

На правах рукописи

**Колесников Александр Васильевич**

**ТЕХНОЛОГИЯ  
РАЗРАБОТКИ ГИБРИДНЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ**

Специальность: 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации  
(информатика)

**А в т о р е ф е р а т**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Санкт-Петербург  
2002

Работа выполнена на кафедре «Компьютерные интеллектуальные технологии в проектировании» в Санкт-Петербургском государственном техническом университете.

Научный консультант: - доктор технических наук, профессор Яшин А.М.

Официальные оппоненты: - доктор технических наук,  
профессор Имаев Д.Х.

- доктор физико-математических наук,  
профессор Косовский Н.К.

- доктор технических наук,  
профессор Полуэктов Р.А.

Ведущая организация - НПО «Импульс», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится « 27 » июня 2002 года в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212. 229. 18 в Санкт-Петербургском государственном техническом университете по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, 9-й учебный корпус, ауд. 325.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Санкт-Петербургского государственного технического университета.

Автореферат разослан « 24 » мая 2002 года.

Ученый секретарь диссертационного совета

Шашихин В.Н.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Автоматизацию обработки информации и управления в технических, социально-экономических и биопроизводственных системах (БПС) невозможно представить без применения широкого спектра методов и моделей классической и дискретной математики, имитационного моделирования, системного анализа, исследования операций (ИСО), искусственного интеллекта (ИИ). Огромный вклад в эту область внесли своими трудами Берг, Глушков, Кузин, Растрин, Уемов, Перегудов, Полуэктов, Г.С. Поспелов, Д.А. Поспелов, Grossberg, Holland, Kohonen, McCulloch, Mamdani, Nilsson, Pitts, Zadeh и др. Благодаря трудам этих ученых и их школ появилось множество разных по способам представления данных и знаний методов, моделей, алгоритмов, а также инструментальных средств систем обработки информации и управления.

Дальнейшая специализация и применение единственного способа представления данных и знаний в конце 70-х начале 80-х годов вступили в противоречие с все возрастающей сложностью задач и создаваемых систем обработки информации и управления. Необходимость преодоления такого положения и поиска методов решения практических задач за рамками преимуществ и недостатков отдельных инструментальных построением многомодельных, интегрированных, гибридных и гибридных интеллектуальных систем (ГИИС) с мягкими вычислениями обосновывалась Борисовым, Венда, Вентцель, Д.А. Поспеловым, Minsky, Peshel, Wasserman, Zadeh и др. Основы теории, методологии и технологии ГИИС заложены в трудах Аверкина, Бусленко, Емельянова, Осипова, Тарасова, Ярушкиной, Medsker, Goonatilake, Hillario, Khebbal, Nauck, Wermtner и др.

Несмотря на успехи ГИИС 90-х годов, как и в любом научном направлении, здесь еще много неясных и нерешенных проблем как по постановке, так и по методам. Сделаны лишь первые шаги по многокомпонентным функциональным ГИИС, процесс разработки которых относится скорее к искусству, чем к научно-обоснованной гибридизации, широко используемой в решении практических задач.

Поэтому, а также из-за расширения практики разработки и применения в управлении и проектировании гибридов, актуальны теория, методология и особенно технология функциональных ГИИС. Объект исследования диссертации – методы, модели, алгоритмы и программы разработки функциональных ГИИС.

Актуальность исследований подтверждается поддержкой Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 98-01-00081) и Комитета по науке республики Польша (грант № 8T11A00813), договором о Международном сотрудничестве между Гданьским техническим университетом и Калининградским государственным техническим университетом (КГТУ) от 10 апреля 1998 года. Выполнение работы связано с плановыми исследованиями Санкт-Петербургского государственного технического университета (СПбГТУ) и КГТУ. В соответствии с приоритетными направлениями развития науки и техники, перечнем критических технологий федерального уровня, утвержденных решением Правительственной комиссии по научно – технической политике и указом Президента РФ от 13.07.1996 года № 884 «О доктрине разви-

тия Российской науки», интеллектуальные системы автоматизированного проектирования и управления отнесены к критическим технологиям федерального уровня.

Цель и основные задачи исследования. Цель диссертации – повышение эффективности интеллектуальных систем обработки информации и управления путем создания теории и методологии разработки функциональных ГИИС с учетом человеческого фактора, программной технологии системного анализа сложных практических задач и синтеза методов их решения за рамками возможностей отдельных инструментариев.

В соответствии с поставленной целью в диссертации решаются следующие задачи:

- обобщение и систематизация мирового опыта создания ГИИС;
- разработка неформальной аксиоматической теории схем ролевых концептуальных моделей (КМ) функциональных ГИИС;
- разработка онтологий задач и методов моделирования;
- разработка схем ролевых КМ для представления знаний о проблемной среде, а также плюсах и минусах методов моделирования;
- моделирование элементов ГИИС и ГИИС в неформальной аксиоматической теории схем ролевых КМ, разработка метода моделирования гибридных стратегий и принципов создания ГИИС;
- создание методологии разработки функциональных ГИИС, включая методы системного анализа практических задач, выбора классов методов моделирования элементов ГИИС и алгоритмы синтеза метода решения проблем; разработка программ поддержки технологии ГИИС;
- исследование свойств технологии на задачах управления и обработки информации трех предметных областей: в транспортном узле (ТУ), БПС и в системах автоматизации морских судов.

Общие методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы дискретной математики – аппарат теории множеств и отношений, алгебраическая теория моделей, формальных систем и теория графов, методы редукции сложности задач, современный системный анализ, имитационное статистическое моделирование (ИСМ), теория нечетких множеств и отношений, искусственные нейронные сети (ИНС), методы инженерии знаний, генетические алгоритмы (ГА), методы математической статистики для обработки результатов экспериментов.

Научная новизна. Новизна научных результатов, полученных в диссертации, заключается в следующем:

1. Обобщен двадцатилетний мировой опыт создания ГИИС. Построены классификации, исследованы свойства, систематизированы архитектуры ГИИС.
2. Впервые разработана неформальная аксиоматическая теория схем ролевых КМ – основа технологии ГИИС. В рамках теории впервые построены схемы многоуровневых КМ предметной области, практических задач, методов, элементов и функциональных ГИИС.
3. Впервые выявлены и систематизированы преимущества и недостатки пяти классов методов разработки элементов ГИИС: аналитических, ИСМ, двух топологий ИНС, символьных экспертных и нечетких систем (ЭС и НС), эволюционных классических ГА.

4. Разработан метод конвейерного моделирования гибридных стратегий и впервые сформулированы принципы разработки функциональных ГИИС.

5. Впервые разработана методология функциональных ГИИС, определены структура и содержание гибридизации.

6. Получены методы редукции сложности практических задач. Впервые для функциональных ГИИС предложен и исследован метод выбора классов методов для разработки элементов ГИИС. Впервые разработаны метод и алгоритмы синтеза функциональных ГИИС.

7. Создана и исследована технология разработки функциональных ГИИС, а также семейство программных продуктов ее поддержки.

Достоверность и обоснованность основных научных положений, выводов и рекомендаций диссертации определяется методологической строгостью предложенного подхода с позиций теории систем, теоретической разработкой базовых положений, логической увязкой результатов выполненного исследования с известными результатами в данной области, применением фундаментальных принципов и методов системного анализа, ИСМ, инженерии знаний, ИНС и ГА, подтверждается сопоставлением результатов экспериментов с фактическими данными и экспертными оценками на трех предметных областях.

Практическая ценность работы. Развиваемые в диссертации методология и технология позволяют редуцировать сложность практических задач, подобрать классы методов релевантные свойствам подзадач из декомпозиции, синтезировать и интерпретировать ГИИС для решения проблемы за рамками ограничений существующих методов моделирования.

Разработанные методология, технология и инструментальные средства ее поддержки, а также синтезированные ГИИС использованы:

- при разработке автоматизированной системы управления флотом на промысле и моделировании конвейера «море – транспортный узел – море», а также для решения задачи планирования квот на вылов рыбы в экономических зонах в ОАО «Компьютерные технологии» (г. Калининград);
- при создании интеллектуальной системы планирования агротехнологий и урожаев с/х культур для ООО им. Ладушкина (Калининградская область);
- при создании системы с базой знаний (БЗ) для решения задачи выбора измерительных приборов и первичных преобразователей (ИППП) систем судовой автоматики морских транспортных судов на Гданьской судовой верфи (Польша);

Кроме этого, результаты и рекомендации диссертации применялись:

- при разработке технологии многоагентных интеллектуальных адаптивных систем дистанционного обучения при поддержке РФФИ;
- при разработке организационно-программно-технического комплекса «Управление предприятием 3.3» (РОСАПО № 980588 от 30.09.1998) и для решения задач управления в торговой сети «Созвездие» в проектно-конструкторской фирме «BalticSoft» (г. Калининград);
- при разработке ГИИС для решения задач обработки информации и управления в Калининградском филиале Института проблем информатики РАН;
- при разработке АСУ Калининградским янтарным комбинатом в задачах управления технологическими процессами обработки янтаря (пос. Янтарный, Калининградская область);

- в учебном процессе Калининградского института международного бизнеса и КГТУ для подготовки информатиков-экономистов, бакалавров и инженеров.

Применение технологии и поддерживающих ее инструментальных средств сокращает время и трудозатраты на разработку функциональных ГИИС. Выявление, системный анализ разнородных проблемных областей в сложных практических задачах, адаптивный синтез метода их решения позволяют получать релевантные интегрированные модели и резко повысить эффективность управления и обработки информации.

Основные научные результаты, выносимые на защиту и их новизна: 1. Впервые разработанные классификации ГИИС и их архитектур, модели гибридизации, построенные обобщением мирового опыта создания ГИИС.

2. Впервые разработанная неформальная аксиоматическая теория схем ролевых КМ для представления данных и знаний как системная основа технологии ГИИС.

3. Впервые построенные в неформальной аксиоматической теории схемы ролевых многоуровневых КМ предметной области, проблемной среды, методов моделирования, элементов ГИИС и функциональных ГИИС.

4. Методы редукции сложности практических задач, метод и алгоритм выбора классов методов для разработки элементов ГИИС, метод и алгоритмы синтеза функциональных ГИИС.

5. Новая методология автоматизированной разработки функциональных ГИИС, использующая знания в виде схем ролевых КМ задач, методов и архитектур ГИИС.

6. Новая проблемно-структурная технология и семейство программных продуктов для автоматизации системного анализа сложных практических задач, синтеза и эксплуатации функциональных ГИИС.

Реализация полученных результатов. Полученные в диссертации выводы и результаты нашли широкое применение при разработке автоматизированных систем управления транспортным узлом, флотом на промысле, агрофирмой ООО им. Ладушкина, внедрены в практику работы проектно-конструкторской фирмы ООО «BalticSoft (г. Калининград), ОАО «Компьютерные технологии», КФ Института проблем информатики РАН, Гданьской судоверфи (Польша), Калининградского янтарного комбината, используются в учебном процессе двух вузов.

Апробация результатов работы. Основные положения работы докладывались на Республиканском семинаре «Проблемно-ориентированные диалоговые комплексы» (Кишинев, 1983); 1У-ой Всесоюзной школе цикла «Системы управления и методы их моделирования» (Калининград, 1989); 3-м международном симпозиуме «ИМИТАЦИЯ СИСТЕМ 90» (Одесса, 1990); 1th and 2th International Scientific Symposium on Automatic Control of Ship Propulsion and Ocean Engineering Systems (Gdansk, Poland, 1994, 1998); 1th and 2th International Scientific Symposium “Technical and Environmental Aspects of Combined Cycle Power Plants COMPOWER 95, 2000” (Gdansk, Poland, 1995, 2000); Республиканском научно-техническом семинаре-сессии «Организация и технология средств связи» (Минск, Беларусь, 1996); 111 Krajowa Konferencja Naukowa “Inzynioria Wiedzy I Systemy Ekspertowe” (Wroclaw, Poland, 1997); Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (Санкт-Петербург, 1998); Konferencja Naukowo-Techniczna “Avtomatyzacja – Nowosci I Perspektywy AUTOMATION 96, 99” (Warszawa, Poland, 1998, 1999); The International Federation of Operational Research Societies Special Conference (SPC

8) “Organizational Structures, Management, Simulation of Business Sectors and Systems” (Kaunas, Lithuania, 1998); Международном семинаре ДИАЛОГ 99 по компьютерной лингвистике и ее приложениям (Таруса, 1999); 4th and 5th International Conferences “Mathematical Modelling and Analysis” (Vilnius, Lithuania, 1999, 2000); Международной конференции «Интеллектуальное управление»: новые интеллектуальные технологии в задачах управления» (ICIT 99) (Переславль-Залесский, 1999); 6-ой и 7-ой национальных конференциях по искусственному интеллекту с международным участием КИИ 98, 2000 (Пушино, 1998; Переславль-Залесский, 2000); Международных научно-технических конференциях БАЛТТЕХМАШ 98, 2000 (Калининград, 1998, 2000); 4th IEEE International Baltic Workshop “DATABASES & INFORMATION SYSTEMS” (Vilnius, Lithuania, 2000); Международной конференции «Интеллектуальные системы и информационные технологии управления ИСИТУ 2000 - IS&ITC» (Псков, 2000); на научных семинарах кафедры компьютерных интеллектуальных технологий в проектировании СПбГТУ (1998 –2001) и кафедры систем управления и вычислительной техники КГТУ (1986 – 2001), а также Вильнюсского технического университета Гедеминаса и Института математики и информатики (Литва, 1999), факультетов электротехники и автоматики, океанотехники и судостроения Гданьского технического университета (Польша, 1997–1999); семинаре Санкт-Петербургского отделения Российской ассоциации ИИ (Санкт-Петербург, 1998).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 42 основных научных печатных работы, в том числе три книги в соавторстве, две монографии. Результаты отражены в шести учебных пособиях, изданных в Москве, Санкт-Петербурге и Калининграде.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, девяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 387 стр. машинописного текста, содержит 111 рисунков, 13 таблиц, приложений на 50 страницах, списка литературы из 357 наименований. Общий объем работы 437 страниц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, дана ее краткая характеристика, формулируются цель, основные задачи и положения, выносимые на защиту, приведен обзор диссертации по главам.

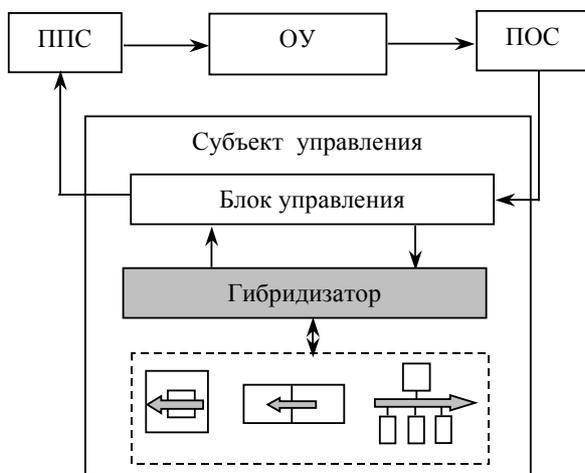
В первой главе «Гибридные интеллектуальные системы и проблемы их разработки» рассмотрены особенности обработки информации и управления на современных предприятиях, понятие и актуальность ГИИС, даны классификации и систематизированы архитектуры ГИИС, проанализировано состояние теории, методологии и технологии ГИИС, сформулированы проблемы разработки ГИИС и задачи разработки проблемно-структурной технологии ГИИС (PS-технологии).

На эволюцию структур систем управления (СУ) и обработки информации обратил внимание еще Д.А. Поспелов (1981), систематизировавший их на простые СУ, системы с адаптацией, модельные и семиотические СУ. Если первые СУ были присущи техническим системам, то последние – большим, чрезвычайно сложным системам, следуя Денисову, Колесникову (1982), самоорганизующимся, развивающимся, следуя Волковой, Денисову (1999), надкибернетиче-

ским, следуя Ерофееву, Полякову (1999), что подчеркивает необходимость выхода за рамки фундаментальных принципов кибернетики при управлении такими сложными, неоднородными, динамическими системами с преобладанием распределенных сетевых структур и горизонтальных связей, определяющих дальнейшую эволюцию СУ и развития теории интеллектуального управления.

Как очередная ступень эволюции СУ в диссертации введены многомодельные, гибридные и гибридные адаптивные СУ. Для первых характерны неоднородность, гетерогенность, отказ от создания и использования одной сложной модели и замене ее простыми, не взаимосвязанными автономными моделями, записанными на различных языках. В гибридных СУ модели объединены межмодельным интерфейсом и характеризуются «гибридным интеллектом» в смысле Венда (1990), социальным характером в смысле Minsky (1991) и системным подходом к интел-

лекту в смысле Тарасова (1997).



Обозначения: ППС, ПОС – преобразователи прямой и обратной связи, соответственно; ОУ – объект управления

Рис. 1. Гибридная адаптивная система управления

Рассмотренные СУ не варьируют интерфейсами моделей. Будучи один раз созданными, такие гибриды жестко сохраняет структуру. В этой связи в СУ (рис. 1) включен новый элемент – гибрилизатор, напоминающий работу ЛПР, располагающего информацией о том, каких экспертов привлечь для решения задачи и как лучше организовать их взаимодействие. Гибрилизатор строит из узкопрофессиональных моделей релевантную задаче структуру и использует ее для решения, а в случае неприемлемости, подбирает новые модели или другие связи между ними. В такой СУ гибрилизатор берет на себя часть функций разработчика: выбор модели, создание и обслуживание ин-

терфейсов, приобретение знаний одной компонентой из другой и т.п.

Предложенные три модели, последние пять лет копирующиеся во многих приложениях для решения сложных практических задач, и составляют предмет технологии гибридизации, разработанной в диссертации.

В науке управления генетическая, гибридная парадигма зародилась в середине 60-х годов, проявляясь в интегрированных моделях, гибридных системах, ГИИС и означает отказ от взгляда на объект исследования как однородную сущность и принятие мировоззрения сложного, составного, неоднородного объекта. Это качественно новый уровень анализа известных и синтеза новых объектов с полезными для человека свойствами.

Гибрид – комбинация двух или более интегрированных подсистем с различными языками представления информации и методами вывода. Гибридная система – записанная на математическом языке комбинация двух методов, один из которых имеет преимущества в моделировании непрерывных процессов, а другой – дискретных. ГИИС – система, использующая для решения задачи несколько методов имитации интеллектуальной деятельности человека. Понятие ГИИС совпадает по смыслу с интеллектуальными гибридными системами, гибридными интег-

рированными системами, гибридными информационными системами, гибридными интеллектуальными адаптивными системами. Близкими следует считать исследования по мягким вычислениям, многомодельным и интегрированным экспертным системам (ИЭС), гибридным системам с дискретной частью, основанной на знаниях, семиотическим системам распределенного интеллекта, нечетким эволюционным многоагентным системам.

На сегодняшний день в мировой практике известны пять классификаций ГИИС: Goonatilake и Khebbal (1992); Medsker (1995); Hillario (1995); Sun (1996); Wermter, McGarry и MacIntyre (1999), причем последние три охватывают только символично-коннекционистские гибриды. В этой связи в диссертации предложена классификация ГИИС по мере связанности подсистем с различными автономными методами. Для исследований выбраны гибриды, структура которых зависит от решаемой задачи – функциональные ГИИС, разрабатываемые гибридизацией пяти классов методов, моделей, алгоритмов: аналитических, статистических, коннекционистских, символических и эволюционных. В зависимости от числа комбинируемых в ГИИС методов, моделей и алгоритмов из различных классов предложено различать ди-, три-, тетра- и пентагибриды. Детально исследованы архитектуры 10 классов дигибридов.

Разработка гибридов называется гибридизацией. В диссертации предложены и исследованы две модели гибридизации – трудоемкого процесса, требующего интеграции широкого спектра знаний о предметной области, задачах, методах их решения, длительной по времени, сложной обработки информации и экспериментов. Написать интеллектуальную систему для решения усложняющихся практических задач все труднее, менее трети проектов информационных систем заканчиваются успешно. Это вызвано возрастающей сложностью создаваемых систем, отсутствием теории, несовершенством методологии и технологии гибридизации.

В этой связи в диссертации выделены и исследованы три группы формализмов интеграции знаний: гибридные системы – Witsenhausen (1966); Tavernini (1987); Nerode, Kohn (1993, 2001); Walsh (1996); Atsaklis, Stiver, Lemmon (1993, 2001), агрегаты и агрегативные системы – Бусленко (1978); Калашников, Немчинов (1988) и интегрированные системы – Гельфандбейн, Колесников, Рудинский (1984); Вагин, Еремеев (1997); Астанин, Захаревич (1997); Рыбина (1998); Тарасов (1998); Валькман (1998); Осипов (1999). Большинство из рассмотренных формализмов российских ученых описывают полимодельные архитектуры, в то время как зарубежные работы – двухмодельные, потенциала которых может быть недостаточно для записи семантики практических задач. Мало результатов по интеграции методов, не обосновывается выбор множества элементов для гибридизации, не исследуются отношения интеграции, определяющие свойства ГИИС.

Проанализированы также известные методологии гибридных систем – Zeigler (1990), агрегативного моделирования – Н.П. Бусленко (1978), разработки ГИИС экспертных систем и ИНС – Medsker (1994), методология ИЭС – Рыбина (1998), гибридная методология НуМ – Hybrid Intelligent System Group (2000), а также проекты, технологии и инструментальные средства ГИИС и ИЭС: NueX, HAREM, MIX, HANSA, AT-ТЕХНОЛОГИЯ, SCOT, FlexTool, MatLab, семейство G2 и др. Естественно, что эти подходы не исчерпывают многообразия методологий, технологий и инструментариев гибридизации. Открыты вопросы разработки ГИИС, интегрирующих более двух автономных методов и (или) информационных технологий, релевантного

сложности проблемы комбинирования, адаптивности состава и структуры ГИИС в зависимости от изменений в свойствах, составе и структуре решаемой задачи и многие другие. Опыт гибридизации вообще и разработки функциональных ГИИС показал и отдельные недостатки:

- отсутствие теоретических концепций представления эвристических знаний о задачах, методах, их взаимосвязях и собственно ГИИС – основах методологии и технологии ГИИС;
- противоречие между слабой выразительной силой известных моделей понятия «задача» и сложностью практических проблем управления и обработки информации; отсутствие методов системного анализа для лучшего понимания проблемы разработчиком и снижения трудоемкости разработки модели ее решения;
- не систематизированы преимущества и недостатки методов, их взаимосвязи с решаемыми проблемами; метод моделирования специфицируется на макроуровне совокупностью «внешних» свойств, а для гибридизации важны и микроуровневые представления; отсутствуют алгоритмы подбора метода релевантных особенностям задачи;
- ограниченный круг методологий, технологий и инструментальных средств, ориентированных в большинстве случаев на символично-коннекционистские дигибриды.

На основании результатов анализа и выявления основных тенденций в области разработки ГИИС была сформулирована цель диссертации. Для ее достижения разработана методология и PS-технология, поддерживаемая семейством инструментальных средств, сокращающих сроки создания функциональных ГИИС и улучшающих качество автоматизированных систем обработки информации и управления. Основные элементы PS-технологии:

- схемы ролевых КМ – знания о структурировании предметной области, задачах, методах, элементах ГИИС, ГИИС и их функционировании, применяемые на всех этапах жизненного цикла гибридизации;
- методы системного анализа сложной практической задачи, включая редукцию, спецификацию, выбор методов, проверку неоднородности, спецификацию областей релевантности методов (моделей) и спецификацию связей;
- методы синтеза ГИИС над гетерогенным модельным полем (ГМП);
- средства визуального моделирования функционирования ГИИС;
- базы знаний для консультаций разработчика по выбору класса методов и моделей для решения подзадач из состава практической задачи.

Теоретический базис PS-технологии включает неформальную аксиоматическую теорию схем ролевых КМ и построенные в рамках этой теории схемы КМ: описания предметной области, неоднородных задач, шести классов автономных методов на макро- и микроуровнях, ГИИС как для крупно- так и мелкозернистых элементов, а также модели функционирования ГИИС, метод моделирования гибридных стратегий и принципы разработки ГИИС, методы редукции сложности задач и метод синтеза ГИИС.

В заключении первой главы формулируются задачи исследований.

Во второй главе «Концептуальные модели – основа технологии ГИИС» рассматриваются концептуальные модели эвристик PS-технологии, онтология КМ, неформальная аксиоматическая теория схем ролевых КМ, схемы ролевых КМ для представления моделей действительности и структурированного представления знаний об объектах – оригиналах гибридизации из

мира управления – ресурсах, действиях, структурах, ситуациях и состояниях, стратифицированные КМ предметной области.

В настоящее время на языке математики невозможно построить описание объектов-оригиналов гибридизации, т.е. субъективных моделей внешнего мира у экспертов – управленцев, объектов-прототипов, т.е. субъективных моделей методов моделирования у разработчика, объектов-результатов, т.е. субъективных моделей ГИИС у разработчика, а также действий по преобразованию объектов из одного представления в другое в ходе гибридизации. В диссертации в качестве такого языка обосновано использование языка концептуальных моделей (ЯКМ).

Концептуальные модели – результат накопленных теоретических знаний и практического личного опыта разработчика. Это эвристики, извлечение, представление, хранение, преобразование и применение которых чрезвычайно актуально в гибридизации. Поскольку КМ используются с разными целями, специалистами различных профессий, в диссертации построена и исследована неформальная понятийная система (онтология) концептуальных моделей. Следуя Д.А. Поспелову (1986), предложен и развит класс ролевых КМ, а следуя А.И. Уемову (1978), триада «вещь – свойство – отношение» положена в основу структурирования мира управленца, разработчика и неформальной аксиоматической теории концептуального моделирования для проектирования функциональных ГИИС:

$$Te = \langle Te^{TH}, Te^{TO}, Te^A, Te^{BT} \rangle, \quad (2.1)$$

где  $Te^{TH}$ ,  $Te^{TO}$  – неопределяемые и определяемые термины, соответственно;  $Te^A$  – аксиомы,  $Te^{BT}$  – высказывания-теоремы, выводимые из  $Te^A$  по фиксированным правилам.

Понятийная структура предметной области  $\langle Te^{TH}, Te^A \rangle$ ,  $Te^{BT}$  описывается неформальными аксиоматическими теориями, формулировки  $\langle Te^{TH}, Te^A \rangle$  которых и называются концептуальными моделями. Из соотносительности в триаде «вещь – свойство – отношение» следует, что для категориального ядра ЯКМ не действует правило о запрещении круга в определениях и что в (2.1)  $Te^{TH} = Te^{TO} = \{\langle \text{«вещь»}, \langle \text{«свойство»}, \langle \text{«отношение»} \rangle\}$ . В диссертации, применительно к ЯКМ, даны определения всех трех категорий.

Поскольку применение  $Te^{TH}$  к системному анализу предметной области затруднительно,

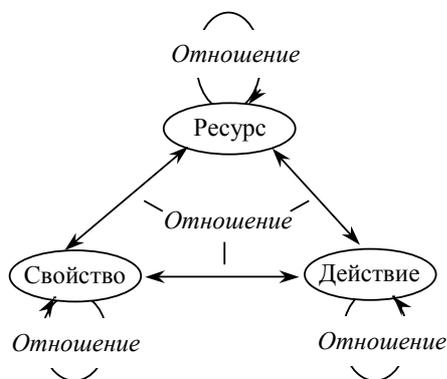


Рис. 2. Категориальное ядро «ресурс – свойство – действие – отношение»

то из множества вещей рассматриваются только вещи-ресурсы, имеющиеся у субъекта управления для решения задач. Из отношений выбраны отношения-действия, изменяющие состояние ОУ. Даны определения ресурсов и действий. На рис. 2 категориальное ядро ЯКМ представлено в графическом виде. Главная особенность этой модели – ролевой характер и инвариантность к предметной области.

Если ввести множество  $X^0 = \{^1X^0, ^2X^0, ^3X^0\}$ , где  $^1X^0, ^2X^0, ^3X^0$  – множества базисных понятий, обозначающих ресурсы, свойства и действия, соответственно и построить на  $X^0$  полный граф  $G = (X^0, R^0)$ , то имеем класси-

фикацию базовых отношений  $R^0 = \{^{11}R^0, ^{22}R^0, ^{33}R^0, ^{12}R^0, ^{21}R^0, ^{13}R^0, ^{31}R^0, ^{32}R^0, ^{23}R^0\}$ , где  $^{11}R^0, ^{22}R^0, ^{33}R^0, ^{12}R^0, ^{21}R^0, ^{13}R^0, ^{31}R^0, ^{32}R^0, ^{23}R^0$  – множества отношений «ресурс-ресурс»,

«свойство-свойство», «действие-действие», «ресурс-свойство», «свойство-ресурс», «ресурс-действие», «действие-ресурс», «действие-свойство» и «свойство-действие», соответственно.

Таким образом, после того как определен граф  $G$ , имеем  $Te^{TH} = \{\text{«вещь», «свойство», «отношение»}\}$ ,  $Te^{TO} = \{\text{«ресурс», «свойство», «действие», «отношение»}\}$ , и можно ввести аксиомы  $Te^A = \{A1, A2, A3\}$  теории (2.1) существования одно-, двух- и трехролевых конструкторов, т.е. если  ${}^\alpha X^0, {}^\beta X^0, {}^\gamma X^0 \subseteq X^0$ ,  ${}^{\alpha\alpha}R^0, {}^{\beta\beta}R^0, {}^{\gamma\gamma}R^0 \subseteq R^0$ ,  ${}^{\alpha\beta}R^0, {}^{\beta\gamma}R^0, {}^{\alpha\gamma}R^0 \subseteq R^0$ , то существуют одно-, двух- и трехролевые конструкторы  $co^1 = {}^\alpha X^0 \alpha\alpha R^0 \alpha X^0$ ,  $co^2 = {}^\alpha X^0 \alpha\alpha R^0 \alpha X^0 \circ {}^\beta X^0 \beta\beta R^0 \beta X^0 \circ {}^\alpha X^0 \alpha\beta R^0 \beta X^0$ ,  $co^3 = {}^\alpha X^0 \alpha\alpha R^0 \alpha\alpha X^0 \circ {}^\beta X^0 \beta\beta R^0 \beta X^0 \circ {}^\gamma X^0 \gamma\gamma R^0 \gamma X^0 \circ {}^\alpha X^0 \alpha\beta R^0 \beta X^0 \circ {}^\beta X^0 \beta\gamma R^0 \gamma X^0 \circ {}^\gamma X^0 \gamma\alpha R^0 \alpha X^0$ , соответственно, где  $\alpha, \beta, \gamma = 1, 2, 3$ ;  $\alpha \neq \beta \neq \gamma$ ;  $\circ$  – конкатенация. Переход от  $co^1$  и  $co^2$  к  $co^3$  означает переход от точечной и линейной разомкнутых диаграмм к треугольной замкнутой диаграмме и концептуально полной для триады «ресурс – свойство – действие» картине мира.

Для моделирования предметных знаний категориальное ядро ЯКМ расширено:  $X^0 = \{{}^1X^0, \dots, {}^9X^0\}$ , где  ${}^4X^0$  – единицы измерения,  ${}^5X^0$  – значения,  ${}^6X^0$  – состояния,  ${}^7X^0$  – оценки,  ${}^{21}X^0$  – физические свойства (параметры),  ${}^{22}X^0$  – характеристические свойства (характеристики),  ${}^{23}X^0$  – именные свойства (имена),  ${}^8X^0 = \{x_1^0 - \text{«задача»}\}$ ,  ${}^9X^0 = \{x_1^0 - \text{«метод», } x_2^0 - \text{«модель», } x_3^0 - \text{«программа»}\}$  и  ${}^{10}X^0$  – экзотические понятия. Даны соответствующие определения и введены другие релевантные выражениям языку профессиональной деятельности (ЯПД) конструкторы.

Для построения высказываний-теорем теории (2.1), т.е. схем ролевых КМ, в диссертации

сформулировано правило склеивания конструкторов и схем. Чтобы преобразовать схему в КМ, необходимо наполнить классы понятий, отношений лексемами и интерпретировать теорию  $Te(2.1)$ .

Схемы ролевых КМ используются в PS-технологии для моделирования выражений ЯПД, при создании БД и БЗ, для записи эвристик разработки и эксплуатации ГИИС. Особое место в диссертации уделено стратификации. Предложен метод стратифицированного концептуального описания надкибернетических систем для разработки многоуровневых схем КМ в теории  $Te(2.1)$ . На рис. 3 изображена

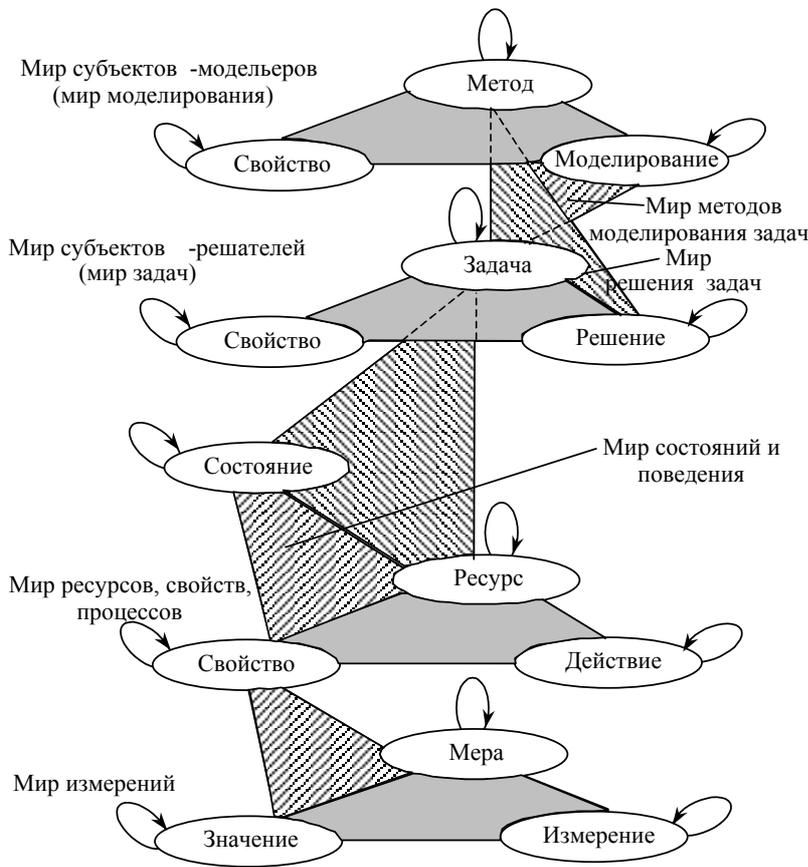


Рис. 3. Многоуровневая схема ролевых концептуальных моделей

одна из таких схем КМ для системного анализа сложных практических задач и синтеза ГИИС по PS - технологии. Эта схема построена из трехролевых конструкторов, часть которых задает межуровневое взаимодействие. В общей сложности выделено семь взаимосвязанных и взаимодействующих друг с другом схем ролевых КМ, названных моделями миров. Особое внимание в диссертации уделено исследованиям отношений «задача-свойства», «задача-задача», «метод-свойства» и «метод-метод».

В каждом из миров есть свои КМ, понятия и отношения которых связаны денотатами с реалиями внешнего мира и соответствуют переменным из всех видов знаний, используемых в ГИИС для мягких вычислений. Это эвристически направляет системный анализ ЯПД задач и методов, увеличивает силу методов вывода в интеллектуальных системах за счет введения в вычислительные алгоритмы корректирующих шагов по КМ с актуализацией частично формализованных знаний для получения рациональных результатов решения задач.

В третьей главе «Модели задач обработки информации и управления в технологии ГИИС» рассматриваются онтология задач обработки информации и управления, источники и понятие неоднородности задач, схемы ролевых КМ однородных и неоднородных задач, многоуровневый подход к решению неоднородных задач, модели и свойства задач планирования в неоднородной проблемной среде.

Для исследования понятия «задача» и отношений «задача-свойства», «задача-задача» в диссертации построена онтология мира задач, систематизированы типичные определения и классификации задач за период с 1962 по 1999 гг., показавшие: 1) несовершенство наших знаний о свойствах задач – основы их классификации и сравнительного анализа; 2) необходимость отхода от определения задачи в терминах ИСО и перехода к спецификации проблемы с позиций системного анализа, т.е. как к объекту, имеющему состав, структуру, упорядоченность, отношения с другими объектами и эмерджентность; 3) актуальность построения схем КМ задач для количественных оценок меры их сложности.

В диссертации предложена классификация задач с позиций системного анализа по основаниям гомогенности и гетерогенности – свойствам, хорошо известным в химии и физике, что приводит к понятиям «однородной (гомогенной)» и «неоднородной (гетерогенной)» задач. Применение свойств однородности и неоднородности, широко наблюдаемых в деятельности человека, к задачам отмечалось Александровым (1975), Ларичевым (1979), Нильсоном (1985), Завбежайло (1998), Емельяновым, Зафировым (2000) и Гладуном (2001). В диссертации вскрыты главные причины неоднородности задач, обусловленные многообразием: парадигм, методов и переменных в науке; дисциплин в обучении; мнений и моделей внешнего мира на практике; фаз управления и целей решения задач. Это приводит к представлению практических задач как задач-систем, требующих новых подходов в системном анализе для исследования областей неоднородности, формируемых задачами-элементами, состав которых изменяется в определенных пределах, не затрагивая качества системы. Связи между подзадачами ограничивают степень свободы элементов и не позволяют решать одни задачи без других, задавая порядок на причинно-следственной и временной шкалах.

В диссертации задача-система названа неоднородной, а задача-элемент – однородной задачей. В гетерогенной задаче-системе при переходе через «границу разделения» однородных

элементов происходят мгновенные скачки имен, параметров и характеристик, выражающих суть однородных задач, что должно учитываться при моделировании ее решения. На рис. 4,а приведена схема ролевых КМ понятия «однородная задача» –  $\pi^h$  (или  ${}^8\pi^h$ ), а ниже дано ее описание:

$$\pi^h = {}^8x_1^0 \circ {}^{86}R^n \circ {}^6G^h \circ {}^8x_1^0 \circ {}^{82}R^n \circ {}^2D^h \circ {}^8x_1^0 \circ {}^{89}R^n \circ {}^9C^h \circ {}^8x_1^0 \circ {}^{82}R^n \circ {}^2K^h \circ {}^8x_1^0 \circ {}^{82}R^n \circ {}^2O^h \circ {}^8x_1^0 \circ {}^{88}R_1^n \circ {}^8x_1^0 \circ {}^8x_1^0 \circ {}^{88}R_2^n \circ {}^8x_1^0, \quad (3.1)$$

где  ${}^6G^h, {}^2D^h, {}^9C^h$  – схемы ролевых КМ цели, исходных данных и условий ( $m^h$  – метод,  $\dot{m}^h$  – модель,  $a^h$  – алгоритм,  $p^h$  – программа)  $\pi^h$ , соответственно;  ${}^2K^h$  – классификатор, т.е. схема роле-

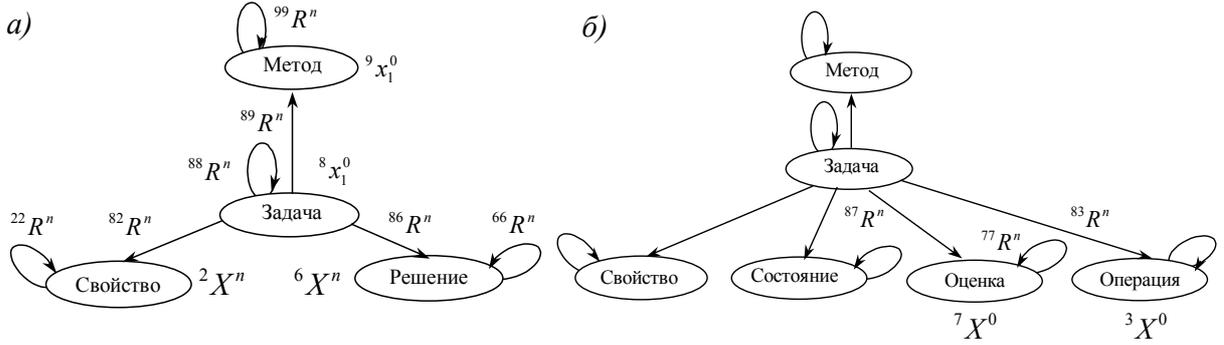


Рис. 4. Схемы ролевых концептуальных моделей: а – однородных и б – неоднородных задач

вых КМ, определяющая фазу, класс переменных, которыми необходимо и достаточно манипулировать для решения  $\pi^h$  и класс задачи;  ${}^2O^h$  – спецификатор, т.е. схема ролевых КМ определяющая идентификатор  $\pi^h$ , свойства среды разработки, проблемной среды, проекта, среды экспертов, измерений, информации и плана для решения задачи;  ${}^{88}R_1^n$  – производные отношения ( $n > 0$ ) с другими  $\pi^h$  из одной и той же  $\pi^u$  (3.3);  ${}^{88}R_2^n$  – отношения включения  $\pi^h$  в  $\pi^u$ .

Задача  $\pi^h$  обозначается знаком  ${}^8x^n |^h \in {}^8X^n |^h$  в языке  $L_6^h$  (рис. 8):

$$L_6^h(L_1^S, \dots, L_5^S; {}^6X^0, {}^8X^0, {}^9X^0, R^n; \pi^h) = \{{}^8x^n |^h\}, \quad (3.2)$$

где  $L^S = L_1^S \cup \dots \cup L_5^S$  |  $L_1^S, \dots, L_5^S$  – языки описания производных отношений  $R^n$ , а также ресурсов, свойств, действий и их иерархий ( ${}^1X^n, {}^2X^n, {}^3X^n$ ), структур, ситуаций (состояний) ОУ.

Неоднородные задачи  $\pi^u$  (или  ${}^8\pi^u$ ) специфицируются в  $L_7^u$  (рис. 8) следующей схемой ролевых КМ (рис. 4,б):

$$\pi^u = {}^8x_1^0 \circ {}^{86}R^n \circ {}^6G^u \circ {}^8x_1^0 \circ {}^{82}R^n \circ {}^2D^u \circ {}^8x_1^0 \circ {}^{89}R^n \circ {}^9C^u \circ {}^8x_1^0 \circ {}^{82}R^n \circ {}^2K^u \circ {}^8x_1^0 \circ {}^{82}R^n \circ {}^2O^u \circ {}^8x_1^0 \circ {}^{83}R^n \circ {}^3X^n \circ {}^8x_1^0 \circ {}^{87}R^n \circ {}^7O^n \circ {}^8x_1^0 \circ {}^{88}R_2^n \circ \Pi^h \circ \Pi^h \circ {}^{88}R_3^n \circ \Pi^h \circ {}^8x_1^0 \circ {}^{88}R_4^n \circ \Pi^h, \quad (3.3)$$

где  ${}^6G^u, {}^2D^u, {}^9C^u$  – схемы ролевых КМ цели, исходных данных, условий ( $m^u, \dot{m}^u, a^u, p^u$ ), соответственно;  ${}^2K^u$  – классификатор;  ${}^2O^u$  – спецификатор, включающий идентификатор  $\pi^u$ , схему ролевых КМ ЛПР, схему ролевых КМ операции  ${}^3X^n$ , исполняющей решение  $\pi^u$ ;  ${}^7O^u$  – эвалюэтор (от англ. evaluation), т.е. схема ролевых КМ, определяющая оценки результатов  ${}^3X^n$  и оценки результатов решения однородных задач  $\Pi^h = \{\pi_1^h, \dots, \pi_{N_n}^h\}$  из состава  $\pi^u$ ;  $\Pi^h \circ {}^{88}R_3^n \circ \Pi^h$  – обозначает  $\hat{\Pi}^u = \{\hat{\pi}_1^u, \dots, \hat{\pi}_{N_n}^u\}$  – множество декомпозиций задачи  $\pi^u$ ;  ${}^{88}R_3^n$  – множество отношений декомпозиции  $\pi^u$ ;  ${}^8x_1^0 \circ {}^{88}R_2^n \circ \Pi^h$  – обозначает состав  $\pi^u$ ;  ${}^{88}R_4^n$  – отношения  ${}^6G^u$  и  ${}^6G^h, {}^2D^u$  и  ${}^2D^h$ , а также  ${}^9C^u$  и  ${}^9C^h$ .

Задача  $\pi^u$  обозначается в  $L_7^u: L_7^u(L_6^h, {}^8X^n|^{uh}, {}^8X^n|^\Pi; \pi^u) = \{{}^8x^n|^u\}$ , где  ${}^8X^n|^{uh} \subseteq {}^8X^n|^h$  – множество знаков в  $L_6^h$  однородных задач из  $\Pi^h$ ;  ${}^8X^n|^\Pi$  – множество знаков декомпозиций неоднородных задач в  $L_7^\Pi(L_6^h, {}^{88}R_3^n, CH^\Pi) = \{{}^8x^n|^\Pi\}$ , где  $CH^\Pi$  – множество схем ролевых КМ для формирования структур на  $\Pi^h$ .

Цели  ${}^6G^u$  и  ${}^6G_1^h, \dots, {}^6G_{N_h}^h$ , исходные данные  ${}^2D^u$  и  ${}^2D_1^h, \dots, {}^2D_{N_h}^h$  в общем случае не совпадают. Условия  ${}^9C^u$  и  ${}^9C_1^h, \dots, {}^9C_{N_h}^h$  отличаются в принципе, поскольку, если для  ${}^9C_1^h, \dots, {}^9C_{N_h}^h$  должен быть известен  $m_j^h | j=1, \dots, N_h$ , иначе субъект, решающий  $\pi^h$  некомпетентен, и могут быть известны  $a_j^h$  и  $p_j^h$ , то для  ${}^9C^u$  метод  $m^u$ ,  $\dot{m}^u$ ,  $a^u$  и  $p^u$  – конструируемые в PS-технологии объекты.

В диссертации предложен многоуровневый подход к решению  $\pi^u$  в PS-технологии. Для этого в системе  $S$  заданы отображения, определяющие страты:  $S_1$  – ситуационную,  $S_2$  – поточковую,  $S_3$  – параметрическую,  $S_4$  – принятия решений ЛПР, и получены две модели. В модели  $\dot{m}_1^S$  традиционных СУ с преобладанием вертикальных связей, задача  $\pi^u$ , решаемая ЛПР и возникающая на более высоком уровне, декомпозируется «вниз», а информация о решении экспертами  $\pi^h \in \Pi^h$  передается «вверх». В модели  $\dot{m}_2^S$  систем поддержки принятия решений с преобладанием горизонтальных связей, ЛПР формирует систему  $S^u \subseteq S$  «за круглым столом», для решения задачи  $\pi^u$ , занимая в  $S^u$  высший уровень  $S_4$  относительно экспертных страт  $S_q | q=1, \dots, 3$  и задач  $\pi^h \in \Pi^h$ . Зададим множество ЯПД  $L^p = \{L_1^p, \dots, L_{N_L}^p\}$  в  $S$  и соответствие  $\Psi_1 \subseteq L^p \times \widehat{S} | \Psi_1 \neq \emptyset$ , где  $\widehat{S} = \{S_1, S_2, S_3\}$  для модели  $\dot{m}_1^S$  и  $\widehat{S} = \{S_1, \dots, S_4\}$  для модели  $\dot{m}_2^S$ . Допустим, что страте соответствует более одного  $L_q^p \in L^p | q=1, \dots, N_L$ . Тогда неоднородная предметная область есть  $E^L = \langle \widehat{S}, L^p, \Psi_1 \rangle$ , а неоднородная проблемная среда:

$$E^u = \langle E^L, \Pi^u, \widehat{\Pi}^h, \Psi_2, \Psi_3 \rangle, \quad (3.4)$$

где  $\Pi^u = \{\pi_1^u, \dots, \pi_{N_\Pi}^u\}$  – множество неоднородных задач;  $\Psi_2, \Psi_3$  – соответствия на  $\Pi^u \times \widehat{S}$  и

$$\widehat{\Pi}^h \times \widehat{S} \Big| \widehat{\Pi}^h = \bigcup_{f=1}^{N_\Pi} \Pi_f^h, \text{ соответственно; } f=1, \dots, N_\Pi,$$

требующая отказа от использования автономных методов и перехода к конструированию метода  $m^u$  решения  $\pi^u$ .

В  $E^u$  (3.4) для исследования и апробации PS-технологии выбраны задачи планирования. Используя (3.1), построены схемы ролевых КМ задач пассивных фаз, а (3.3) – схема ролевых КМ задач планирования, сформулированы особенности этих сложных, трудоемких проблем, требующих применения методов системного анализа для понимания и методов гибкого, адаптивного агрегирования – дезагрегирования решений однородных подзадач при разработке функциональных ГИИС.

В четвертой главе «Модели инструментариев в технологии ГИИС» рассматриваются онтология методов моделирования, схемы ролевых КМ методов моделирования, модели базовых автономных методов PS-технологии, понятия интегрированных методов и моделей, модели взаимодействия проблемной среды и инструментариев.

Для исследования понятия «метод» и отношений «метод-свойства», «метод-метод» построена онтология мира методов моделирования за период 1961–2000 гг., один из разделов которой – «Методы формализованного представления» – развит в диссертации, для чего предло-

жены три основания классификации: 1) модель; 2) язык ее описания и 3) процедура обучения и (или) получения решений на модели. Применение первых двух оснований к методам формализованного представления разбивает их на классы: аналитических, статистических, символьных, коннекционистских и эволюционных. Третье основание определяет многообразие методов. Данная классификация – основа исследования сильных и слабых сторон методов по отношению к миру задач, эволюционных процессов в мире методов, вследствие которых метод-сущность может быть модифицирован или изменен настолько, что превратится в качественно новый объект. Для отображения таких процессов необходимо представлять сущности на макро- и микроуровнях. В диссертации для макроуровневых описаний вводится схема ролевых КМ метода  $\hat{m}^a$  (или  ${}^9\hat{m}^a$ ), как ресурса решения задач (рис. 5):

$$\hat{m}^a = {}^1X^0 \circ {}^{11}R^n \circ {}^1X^0 \circ {}^{12}R^n \circ {}^{22}X_1^0 \circ {}^1X^0 \circ {}^{12}R^n \circ {}^{22}X_2^0 \circ {}^1X^0 \circ {}^{12}R^n \circ {}^{22}X_3^0 \circ {}^1X^0 \circ {}^{13}R^n \circ {}^3X_1^0 \circ {}^1X^0 \circ {}^{13}R^n \circ {}^3X_2^0 \circ {}^1X^0 \circ {}^{18}R^n \circ {}^8\pi^h \circ {}^1X^0 \circ {}^{12}R^n \circ {}^2O^m, \quad (4.1)$$

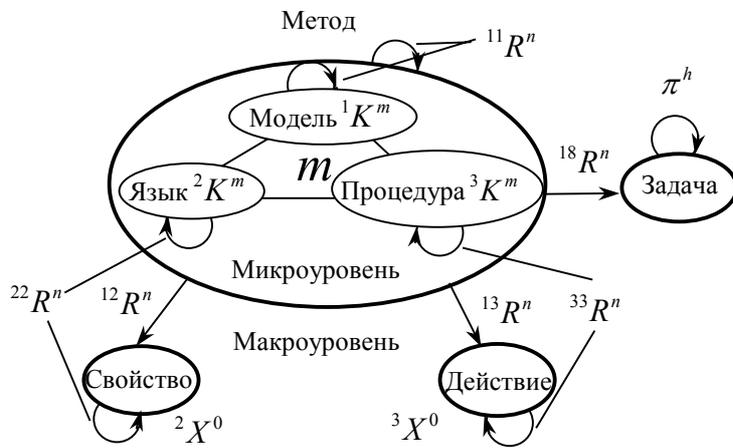


Рис. 5. Представление метода

где  ${}^{22}X_1^0 \subseteq {}^2X^0$  – классификатор;  ${}^{22}X_2^0 \subseteq {}^2X^0$  – модель;  ${}^2X_3^0 \subseteq {}^2X^0$  – язык описания;  ${}^3X_1^0 \subseteq {}^3X^0$  – процедура получения решения;  ${}^3X_2^0 \subseteq {}^3X^0$  – процедура обучения;  ${}^2O^m$  – спецификатор, т.е. схема ролевых КМ, определяющая погрешность решения, гибридные возможности, преимущества и недостатки;  ${}^{11}R^n, {}^{12}R^n, {}^{13}R^n$  – отношения определения;  ${}^{18}R^n$  – отношения предназначения.

Отношения схем КМ модели, языка описания и процедуры задают схему КМ метода  $\tilde{m}^a$  (или  ${}^9\tilde{m}^a$ ) на микроуровне (рис. 5):

$$\tilde{m}^a = {}^1K^m \circ {}^{11}R^n \circ {}^1K^m \circ {}^2K^m \circ {}^{22}R^n \circ {}^2K^m \circ {}^3K^m \circ {}^{33}R^n \circ {}^3K^m \circ {}^1K^m \circ {}^{12}R^n \circ {}^2K^m \circ {}^1K^m \circ {}^{13}R^n \circ {}^3K^m \circ {}^2K^m \circ {}^{23}R^n \circ {}^3K^m, \quad (4.2)$$

где  ${}^1K^m, {}^2K^m, {}^3K^m$  – схемы ролевых КМ модели, языка и процедуры, соответственно.

Схемы (4.1), (4.2) специфицируют метод, ограничивая нишу в популяции методов, характеризуемую прежде всего  $\tilde{m}^a$ . Если речь идет о выборе метода решения задачи и ограничения (4.1), не устраивают разработчика, то он вынужден искать инструмент за пределами ниши. Продолжая поиск в другой, третьей и т.д. нишах, он, возможно, и достигнет желаемого компромисса «ограничения – адекватность», однако для  $\pi^u$ , с изменчивыми составом и структурой, нет релевантных ниш, а метод ее решения должен быть получен конструированием над совокупностью ниш, т.е. над ГМП. Решение  $\pi^h \in \Pi^h$  моделируется в конкретной нише. Поэтому ее методы названы автономными методами разработки и применения автономных моделей  $\dot{m}^a$ , алгоритмов  $\dot{a}^a$ , программ  $\dot{p}^a$ , в совокупности формирующих мир автономных методов  $W^{m^a}$  (рис. 6,a).

В языке  $L_7^m$  (рис. 8), как подмножестве ЯКМ, по схемам (4.1) и (4.2) могут быть сконструированы знаки  ${}^9x^n|{}^m \in {}^9X^n|{}^m$ , где  ${}^9X^n|{}^m$  – множество знаков автономных методов.

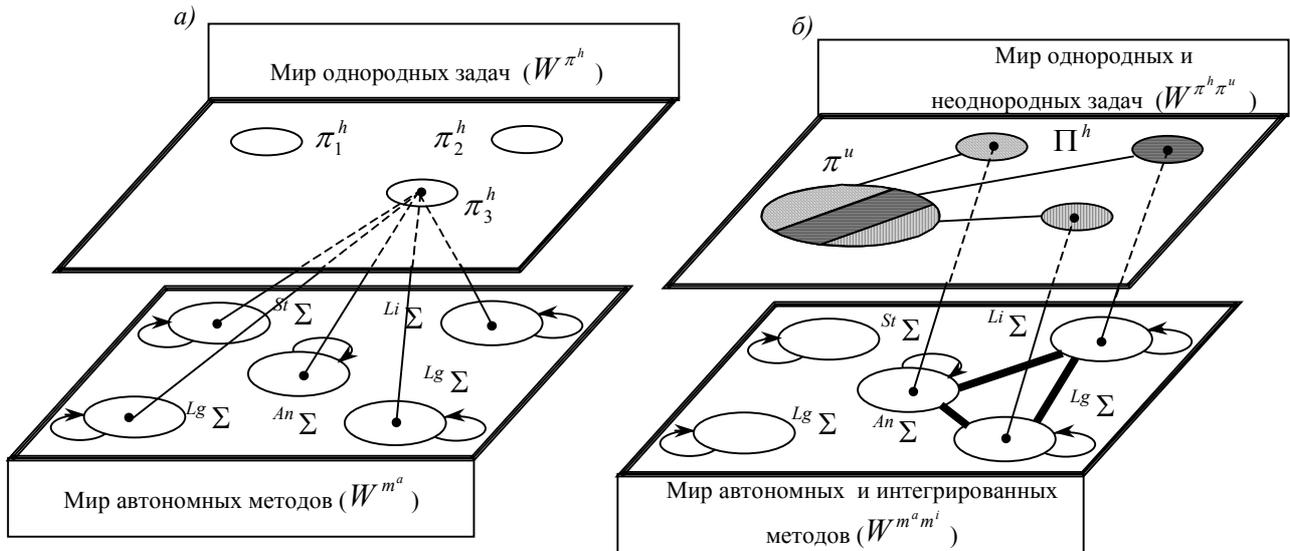


Рис. 6. Взаимосвязи миров задач и методов моделирования

В диссертации обоснован выбор базовой совокупности классов автономных методов PS-технологии: для аналитических вычислений – алгебраические и дифференциальные уравнения, для нейровычислений – ИНС прямого распространения сигнала и карты Кохонена, для нечетких вычислений – машины Mamdani и Takagi-Sugeno, для эволюционных вычислений – классические ГА с турнирной селекцией и Парето ГА с нишами, для статистических вычислений – метод Монте-Карло, для логических рассуждений – продукционные ЭС. Проанализированы и систематизированы преимущества и недостатки каждого базового класса методов, построены БД «метод-задачи», БЗ для консультаций разработчика ГИИС по выбору базового класса методов решения  $\pi^h$ , КМ и модели вычислений, сделан вывод, что базовая совокупность отображает широкий спектр вербализованных знаний субъекта управления. Это прежде всего формализованные знания: «аналитические» ( $An$ -знания) на детерминированных переменных в классическом математическом анализе, математическом программировании, теориях игр, расписаний и др.; «статистические» ( $St$ -знания) – отображающие свойства и поведение системы стохастическими переменными, закономерностями математической статистики, ИСМ и др.; «логические» ( $Lg$ -знания) в теоретико-множественных представлениях, допускающих переменные-отношения. Такие знания – основа, фундамент решения задач. Их сознательное и точное применение субъектом исключает абсолютный произвол и необоснованную фантазию. Частично формализованные знания можно выделить, переходя к методам дискретной математики, математической лингвистики, системного анализа: «лингвистические» ( $Li$ -знания), для решения задач в условиях дефицита  $An$ -,  $St$ -, и  $Lg$ -знаний, например, методы ЭС и НС, а также «генетические знания» ( $Ge$ -знания), применяемые в ГА. Используя понятия  $An$ -,  $St$ -,  $Lg$ -,  $Li$ - и  $Ge$ -знаний, в диссертации построены и исследованы две модели взаимодействия миров задач и методов моделирования, формирующие модель внешнего мира в PS-технологии. Графически первая модель –  $W^{\pi^a, \pi^h}$ , характерная для 70 – 80 гг., дана на рис. 6,а. В плоскости  $W^{m^a}$  окружностями показаны множества методов, моделей, алгоритмов и программ работы с  $An$ -,  $St$ -,  $Lg$ -,  $Li$ - и  $Ge$ -знаниями на  $S_3, S_2, S_1$ . Петлями обозначены

${}^{\psi\varphi}\dot{R}^n|\psi, \varphi = \{An, St, Lg, Li, Ge\}, \psi = \varphi$  отношения получения новых знаний в автономных нишах. Два мира  $W^{\pi^h} = \Pi^h$  и  $W^{m^a} = \langle \widehat{\Sigma}, \widehat{S}, \Psi^{\Sigma S}, {}^{\psi\varphi}\dot{R}^n \rangle$ , где  $\widehat{\Sigma} = \{^{An}\Sigma, ^{St}\Sigma, ^{Lg}\Sigma, ^{Li}\Sigma, ^{Ge}\Sigma\}$ ;  $\widehat{S} = \{S_1, S_2, S_3\}$  для модели  $\dot{m}_1^S$  и  $\widehat{S} = \{S_1, S_2, S_3, S_4\}$  для модели  $\dot{m}_2^S$ ;  $\Psi^{\Sigma S} \subseteq \widehat{\Sigma} \times \widehat{S}$  – всюду определенное, сюръективное соответствие, в случае  $\dot{m}_2^S$ - модели взаимнооднозначное;  $\dot{R}^n = \{^{AnAn}\dot{R}^n, ^{StSt}\dot{R}^n, ^{LgLg}\dot{R}^n, ^{LiLi}\dot{R}^n, ^{GeGe}\dot{R}^n\}$ ;  ${}^{\psi\varphi}\dot{R}^n : {}^\psi\Sigma \rightarrow {}^\varphi\Sigma|\psi = \varphi$ , связаны отношениями соответствия задачи  $\pi^h$  и метода ее решения  $m^a$ .

Вторая модель  $W^{\pi^h\pi^u m^a m^i}$  (рис. 6,б), характерная для 90-х гг., предполагает, что в проблемной среде  $E^u$  (3.4) существует более чем одна  $\pi^u$  и на множестве таких задач можно определить множество отношений:

$$W^\Pi = \langle \Pi^u, {}^{88}R_5^n \rangle, \quad (4.3)$$

где  $W^\Pi$  – модель структуры мира задач;  $\Pi^u = \{\pi_1^u, \dots, \pi_{N_\Pi}^u\}$  – непустое множество задач  $\pi^u$ ;  ${}^{88}R_5^n$  – множество отношений причина-следствие на  $\Pi^u$ . Тогда  $W^{\pi^h\pi^u} = \langle W^{\pi^h}, W^\Pi \rangle$ .

В ответ на редукцию  $\pi^u$  из  $W^{\pi^h\pi^u}$ , в  $W^{m^a m^i}$  образуются структуры знаний за рамками  $m^a$ . Интеграция в этом случае означает возникновение отношений  ${}^{\psi\varphi}\ddot{R}^n|\psi, \varphi = \{An, St, Lg, Li, Ge\}, \psi \neq \varphi$  (на рис. 6,б обозначены жирными линиями) между различными знаниями, и формирование –  $m^i, \dot{m}^i, a^i, p^i$ , интерпретирующих такие отношения. Таким образом, в  $W^{m^a m^i}$  нет заранее известной структуры знаний релевантной  $\pi^u$ . Такая структура является искомой и строится в PS-технологии. В диссертации предложена классификация отношений  ${}^{\psi\varphi}\ddot{R}^n$  и сформулирована модель  $W^{m^a m^i}$ :

$$W^{m^a m^i} = \langle W^{m^a}, {}^{\psi\varphi}\dot{R}^n, {}^{\psi\varphi}\ddot{R}^n \rangle. \quad (4.4)$$

Чтобы задать взаимодействие  $W^{\pi^h\pi^u}$  и  $W^{m^a m^i}$ , а также построить  $W^{\pi^h\pi^u m^a m^i}$ , введены процедуры подбора альтернативных инструментариев для решения  $\pi^h \in \Pi^h$  и спецификации областей релевантности модели, работающие с ГМП.

Актуальность первой процедуры объясняется альтернативностью инструментариев решения одной и той же  $\pi^h \in \Pi^h$  и влияет на выбор  ${}^9C^h$ . Для поддержки процедуры обобщены методы Поспелова, Ирикова (1976); Lobo, Goldberg (1996); Stein, Curatolo (1998), опыт, накопленный в мировой научной, инженерно - конструкторской практике и на рынке специального программного обеспечения. Все это позволило обойти проблематику алгоритмов выбора и заменить их системой с БЗ, т.е. применить «проектирование с использованием знаний», для чего опыт экспертов представлен правилами «условие – действие», где условие – образец знака в  $L_6^h$  (3.2), а действие – отнесение знака к одному или нескольким из шести базовых классов автономных методов. В диссертации построена и протестирована система с БЗ (214 продукций) –  $KB^{pm}$ , решающая задачу классификации. На вход поступают знаки  ${}^8x^n|_j^h$ , а выход – множество из  $N_h$  пар «задача - методы»  $\pi_j^h \{m_l^a\}_j^h | l = 1, \dots, 6$ , идентифицирующих один или несколько классов базовых методов релевантных свойствам  $\pi^h \in \Pi^h$ .

Актуальность второй процедуры объясняется тем, что на выбор альтернативной модели влияют изменения значений параметров внешней среды и флуктуации свойств ресурсов из описания состояния ОУ, т.е.  ${}^6G^h$  и  ${}^2D^h$  (3.1), названные существенными, а множества их значений – областями релевантности моделей. Пусть имеется релевантное  $\pi_j^h$  множество моделей

$\{\dot{m}_i^a\}$ , язык описания состояния ОУ и группа экспертов, располагающих знаниями для спецификации областей релевантности. Требуется выделить на множестве значений  ${}^4\bar{X}^0 \subseteq {}^4X^0$  свойств в  ${}^2\bar{X}^0 \subseteq {}^2X^0$  из описания ситуаций (состояний) в ОУ с учетом воздействий внешней среды,  $-{}^{44}x_\nu^j = [{}^4\bar{x}_{\nu_{\min}}^0, {}^4\bar{x}_{\nu_{\max}}^0] \in {}^4\bar{X}^0 \times {}^4\bar{X}^0 \mid {}^4\bar{x}_{\nu_{\min}}^0, {}^4\bar{x}_{\nu_{\max}}^0 \in {}^4\bar{X}^0, \nu = 1, \dots, N_{\bar{X}}$  – интервалы значений свойств  ${}^2\bar{x}^0 \in {}^2\bar{X}^0$ , релевантные ограничения  $\dot{m}_i^a$ . В результате, формируется множество из  $N_m$  пар «модель – интервалы»  $\dot{m}_i^a \{ {}^{44}x_1^j, \dots, {}^{44}x_{N_{\bar{X}}}^j \}$ , где  $N_{\bar{X}} = vary$  – количество интервалов в области релевантности модели. Тогда может быть построена система с БЗ –  $KB^{\dot{m}x}$ , на вход которой подаются ситуации (состояния) в ОУ с учетом воздействия внешней среды, а на выходе идентифицируется область релевантности и соответствующая ей модель.

В итоге может быть определена модель  $W^{\pi^h \pi^u m^a m^i}$ :

$$W^{\pi^h \pi^u m^a m^i} = \langle W^{\pi^h \pi^u}, W^{m^a m^i}, \Psi^{\dot{m}^a} |_{ui}, \Psi^{\dot{m}^x}, KB^{\dot{m}^a}, KB^{\dot{m}^x} \rangle, \quad (4.5)$$

где  $\Psi^{\dot{m}^a} |_{ui}$  – соответствие, задающее множество пар «задача-методы»  $\{\pi_1^h \{m_j\} |_{1^h}, \dots, \pi_{N_h}^h \{m_j\} |_{N_h^h}\}$  для  $\forall \pi^h \in \Pi^h$ ;  $\Psi^{\dot{m}^x}$  – соответствие, задающее  $\{\dot{m}_1^a \{ {}^{44}x_1^1, \dots, {}^{44}x_{N_{\bar{X}}}^1 \}, \dots, \dot{m}_{N_m}^a \{ {}^{44}x_1^{N_m}, \dots, {}^{44}x_{N_{\bar{X}}}^{N_m} \}\}$  – множество пар «модель – интервалы» по каждой из  $N_m$  моделей.

Модель (4.5) объясняет неудачные попытки моделирования сложных практических задач. В этих попытках «вырезаются» отдельные части из  $\pi^u$ , имитируемые автономным методом. Такие упрощенные модели  $\pi^u$ , когда не учтена структура задачи, а точнее не решена исходная  $\pi^u$ , после «успешных» лабораторных испытаний идут в практику без перспектив использования. Наконец, (4.5) обладает гибкостью, открыта для модификации. В нее включены знания «задача-методы» и «метод-интервалы», что делает (4.5) мощным эвристическим средством разработки функциональных ГИИС для решения неоднородных задач.

В пятой главе «Моделирование функциональных ГИИС в PS-технологии» рассматриваются модели элементов ГИИС, схемы ролевых КМ ГИИС для крупно- и мелкозернистых элементов, гибридные стратегии, язык концептуального моделирования функциональных ГИИС, метод моделирования гибридных стратегий, принципы разработки ГИИС.

Элементы ГИИС – методы, модели, алгоритмы, программы из базовых классов. Элемент (компонента) – ресурс функциональных ГИИС для моделирования решения  $\pi^h$ . Элементы  $\alpha^h |_{j^\omega} \in A^h |_{j=1, \dots, 6}$ ;  $\omega = 1, \dots, N_h$ , для аналитических ( $j=1$ ), нейро (2), нечетких (3), эволюционных (4), статистических (5) вычислений, соответственно и логических рассуждений (6), имитирующие решение однородных задач

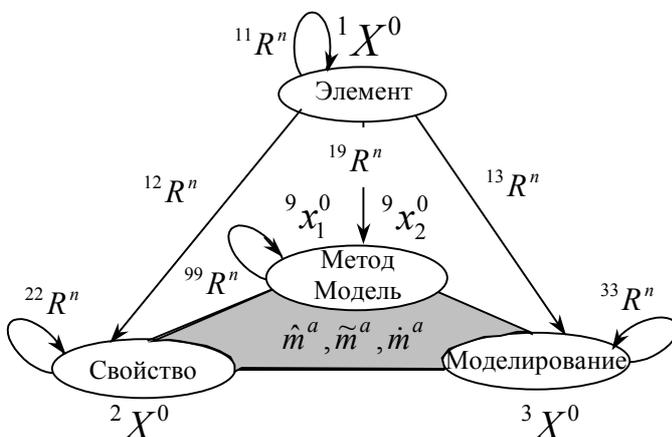


Рис. 7. Схема ролевых КМ элементов ГИИС (крупное зерно)

называемые функциональными. В ГИИС включаются и технологические компоненты  $\alpha^l |_{j^\tau} \in A^l |_{j=1, \dots, 6}$ ;  $l = 1, \dots, N_\tau$  для управления и (или) обмена информацией на элементах  $\alpha^h |_{j^\omega} \in A^h$ . Элемент построен в соответствии с автономным методом  $m^a$  (рис. 7). Отношения  ${}^1X^0 \rightarrow {}^{13}R^n \rightarrow {}^3X^0$  раскрывают методологический аспект элемента: конструирование, тестирование, имитацию решения  $\pi^h$  и эксплуатацию. Отношения

${}^1X^0 {}^{19}R^n {}^9x_1^0$ ,  ${}^1X^0 {}^{19}R^n {}^9x_2^0$  специфицируют элементы-методы и элементы-модели, соответственно. Отношения  ${}^1X^0 {}^{19}\hat{R}^n \hat{m}^a$ ,  ${}^1X^0 {}^{19}\tilde{R}^n \tilde{m}^a \Big| {}^{19}\hat{R}^n, {}^{19}\tilde{R}^n \subseteq {}^{19}R^n$  детализируют элемент через (4.1) или (4.2). Отношения  ${}^1X^0 {}^{12}R^n {}^2X^0$  специфицируют свойства элемента: «вход» –  ${}^2\tilde{x}_1^n$ , «выход» –  ${}^2\tilde{x}_2^n$  и «состояние» –  ${}^2\tilde{x}_3^n$  относительно модельного времени  $t \in T$ . Через вход и выход элементы получают исходную информацию  ${}^2D^h$  и выдают результаты  ${}^6G^h$  для решения  $\pi^h$ , соответственно. Свойство «состояние» фиксирует параметры и характеристики процесса решения, определяемого моделью вычислений. Представление элементов свойствами  ${}^2x^n$  названо крупнозернистым описанием в  $L_8^{ch}$  (рис. 8):

$$\alpha^h(t) \Big|_j = {}^1X^0 {}^{19}R^n {}^9\hat{m}^a \circ {}^1X^0 {}^{12}R^n {}^2\tilde{x}_1^n \circ {}^1X^0 {}^{12}R^n {}^2\tilde{x}_2^n \circ {}^2\tilde{x}_1^n(t) {}^{22}R_1^n {}^2\tilde{x}_2^n(t) \Big|_{j=2,3}, \quad (5.1)$$

или

$$\alpha^h(t) \Big|_j = {}^1X^0 {}^{19}R^n {}^9\hat{m}^a \circ {}^1X^0 {}^{12}R^n {}^2\tilde{x}_1^n \circ {}^1X^0 {}^{12}R^n {}^2\tilde{x}_2^n \circ {}^1X^0 {}^{12}R^n {}^2\tilde{x}_3^n \circ {}^2\tilde{x}_3^n(t) {}^{22}R_2^n {}^2\tilde{x}_3^n(t+1) \circ {}^2\tilde{x}_1^n(t) {}^{22}R_3^n {}^2\tilde{x}_3^n(t) \circ {}^2\tilde{x}_3^n(t) {}^{22}R_4^n {}^2\tilde{x}_2^n(t) \Big|_{j=1,4,5,6}, \quad (5.2)$$

где  ${}^{22}R_1^n, \dots, {}^{22}R_4^n$  – отношения «вход-выход», «состояние-состояние», «вход-состояние» и «состояние-выход», соответственно.

В отличие от  $\alpha^h(t) \Big|_2$  и  $\alpha^h(t) \Big|_3$  для  $\alpha^h(t) \Big|_1, \alpha^h(t) \Big|_4, \alpha^h(t) \Big|_5, \alpha^h(t) \Big|_6$  наблюдаемо и интерпретируемо в ОУ их состояние и поведение, что информативно для решения  $\pi^h$ .

Представление элементов схемами ролевых КМ и моделями вычислений названо мелкозернистым описанием элементов в  $L_8^{ch}$  (рис. 8). Например, для нейровычислений

$$\tilde{\alpha}^h(t) \Big|_2 = {}^1X^0 {}^{19}R^n {}^9\dot{m}_n^a \Big|^{Te} \circ {}^1X^0 {}^{11}R^n {}^1K^m \circ {}^1X^0 {}^{12}R^n {}^2K^m \circ {}^1X^0 {}^{13}R^n {}^3K_1^m \circ {}^1X^0 {}^{13}R^n {}^3K_2^m \circ {}^2K^m \circ {}^2K_1^m {}^{23}R^n {}^3K^m \circ {}^3K_1^m {}^{33}R^n {}^3K_2^m, \quad (5.3)$$

где  $\dot{m}_n^a \Big|^{Te}$  – КМ, построенная по схеме  $\hat{m}^a$ ;  ${}^3K_1^m, {}^3K_2^m$  – схемы ролевых КМ процедуры обучения и интерпретатора нейросети, соответственно;  ${}^2K^m$  – схема ролевых КМ декларативных описаний для нейровычислений;  ${}^{11}R^n, {}^{12}R^n, {}^{13}R^n, {}^{19}R^n$  – отношения определения;  ${}^{22}R^n$  – отношения включения;  ${}^{23}R^n$  – отношения декларативных описаний и процедур.

В диссертации построена схема ролевых КМ ГИИС для крупнозернистого описания элементов. Синтез ГИИС ( $\alpha^u$ ), имеющей вход, выход и состояние, из элементов  $\alpha^h \in A^h$  и  $\alpha^\tau \in A^\tau$ , выполнен для модели  $W^{\pi^h \pi^u m^a m^i}$  (4.5). Вход  ${}^2\hat{x}_1^n$  – это исходные данные  ${}^2D^u$  задачи  $\pi^u$ , передаваемые на вход одной или нескольких  $\alpha^h$  (или  $\alpha^\tau$ ), в соответствии с  $\hat{\pi}^u$ . Состояние гибрида  $\alpha^u$  в момент времени  $t$  – вектор  ${}^2\hat{x}_3^n = ({}^2\hat{x}_{3_1}^n, {}^2\hat{x}_{3_2}^n, {}^2\hat{x}_{3_3}^n)$ , где  ${}^2\hat{x}_{3_1}^n = (\{{}^2\tilde{x}_3^n \Big|_j\}, \{{}^2\tilde{x}_3^n \Big|_j\}, \{{}^2\tilde{x}_3^n \Big|_j\}, \{{}^2\tilde{x}_3^n \Big|_j\})$ ,  ${}^2\tilde{x}_3^n \Big|_j, \omega = 1, 3, 5, 6; j = 1, \dots, N_h$  – состояние  $j$ -го элемента из  $\omega$ -го базового класса методов;  ${}^2\hat{x}_{3_2}^n$  – псевдосостояние элементов с нейро- ( $\omega=2$ ) и нечеткими вычислениями ( $\omega=3$ ) вычислениями;  ${}^2\hat{x}_{3_3}^n$  – состояние элементов из  $A^\tau$ . Тогда схема КМ для спецификации в  $L_9^{cu}$  (рис. 8) крупнозернистых ГИИС, функционирующих в неоднородном пространстве состояний, имеет вид:

$$\alpha^u(t) = {}^1X^0 {}^{19}R^n {}^9m^i \circ {}^1X^0 {}^{12}R^n {}^2\hat{x}_1^n \circ {}^1X^0 {}^{12}R^n {}^2\hat{x}_2^n \circ {}^1X^0 {}^{12}R^n {}^2\hat{x}_3^n \circ {}^2\hat{x}_3^n(t) {}^{22}R_6^n {}^2\hat{x}_3^n(t+1) \circ {}^2\hat{x}_1^n(t) {}^{22}R_7^n {}^2\hat{x}_3^n(t) \circ {}^2\hat{x}_3^n(t) {}^{22}R_8^n {}^2\hat{x}_2^n(t) \circ {}^1X^n {}^{11}\ddot{R}^n {}^1X^n \circ {}^2\hat{x}_1^n {}^{22}R_9^n {}^2X_1^n \circ {}^2X_2^n {}^{22}R_{10}^n {}^2\hat{x}_2^n, \quad (5.4)$$

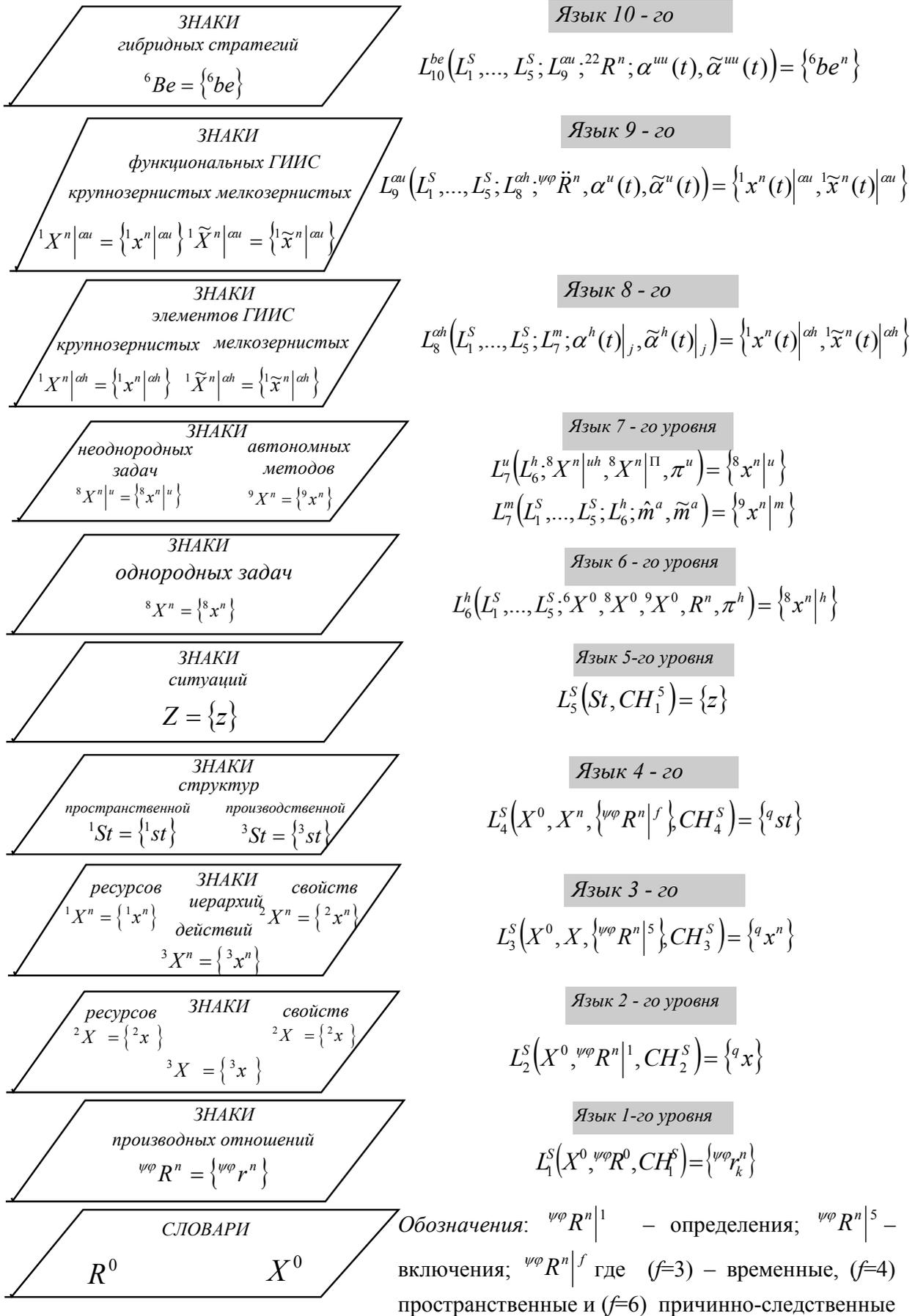


Рис.8. Иерархия языка концептуального моделирования функциональных ГИИС

где  ${}^1X^n \subseteq X^h$  – множество знаков ЯКМ  $\min$  из двух элементов, построенных по (5.1), (5.2);  ${}^2X_1^n, {}^2X_2^n$  – множества свойств «вход» и «выход» элементов из  ${}^1X^n$ , соответственно;

${}^{22}R_6^n, {}^{22}R_7^n, {}^{22}R_8^n$  – отношения функционирования ГИИС;  ${}^{11}\ddot{R}^n$  – отношения интеграции элементов из  ${}^1X^n$ ;  ${}^{22}R_9^n, {}^{22}R_{10}^n$  – отношения «входа» ГИИС и «входов» элементов, «выходов» элементов и «выхода» ГИИС, соответственно.

Для спецификации мелкозернистых ГИИС, как знаков в  $L_9^{ca}$  (рис. 8) в PS-технологии, предложена следующая схема:

$$\tilde{\alpha}^u = \alpha^u \circ {}^1x^n \circ {}^{11}R^n \circ {}^1X^{n-1} \circ X^{n-1} \circ {}^{11}\ddot{R}^n \circ {}^1X^{n-1}, \quad (5.5)$$

где  ${}^1X^{n-1}$  – множество элементов-зерен для конструирования  $\alpha^h \in A^h$  и  $\alpha^\tau \in A^\tau$ ;  ${}^{11}R^n$  – отношения включения зерен из  ${}^1X^{n-1}$  в знак  ${}^1x^n$  ГИИС;  ${}^{11}\ddot{R}^n$  – отношения интеграции.

В диссертации, в  $L_{10}^{be}$  (рис. 8), получены формализмы функционирования ГИИС, названного гибридным имитационным процессом. Каждый элемент  $\alpha^h$  изменяет только свою компоненту вектора состояния  ${}^2\hat{x}_3^n(t)$ . В некоторый момент  $t$ , определяемый  $\alpha^\tau$  или совпадающий с завершением работы  $\alpha_j^h$ , однородное функционирование текущей  $\alpha^h$  прерывается и  $\alpha^u$  переходит в состояние, определяемое уже другим элементом. В момент  $t_G$ , устанавливаемый  $\alpha^\tau$  или в соответствии с  $\hat{\pi}^u \in \hat{\Pi}^u$ , выдается результат  ${}^6G^u$  решения задачи. Концептуальные модели функционирования ГИИС названы гибридными стратегиями, поддерживаемыми в крупнозернистых ГИИС стандартными интерпретаторами моделей из ГМП.

Поскольку для имитации функционирования мелкозернистых ГИИС необходимы специальные интерпретаторы, в диссертации предложен метод моделирования гибридных стратегий для сконструированной динамической, семантической сети в метафоре конвейера. Ее суть состоит в том, что миры измерений, ресурсов, свойств и процессов, состояний и поведения, решений (рис. 3) представляются как неоднородная проблемная среда  $E^u$  (3.4) ограниченным набором выразительных средств: динамических объектов (курьеров), статических объектов (блоков) и связей. Этими средствами и конструируется сеть. Ее интерпретация рассматривается как гибридный имитационный процесс, в ходе которого собирается информация для решения неоднородной задачи.

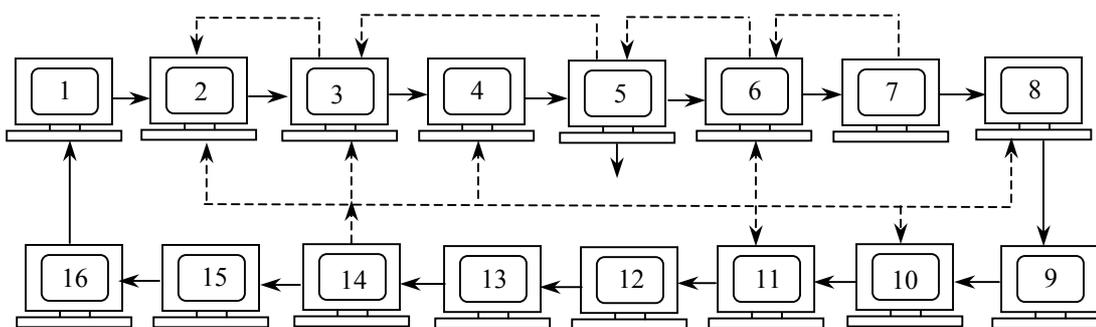
Языки КМ, знаки которых построены по схемам ролевых КМ производных отношений, ресурсов, свойств, действий, их иерархий, структур, ситуаций, а также (3.1), (3.3), (4.1), (4.2), (5.1) – (5.5), упорядочены в иерархию ЯКМ функциональных ГИИС (рис. 8):

$$L^{ЯКМ} = L^S \cup L_6^h \cup L_7^u \cup L_7^m \cup L_8^{ch} \cup L_9^{ca} \cup L_{10}^{be}. \quad (5.6)$$

Язык  $L^{ЯКМ}$  – это инструмент не только системного анализа предметной области, проблемной среды, неоднородных задач, автономных методов, но и синтеза моделей-систем и методов-систем, за рамками ограничений классов методов из автономного базиса. При этом как анализ, так и синтез основываются на концептуально полной для структурирования внешнего мира тетраде «ресурс – свойство – действие – отношение» (рис. 2).

В диссертации сформулированы 10 принципов, вместе со схемами КМ, моделями  $W^{\pi^h}$ ,  $W^{m^a}$  и (4.2) – (4.5), составляющие основу методологии и PS-технологии функциональных ГИИС.

В шестой главе «Системный анализ неоднородной задачи в PS-технологии» рассматриваются определение, структура и содержание проблемно-структурной методологии, включая ме-



Обозначения: 1 – идентификация неоднородной задачи; 2 – редукция неоднородной задачи; 3 – спецификация однородных задач; 4 – выбор автономных методов; 5 – проверка неоднородности; 6 – разработка автономных моделей; 7 – спецификация областей релевантности моделей; 8 – спецификация связей неоднородных задач; 9 – разработка интерфейсов автономных моделей; 10 – разработка таблицы гибридных стратегий; 11 – выбор стратегии из таблицы; 12 – инициализация ГИИС по выбранной стратегии (синтез метода решения неоднородной задачи); 13 – машинные эксперименты и интерпретация результатов; 14 – формирование множества альтернатив; 15 – совершенствование множества альтернатив и анализ результатов; 16 – эксплуатация и модернизация

Рис. 9. Проблемно-структурная методология разработки функциональных ГИИС

тодологии разработки автономных моделей, методы редукции неоднородных задач, метод и алгоритм выбора класса базовых автономных методов для разработки элементов ГИИС.

Методология разработки функциональных ГИИС сочетает системный анализ неоднородной задачи с синтезом метода ее решения путем подбора структуры ГИИС, релевантной составу, структуре и свойствам  $\pi^u$ . Такая методология и поддерживающая ее технология названы «проблемно-структурными» или кратко PS (от англ. “Problem” и “Structure”).

Проблемно-структурная методология – учение о структуре, логической организации, методах и средствах деятельности разработчика, выполняющего гибридизацию, объект-оригинал которой – это неоднородная задача, объекты-прототипы – классы базовых автономных методов, а объект-результат – функциональные ГИИС. Логическая организация PS-методологии изображена на рис. 9, а содержание кратко рассмотрено ниже: 1) в соответствии с (3.3), определяется цель, исходные данные для решения  $\pi^u$ , ее идентификатор и спецификатор; 2) продолжается системный анализ  $\pi^u$  и синтез модели мира задач  $W^{\pi^h \pi^u}$  (4.5), однако акценты смещаются на состав и структуру  $\pi^u$ . Исходная  $\pi^u$  редуцируется на множество  $\pi^h \in \Pi^h$  и строятся ее декомпозиции; 3) каждая  $\pi^h \in \Pi^h$  идентифицируется по (3.1); 4) задача  $\pi^h \in \Pi^h$  отображается в  $L_6^h$  методом интервью с разработчиком. После этого система с БЗ –  $KB^{mn}$  (4.5) рассчитывает балльные оценки отнесения  $\pi^h \in \Pi^h$  к классам базовых методов; 5) заключение о неоднородности  $\pi^u$  делает разработчик по балльным оценкам. Если  $\forall \pi^h \in \Pi^h$  оценки в пользу одного и того же класса методов близки друг к другу, то выдвигается гипотеза гомогенности и автономного моделирования. Если же в  $\pi^u$  обнаружены неоднородности, то необходима гибридизация; 6) продолжается разработка  $W^{\pi^h \pi^u m^a m^i}$  (4.5), а именно –  $W^{m^a}$ . Этап может выполняться и после этапа 8; 7) определяются отношения  ${}^{88}R_3^n$  на  $\Pi^u$  в  $W^\Pi$  (4.3); 8) на этом этапе по методологиям и технологиям автономного моделирования создается ГМП; 9) настраиваются утилиты из состава инструментальных средств PS-технологии, резко сокращающие трудозатраты на кодирование межпрограммного обмена; 10) отношения декомпозиции  ${}^{88}R_3^n$  (3.3) заменяются отношениями

${}^{u\phi}\ddot{R}^n$  (4.4), устанавливаются отношения  ${}^{88}R_4^n$  (3.3). Результат – таблица гибридных стратегий (ТГС), отображающая перечисленные выше связи  $\forall \pi^h \in \Pi^h$ ; 11) экспертом или программно, генератором случайных чисел выбирается стратегия из ТГС для последующего синтеза ГИИС, что отражает ситуацию, когда  $\pi^u$  имеет изменчивые состав и структуру и решается всякий раз заново; 12) в диалоге с пользователем по оригинальному алгоритму (см. ниже), инициализируется архитектура ГИИС, интерпретация которой рассматривается как метод решения задачи  $\pi^u$ ; 13) в определенном декомпозицией  $\hat{\pi}^u$  порядке имитируется решение  $\forall \pi^h \in \Pi^h$  и в соответствии с  ${}^{88}R_4^n$  для целей  ${}^6G^u$  задачи  $\pi^u$  и целей  ${}^6G^h$  задач из  $\Pi^h$  получается результирующая информация; 14) сгенерированное на этапе 13 решение заносится в множество альтернатив; 15) альтернативы рассматриваются как популяция индивидуумов, совершенствуемая ГА. После принятия решения спецификатор  $\pi^u$  пополняется  ${}^3X^n$ , а по окончании операции – оценкой ее результатов  ${}^7O^u$  и оценками результатов  $\forall \pi^h \in \Pi^h$ ; 16) поддержка ГМП, БД и БЗ элементов ГИИС в актуальном состоянии при изменениях в одном из элементов.

Поскольку методология функциональных ГИИС, построенных на интегрируемых в программную систему элементах, должна основываться на методологиях разработки моделей из ГМП, в диссертации представлены жизненными циклами и исследованы методологии разработки корректных, эффективных автономных моделей для базовых классов методов. Определены понятия однородного и неоднородного моделирования.

PS-методология имеет следующие основные свойства: 1) применение неоднородных по составу, структуре и свойствам моделей к практическим задачам, всесторонне и глубоко изучаемых методами системного анализа, а также основанного на знаниях, метода подбора автономных инструментариев для решения  $\pi^h \in \Pi^h$ ; 2) широкое использование схем ролевых КМ, направляющих деятельность разработчика, чтобы избежать ошибок при разработке ГИИС; 3) плюрализм, выражающийся в создании для  $\pi^u$  ГМП, над которым строится метод решения  $\pi^u$ ; 4) применение оригинального алгоритма конструирования ГИИС, включающего процедуру выбора моделей из ГМП по областям релевантности.

Особое внимание в диссертации уделено редукции  $\pi^u$ , для чего обобщены методы редукции сложности задач Декарта, Данцига-Вулфа (1960), Бендерса (1962), Розена (1967), Месаровича и др. (1974), Нильсона (1973), Уэно и Исудзука (1989), Перегудова и Темникова (1989) и развит новый класс методов редукции неоднородных задач: по фазам управления, по информационно-управляющим отношениям, по стратам, смешанной редукции. Методы редукции ранжированы для гибкого сочетания достоинства различных методов – резкого, эвристического сокращения размерности области допустимых решений на первых этапах анализа неоднородных задач с формальными логическими приемами анализа на последующих этапах, где уже накоплены фундаментальные поисковые знания в символьных системах и аналитических моделях.

Поскольку ориентация на получение аналитических зависимостей, отображающих спецификацию однородной задачи на множество классов методов в автономном базисе ГИИС в настоящее время проблематична, в диссертации предложен метод, основанный на знаниях автоматизированного выбора класса автономных методов для решения однородной задачи. Тести-

рование базы знаний  $KB^{zm}$  (4.5) показало, что система работает на уровне эксперта-разработчика и чувствительная к ошибкам пользователя.

В седьмой главе «Методы синтеза ГИИС в PS-технологии» рассмотрен синтез метода решения неоднородных задач для декомпозиций типа «дерево» и «сеть», язык и методология конвейерного моделирования мелкозернистых функциональных ГИИС, свойства проблемно-структурной методологии.

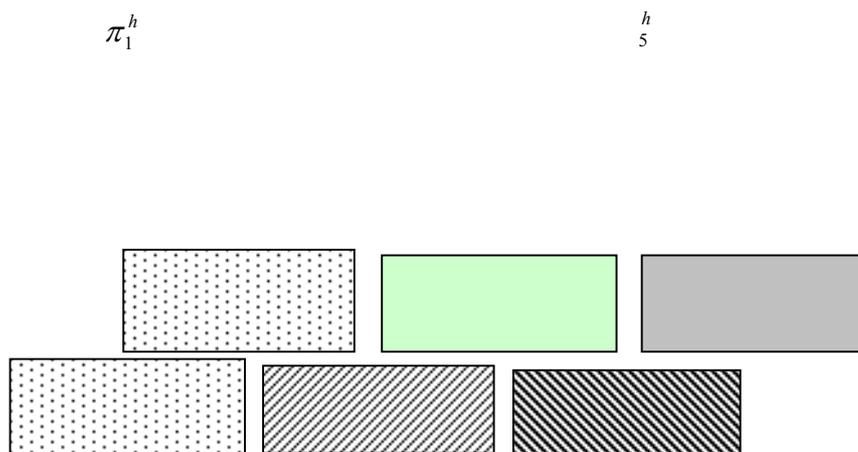


Рис. 10. Декомпозиция неоднородной задачи и гетерогенное модельное поле

Конструирование метода решения  $\pi^u$  рассматривается как итерационный процесс связывания отношениями интеграции  ${}^{\psi\phi}\ddot{R}^n$  (4.4) моделей из ГМП и интерпретации интегрированной модели по стратегии из ТГС. В диссертации сформулированы две задачи разработки ГИИС, релевантной  $\hat{\pi}^u$ . Ниже рассмотрена постановка и укрупненное решение одной из них.

Пусть для  $\pi^u$  (рис. 10) задана декомпозиция  $\hat{\pi}^u = (\Pi^h, {}^{88}r_{3_1}^n) | {}^{88}r_{3_1}^n \in {}^{88}R_3^n$  в виде дерева, ГМП  $\dot{M}^a$ , ТГС для  $\hat{\pi}^u$ , которые каждой тройке  $\pi_\gamma^h, {}^{88}r_{3_1}^n, \pi_\zeta^h \in \hat{\pi}^u | \gamma, \zeta = 1, \dots, N_h, \gamma \neq \zeta$  взаимнооднозначно сопоставляют множество (однозначное) отношений интеграции  $\{ {}^{11}\ddot{r}^n \} | {}^{11}\ddot{r}^n \in {}^{11}\ddot{R}^n$ , т.е.  $\pi_\gamma^h, {}^{88}r_{3_1}^n, \pi_\zeta^h \leftrightarrow \{ {}^{11}\ddot{r}^n \}$ , множества отношений  ${}^{88}R_4^n$  (3.3), интерпретаторов автономных моделей из ГМП и межмодельных интерфейсов  $\{ {}^{99}\rho^u \}$ . Требуется найти список  $Ls^m$  из троек  $(\dot{m}_x^a, {}^{11}\ddot{r}^n | {}^x \dot{m}_y^a) | {}^x \dot{m}_y^a$ , где  $x, y = 1, \dots, N_m$ , причем каждой модели  $\dot{m}^a$  сопоставлен интерпретатор автономной модели, а каждому отношению интеграции  ${}^{11}\ddot{r}^n | {}^x$  – интерфейсы  ${}^{99}\rho^u | {}^x$  и (или)  ${}^{99}\rho^u | {}^y$ .

Для решения задач разработаны соответствующие методы и алгоритмы. Суть одного из них изображена на рис. 11. Алгоритм пробегает дерево декомпозиции от листьев к корню и рассматривает множества пар вершин, одна из которых – лист. Для каждой пары инициализируется матрица  $E_j^l$ . На очередном шаге для выбранной матрицы с использованием ТГС активируются элементы  $\varepsilon_{q\omega}^j$  в  $E_j^l$ , для которых между  $\dot{m}_q^h$  и  $\dot{m}_\omega^h$  есть отношение  ${}^{11}\ddot{r}^n$  (на рис. 11 это показано перечеркиванием клетки элемента матрицы  $E_j^l$ ). Далее, модель  $\dot{m}^a$ , соответствующая строке, обрабатывается по модели оценки релевантности, и бальная оценка заносится в знаменатель  $\downarrow \varepsilon_{q\omega}^j$  дроби-элемента матрицы. Затем моделируются решения  $\pi_\zeta^h$  на каждой из  $\{ \dot{m}_q^a \}$  и значения выходов  $\dot{m}_q^a$  поступают на входы  $\dot{m}_\omega^a$ . Используя ЭС или НС, вычисляются оценки моделей  $\{ \dot{m}_\omega^a \}$  задачи  $\pi_\gamma^h$ , и заносятся в числители  $\uparrow \varepsilon_{q\omega}^j$  дробей-элементов  $\varepsilon_{q\omega}^j$ . По формуле: