m) \in O_\alpha) \wedge (oa^{-1}(p_i) \in O_\beta) \wedge (\beta < \alpha)).$$

Это необходимое условие корректности иерархии.

Дополнительные условия конфликта не обязательны, их можно задавать для реализации различных типов иерархий:

— «иерархия неравенства», в которой запрещен обмен между объектами одного уровня иерархии, при этом в (7) вместо строгого неравенства ставится нестрогое:

$$(8) \quad (\exists p_m \in P_{k+1}(p_i)) ((oa^{-1}(p_m) \in O_\alpha) \wedge (oa^{-1}(p_i) \in O_\beta) \wedge (\beta \leq \alpha));$$

— «строгая вертикаль», запрещающая связь объектов различного подчинения, когда множества (6) могут содержать только процессы из таких пар объектов, один из которых входит во множество подчиненности другого, т.е. является его предком или потомком в иерархии (1). В подобной структуре дополнительное условие конфликта имеет вид:

$$(9) \quad (\exists p_m \in P_{k+1}(p_i)) ((oa^{-1}(p_m) \notin \underline{h}(oa^{-1}(p_i))),$$

где $\underline{h}(\ast)$ – множество подчиненности объекта(ов), специфицированного(ых) в скобках;

— «стратифицированная иерархия», где обмен информацией допустим только для объектов на соседних с исходным уровнях (их количество задается параметром $\Delta\alpha$), тогда в (6) допускаются только процессы из подобных объектов. Дополнительное условие конфликта в таком случае аналогично (7), но с другим неравенством:

$$(10) \quad (\exists p_m \in P_{k+1}(p_i)) ((oa^{-1}(p_m) \in O_\alpha) \wedge (oa^{-1}(p_i) \in O_\beta) \wedge (\beta > \alpha + \Delta\alpha)).$$

Условия (7)–(10) (если это не ведет к противоречиям) можно назначать совместно, они позволили доказать описательные возможности СКМ в виде следующей теоремы.

Теорема 6. Все основные типы иерархий, описываемые теорией [15] (эшелоны, страты, слои), реализуемы в структурах вышеописанной ситуационной модели.

3.2. Управление выводом в СКМ

С учетом специфики решаемых задач и форматов представления информации для экспертной системы ССМ разработана оригинальная динамическая стратегия управления комбинированным логическим выводом, учитывающая внутреннюю структуру знаний для ускорения вывода. Моделирование ведется в универсуме $U = R_1 \times R_2 \times \dots \times R_k$. Рассмотрим для примера

детерминированный вывод, поскольку он применяется в режиме имитации, т.е. наиболее часто. Здесь перебор вариантов можно сократить, «сужая» домен ресурса при появлении в БД ЭС «факта против», например, на l -м шаге вывода:

$$(11) \quad R_k^{l+1} = R_k^l \setminus R_k^-,$$

поэтому далее принято, что в БД есть только «факты за» из (2).

Детерминированные продукции в экспертной системе ССМ имеют вид

$$(12) \quad P_s : A_s \supset C_s, \quad s = \overline{1, S},$$

где A_s и C_s – соответственно антецедент и консеквент продукции, представляющие собой конъюнкции конечного количества фактов вида (2). Если какие-либо из них имеют формат «факта против», они для удобства сравнения с фактами в БД при выводе преобразуются в формат «фактов за» вычислением дополнения запрещаемого ими подмножества значений ресурса относительно текущего значения его домена. Цель вывода по структуре аналогична A_s и C_s в (12):

$$(13) \quad G_l = G_{1l} \wedge G_{2l} \wedge \dots \wedge G_{ml} \wedge \dots \wedge G_{Ml},$$

где G_{ml} , $m = \overline{1, M}$, имеют вид (2).

Общая идея управления выводом аналогична методам наискорейшего спуска: при неоднозначности выбора продолжать вывод для тех фактов и продукций из конфликтного множества (при прямом выводе) или конъюнктов цели (при обратном выводе), которые в максимальной степени снижают уровень недоопределенности текущего состояния вывода.

Экспертная система начинает работать в режиме обратного вывода, его особенность в ССМ состоит в том, что с C_s сравниваются не все G_m , а только содержащие переменные, о которых есть факты (2) в БД ЭС. Если таковых нет, ЭС переходит в режим прямого вывода. При этом эвристическая стратегия ускорения вывода реализуется путем разрешения конфликта выбором из конфликтного множества

$$(14) \quad CS_l = \{P_{1l}, P_{2l}, \dots, P_{sl}, \dots, P_{Nl}\}$$

той продукции, после применения которой останется неопределенным минимальное количество сочетаний значений «общих» переменных (ресурсов), содержащихся как в консеквенте этой продукции, так и в конъюнктах текущей цели (13). Для каждого из таких ресурсов вычисляются разности множеств значений R_k^+ в консеквенте продукции и соответствующем конъюнкте цели, а затем рассчитываются мощности полученных разностей. Выполняется та продукция из (14), для которой минимальна мощность декартова произведения этих разностей для входящих в нее «общих» ресурсов.

Если значения ресурсов в домене упорядочены (например, это дискретные или дискретизированные значения числового ресурса), то в соотношениях (2)

и (12) можно использовать знаки «предшествует» и «следует за», аналогичные отношениям «больше» и «меньше» в арифметике. Такие знаки позволяют ускорить сокращение доменов ресурсов (11) и, соответственно, укоротить цепочки вывода.

Тот же подход применим к вероятностному выводу, предусмотренному в ЭС ССМ, здесь он не приводится из-за громоздкости математических формулировок.

По известным причинам (отсутствие числовых функций качества интеллектуальных систем) нет возможности дать аналитическую оценку эффективности рассмотренной стратегии комбинированного вывода, в тестовых прогонах результат достигался на 10–40% быстрее, а для упорядоченных доменов выигрыш достигал 70%.

3.3. Когнитивная классификация ситуаций в СКМ

Кроме организации работы встроенной ЭС, методы искусственного интеллекта используются в ССМ для решения одной из базовых задач ситуационного управления [15] — задачи классификации ситуаций. Проблема в том, что результаты классификации с помощью представленного выше числового ОКК зависят не только от самой структуры объекта, но и от значений ресурсов. В ходе классификации ситуаций по ОКК строится основное отображение ситуационного управления, в котором каждому классу ситуаций (все ситуации этого класса считаются эквивалентными) сопоставляется некоторое управляющее воздействие. Как уже говорилось, в ССМ таким воздействием является изменение структуры ППК путем его перевода из текущей ДС в одну из ДС (назовем ее желаемой ситуацией) нового класса, выбранного по предпочтениям ЛПР. Рекомендовать ЛПР в качестве желаемой имеющуюся в архиве ситуаций ССМ оптимальную (по ОКК) ситуацию из нового класса не представляется разумным, поскольку она была выявлена при определенных значениях ресурсов, не (или очень редко) совпадающих с их текущими значениями. Поэтому требуется строить основное отображение, учитывая только структурные особенности ДС и абстрагируясь от значений ресурсов. С такой целью предложено применить в ССМ когнитивный подход [21] к построению классов, где экземпляры каждого класса не равноправны, как в «классической» классификации на основе отношения эквивалентности, но делятся на более или менее типичные по степени сходства с наиболее типичным представителем класса — *прототипом*. Построение основного отображения, инвариантного к значениям ресурсов (*когнитивного отображения ситуаций*), выполняется следующим образом. При классификации ситуаций по ОКК в архиве сохраняется не только оптимальная ДС каждого класса (она, очевидно, есть прототип в этом классе), но и несколько близких к ней (субоптимальных) ДС, у которых значение ОКК несущественно (на 10–15%) ниже, чем у прототипа. Затем вычисляется семантическое расстояние [22] между прототипами и субоптимальными ДС разных классов, и когнитивное отображение формируется из тех пар ситуаций, семантическое расстояние между кото-

рыми минимально. Полученное отображение не только перестает зависеть от значений ресурсов, но и позволяет минимизировать изменения текущей структуры, чтобы уменьшить возмущения в реальной системе при переводе ППК из одного класса ситуаций в другой (подобные задачи возникают при минимизации ripple effect [23] в ценах поставок). Осталось лишь разработать подходящую меру семантической близости ДС с учетом их иерархической структуры.

Таких мер известно достаточно много (например, [22]), в основном это *геометрические меры*, где экземпляр объекта формализуется точкой в пространстве свойств, и собственно *семантические метрики* для иерархических структур (онтологий, таксономий и т.п.), использующие расстояние между вершинами графа объекта. Последние не годятся в рассматриваемой здесь задаче, так как требуется иметь интегральную оценку различий между ДС, не связанную непосредственно с маршрутами между вершинами графа модели. Поэтому для ССМ предлагается модифицировать нормализованную модель Тверски [24], где расстояние между объектами a и b дается формулой

$$(15) \quad S(a, b) = \frac{f(A \cap B)}{f(A \cap B) + \alpha f(A \setminus B) + \beta f(B \setminus A)}.$$

В (15) A и B – множества имен свойств объектов; f – знакоположительная функция; α и β – положительные веса, назначаемые свойствам, которые одинаковы и различны у оцениваемых объектов. Обычно f – мощность множества-аргумента. Непосредственно модель (15) неприменима в ССМ, поскольку не позволяет учесть иерархичность структуры ситуации. Очевидно, в иерархии различия нижележащих уровней должны меньше влиять на расстояние между двумя ситуациями, чем различия на верхних уровнях. Поэтому расстояние между двумя иерархическими структурами предложено вычислять на базе модифицированной *иерархической модели Тверски*:

$$(16) \quad S(a, b) = \frac{1}{N_L} \sum_{\alpha=1}^{N_L} \frac{1}{\alpha} S_{\alpha}(a_{\alpha}, b_{\alpha}),$$

где S_{α} определяются согласно (15) для подмножеств свойств объектов на уровне α .

Поскольку (16) есть линейная свертка нескольких нормализованных моделей Тверски, она сохраняет свойства функций меры. Взвешивая слагаемые в (16), можно вводить экспертные предпочтения по уровням иерархии.

4. Приложения системы ситуационного моделирования

К настоящему моменту исследованы следующие области применения ССМ [11, 20]: улучшение процесса переработки минерального сырья на основе технологического графа для хибинских руд сложного вещественного состава; ретроспективный анализ состояния лесных экосистем с целью мониторинга

их загрязнения в условиях техногенного воздействия; оценка удароопасности горного массива в зоне горных работ; моделирование среднесрочных задач диспетчера в энергетике; выбор технологий обогащения сложного минерального сырья; технико-экономическая оценка рудных месторождений; исследование безопасности электроэнергетических систем путем защиты электрических сетей от перенапряжений. Приведем их краткое описание.

Задача оптимизации процесса переработки минерального сырья решалась в основном с помощью СКМ, отображающей технологический граф добычи и комплексной переработки руды как совокупности различных схем переработки со связями по их входным и выходным продуктам. Эти схемы включаются в граф согласно стадии освоения, которая должна соответствовать заданному периоду планирования. Приложение ССМ разрабатывалось для апатито-нефелиновой руды при долгосрочном планировании и формировала план переработки (сетевой график) — длительности и интенсивности применения технологий из заданного набора технологических схем — для Хибинского месторождения по критерию минимума суммарных затрат либо максимуму прибыли с учетом имеющихся ограничений на ресурсы и спрос по продуктам переработки. ГИС в этой задаче не применялась, перебор вариантов шел по ветвям технологического графа.

Система ретроспективного анализа вреда антропогенных выбросов по состоянию лесных массивов отображала динамику ущерба от выбросов в промышленных районах Мурманской области (города Никель и Мончегорск) на топографической основе путем сравнения параметров хвойных деревьев из загрязненных районов с биологически схожими деревьями из чистых зон (Кандалакшский заповедник). Разработанное приложение ССМ показало ухудшение ситуации после перехода металлургического производства в Мончегорске с местного на более загрязненное серой норильское сырье. В решении этой задачи участвовали только геоинформационная и экспертная система ССМ.

Наиболее успешной была апробация ССМ для проблемы прогнозирования горных ударов на Юкспорском руднике АО «Апатит». В приложении ССМ рудное тело разбивалось на условные элементы — параллелепипеды, текущее состояние каждого из них оценивалось вектором результатов прогноза по данным нескольких (от 3 до 9) независимых частных методик, список которых задавали маркшейдеры. Задачу комплексного прогноза решала ЭС ССМ путем логического вывода на вероятностных правилах, разработанных с участием экспертов. В течение восьми лет это приложение было штатной частью служб Кировского рудника и позволило вдвое снизить количество «ложных тревог», когда работа на участке останавливалась, но горный удар не происходил.

В каждом из указанных приложений апробировались различные аспекты представленной здесь информационной технологии, однако, к сожалению автора, до сих пор не удалось исследовать все основные идеи разработанного подхода в одном приложении; это предполагается сделать в будущем.

В целом, приложения ССМ позволили сократить сроки принятия решения при изменении ситуации и повысить объективность решений из-за улучшения информационной обеспеченности ЛПР.

5. Заключение

Рассмотрены некоторые аспекты разработки ситуационного подхода к моделированию сложных динамических пространственно-распределенных комплексов, преимущественно использующие методы искусственного интеллекта. Подробно рассмотрены динамическая стратегия управления детерминированным комбинированным выводом в ЭС ССМ и когнитивный метод классификации ситуаций, минимизирующий возмущения при необходимости перевода ППК из текущего класса ситуаций в выбранный ЛПР новый класс, для которого предпочтительная структура реализации ППК выбирается системой моделирования по результатам классификации ситуаций.

Изложенное показывает, что ССМ относится к прикладным системам искусственного интеллекта и позволяет строить гибкие системы моделирования промышленно-природных комплексов различного масштаба. В настоящее время просматриваются два основных направления развития этой системы. Первое — разработка исследовательских информационно-аналитических ситуационных систем моделирования, подведомственных региональным либо муниципальным (в больших городах) властям и ориентированных на аккумуляцию разнородных знаний о характеристиках ППК на основе пространственной привязки такой информации. Цель функционирования подобных моделей заключается в профилактике нештатных и чрезвычайных ситуаций на базе предсказательной аналитики безопасности модификации ППК и включения в него новых компонентов с использованием имитаторов (цифровых двойников) подсистем ППК. Второе направление — создание систем поддержки принятия повторяющихся решений в специализированных ситуационных центрах с помощью проблемно-ориентированных ССМ, которые автоматизированно генерируются на базе исследовательских ССМ и предоставляют персоналу ситуационного центра альтернативу проведению экспертных советов в регионах, где их затруднительно или невозможно организовать.

Возможность полноценной реализации предложенного подхода к моделированию требует дополнения рождающегося IoT новой компонентой — Интернетом моделей вещей (Internet of Models of Things – IoMoT), т.е. переходом к Интернету вещей и моделей — Internet of Things and Models (IoTaM). Новая компонента Интернета должна обеспечивать:

- разработку для появляющихся устройств и систем их локализованных ситуационных моделей (цифровых двойников), унифицированных по интерфейсам и форматам представления входной и выходной информации, и сертификация таких моделей;

- создание системы поиска существующих моделей по их концептуальному описанию, с целью минимизации дублирования разработок;

— организацию возможности глобального применения этих моделей по принципам, сходным с GRID-технологиями, что также даст возможность решать вопросы авторских прав разработчиков и, если это требуется, обеспечивать режимность локальных моделей.

Автор признателен О.П. Кузнецову и рецензентам работы за детальный анализ текста при подготовке к публикации, что позволило существенно улучшить качество материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Попков Ю.С.* Теория макросистем. Равновесные модели. М.: Либроком, 2013.
2. *Fishman G.S.* Monte Carlo: Concepts, Algorithms, and Applications. Springer, 1996.
3. *Котов В.Е.* Сети Петри. М.: Наука, 1984.
4. *Шаньгин В.Ф., Костин А.Е., Илюшечкин В.М. и др.* Программирование микропроцессорных систем. М.: Высш. шк., 1990.
5. *Graham Alan K.* Parameter Estimation in System Dynamics Modeling / Jorgen Randers (ed.). Elements of the System Dynamics Method. Portland, 1980. P. 143–161.
6. *Nam Pyo Suh.* Axiomatic Design – Advances and Applications. Chapter 5. New York: Oxford University Press, 2007. P. 239–298.
7. *Коваленко В.В.* Проектирование информационных систем. М.: Форум, 2011.
8. Joe Celko's Trees and Hierarchies in SQL for Smarties. The Morgan Kaufmann Series in Data Management Systems. Second Edition. Elsevier Inc., 2012.
9. *Hunt J.* The Unified Process for Practitioners: Object-oriented Design, UML and Java. Springer, 2000.
10. *Фридман А.Я., Курбанов В.Г.* Ситуационное моделирование надежности и безопасности промышленно-природных систем // Информационно-управляющие системы. 2014. № 4(71). С. 1–10.
11. *Фридман А.Я., Курбанов В.Г.* Формальная концептуальная модель промышленно-природного комплекса как средство управления вычислительным экспериментом // Труды СПИИРАН. 2014. № 6(37). С. 424–453.
12. *Ясиновский С.И.* Интеллектуальная гибридная система поддержки принятия решений РДО: вчера, сегодня, завтра // Мягкие измерения и вычисления. 2018. № 12(13). С. 33–50.
13. *Месарович М., Такахара Я.* Общая теория систем: математические основы. М.: Мир, 1978.
14. *Месарович М., Мако Д., Такахара И.* Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир, 1973.
15. *Поспелов Д.А.* Ситуационное управление: теория и практика. М.: Наука, 1986.
16. *Борисов В.В., Зернов М.М.* Реализация ситуационного подхода на основе нечеткой иерархической ситуационно-событийной сети // Искусственный интеллект и принятие решений. 2009. № 1. С. 17–30.
17. *Мижони С.В., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.* Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов. М.: РАН, 2018.
18. *Салуквадзе М.Е.* Задачи векторной оптимизации в теории управления. Тбилиси: Мецниереба, 1975.

19. *Фридман А.Я.* Координация и планирование управлений в локально организованных иерархических системах // Шестая Международная конференция «Системный анализ и информационные технологии» САИТ-2015 (15–20 июня 2015 г., г. Светлогорск, Россия): Тр. конф. В 2 т. Т. 1. М.: ИСА РАН, 2015. С. 115–124.
20. *Фридман А.Я.* Интерпретация концептуальной модели пространственного динамического объекта в классе формальных систем // Вестник КНЦ РАН. 2015. № 4(23). С. 100–112.
21. *Кузнецов О.П.* Когнитивная семантика и искусственный интеллект // Искусственный интеллект и принятие решений. 2012. № 4. С. 32–42.
22. *Крюков К.В., Панкова Л.А., Пронина В.А. и др.* Меры семантической близости в онтологии // Control Sciences. № 5. 2010. С. 2–14.
23. *Yuhong Li et al.* Ripple Effect in the Supply Chain Network: Forward and Backward Disruption Propagation, Network Health and Firm Vulnerability // Eur. J. Oper. Res. 2021. V. 291. No. 3. P. 1117–1131.
24. *Tversky A.* Features of similarity // Psycholog. Rev. 1977. V. 84. No. 4. P. 327–352.

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

Поступила в редакцию 07.12.2021

После доработки 04.01.2022

Принята к публикации 26.01.2022