

# **МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ АГЕНТОВ ДЛЯ ПРОДУКЦИОННЫХ СИСТЕМ**

**05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки)»**

---

И.А. Бессмертный

# ПРЕДМЕТ ИССЛЕДОВАНИЯ: ПРОДУКЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ЗНАНИЙ

## Преимущества:

- ❑ Компактное представление знаний
- ❑ Простота кодирования для ввода в ЭВМ
- ❑ Широкое применение (юридические документы, инструкции,...)
- ❑ Простота восприятия

## Недостатки:

- ❑ Экспоненциальная сложность поиска на дереве решений
- ❑ Неизбежное накопление противоречий по мере роста базы знаний

## Существующие решения:

- ❑ ТРИЗ
- ❑ Экспертные системы
- ❑ Semantic Web

# ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Цель:** Разработка принципов построения и концептуальной модели интеллектуального агента для систем искусственного интеллекта (ИИ) на основе продукционной модели знаний.

## **Задачи:**

- **Выбор метрик и оценка объемов знаний** в формализованных источниках на основе теории информации.
- Исследование и разработка **методов ускорения логического вывода** в продукционных системах.
- Исследование *компетентностного подхода к ИИ с реализацией механизма навыков.*
- **Разработка концептуальной модели интеллектуального агента**, реализующего в себе компетентностную модель ИИ и управление контекстом.
- **Разработка средств визуализации знаний** и интерфейса человек-машина для взаимодействия пользователя с интеллектуальными агентами и представления результатов работы агентов.

# КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ЗНАНИЙ

## Требования к оценке:

- **Объективность.** Оценка не должна зависеть от субъекта оценивания или автора метода оценки.
- **Воспроизводимость.** Оценка не должна зависеть от конкретной аппаратной или программной реализации искусственного интеллекта.
- **Универсальность.** Оценка должна быть применимой как к естественному, так и искусственному интеллекту.
- **Количественный характер.** Оценка должна выражаться в абсолютных величинах.

# ОЦЕНКА ИНФОРМАТИВНОСТИ ПОНЯТИЙ

Энтропия  $H(x) = -\sum_{i=1}^n p(x_i) \log_2 p(x_i)$       Информация  $I = \log_2 n$

## АЛФАВИТНЫЙ ПОДХОД

Английский алфавит: 26 букв  $\rightarrow I = 4.7$  бит

Немецкий алфавит : 31 буква  $\rightarrow I = 4.95$  бит

$I(\text{speed}) = 23.5$  бит

$I(\text{Geschwindigkeit}) = 74.3$  бит      !

**СЛОВАРНЫЙ ПОДХОД**      Слово – минимальная лексическая единица (атом)

Энтропия  $H(D) = -\sum_{i=1}^{|D|} p(w_i) \log_2 p(w_i)$       Информация  $I(D) = \log_2 |D|$

$w$  – слово,  $D$  – словарь

**Целиком зависит от словаря**

# ОЦЕНКА ИНФОРМАТИВНОСТИ ПОНЯТИЙ

## СЛОВАРНО-КОНТЕКСТНЫЙ ПОДХОД

Пусть понятие  $E_i$  определено на множестве  $E_{i+1} = \{E_j\}$ , имеющем мощность  $n_i$ . Тогда  $I(E_i) = \log_2 n_i$ .

При объединении уровней

Контекста 
$$I(E_i, E_j) = \sum_{k=i}^j \log_2 n_k.$$

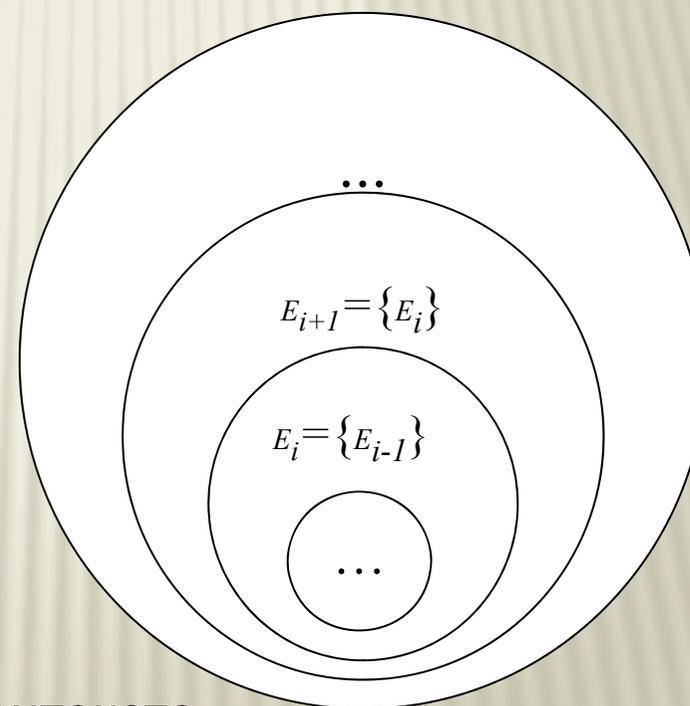
### Информативность фактов:

$$I(f(s, p, o)) = \log_2 |S \cap P \cap O|$$

$S$  – множество субъектов,

$O$  – множество объектов,

$P$  – множество предикатов в данном контексте

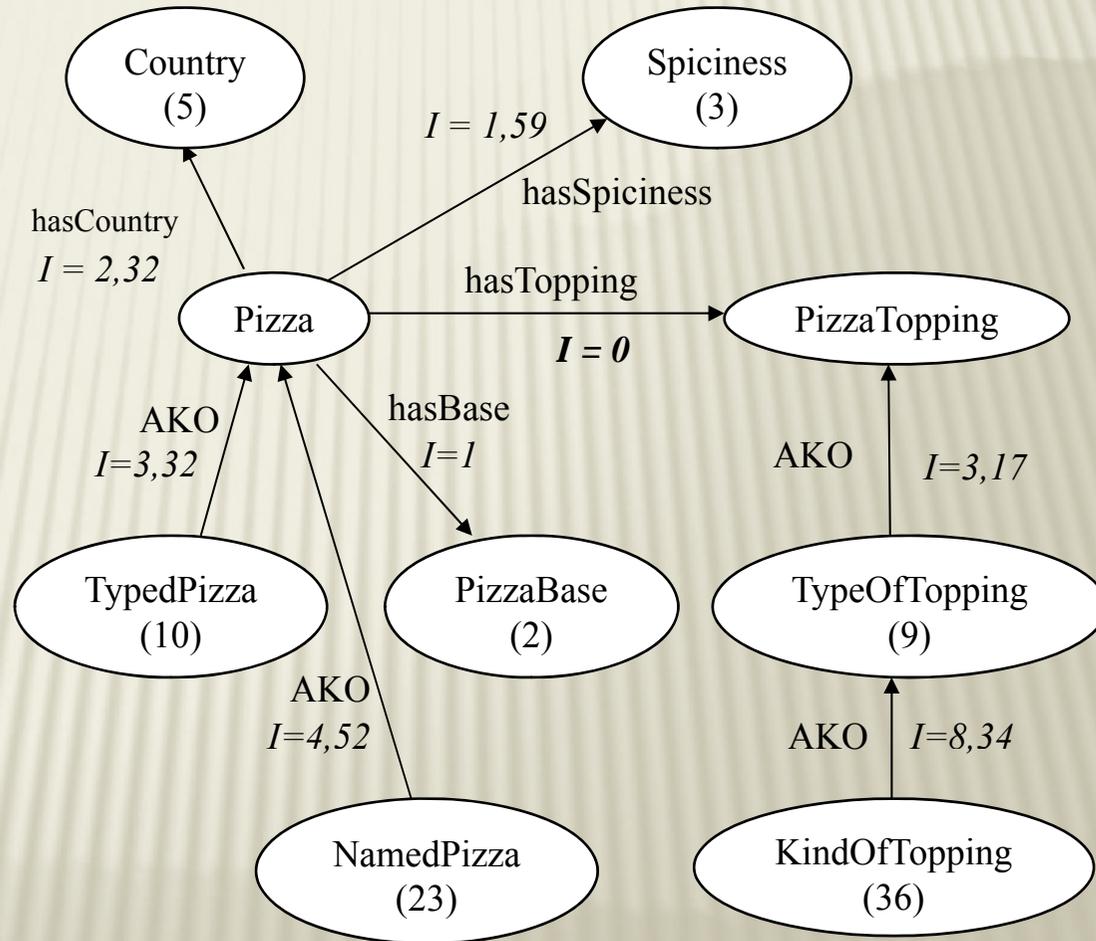


# ОЦЕНКА ИНФОРМАТИВНОСТИ ФАКТОВ

## ПРИМЕР

### Онтология Пицца

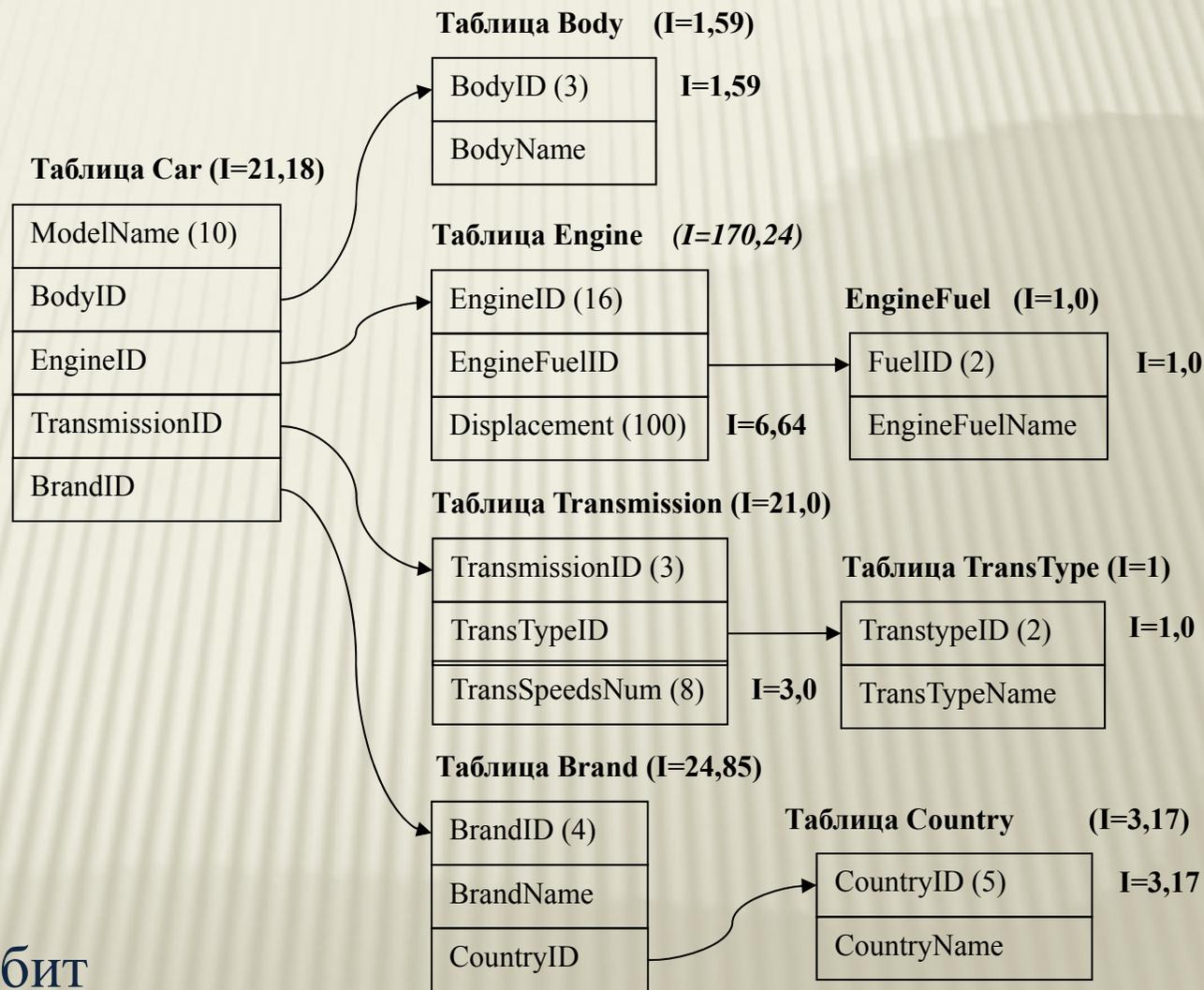
$$I(Pizza) = 2,32 + 1,59 + 3,32 + 1 + 3,17 + 4,52 + 8,34 = 24,26 \text{ бит.}$$



# ОЦЕНКА КОЛИЧЕСТВА ИНФОРМАЦИИ В БАЗАХ ДАННЫХ

## ПРИМЕР

$$\begin{aligned}
 I(db_{Car}) = & \\
 & I(T_{Car}) + \\
 & + I(T_{Engine}) + \\
 & + I(T_{Body}) + \\
 & + I(T_{Transmission}) + \\
 & + I(T_{Brand}) + \\
 & + I(T_{Fuel}) + \\
 & + I(T_{TransType}) + \\
 & + I(T_{Country}) = 244 \text{ бит}
 \end{aligned}$$



# ОЦЕНКА ИНФОРМАТИВНОСТИ ФАКТОВ

## ВЫВОДЫ

1. Информативность понятий невозможно оценить вне контекста – информационной среды, которая должна быть одинаковой для всех участников обмена информацией, в противном случае одни и те же факты могут быть интерпретированы по-разному.
3. Определение контекста является неотъемлемой частью любого коммуникативного акта, как между людьми, так и между компьютерами. Установление контекста позволяет обходиться короткими сообщениями, одинаково понятными отправителю и получателю.
5. В рамках любого контекста устанавливается словарь понятий, одинаковый для всех участников обмена информацией, и появляется возможность вычислить информативность всех понятий.
6. Минимальной единицей знаний является факт, составленный из понятий, как молекула из атомов. Информативность фактов, как и информативность понятий, может определяться только в рамках определенного контекста.
7. Предложенные методы позволяют подвергать предметную область декомпозиции и вычислять информативность баз знаний на разных уровнях контекста, а также оценивать количество информации в базах данных, что может быть полезным для контроля оптимальности структуры в ходе проектирования баз данных и знаний.

# МЕТОДЫ УСКОРЕНИЯ ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА

## Индексация и предварительный отбор фактов

Факт  $f(s,p,o)$ . Нумеров

Индекс:  $X = \{x\} =$

где  $w$  – место термина  $t$

$[i_{tw}]$  – список номер

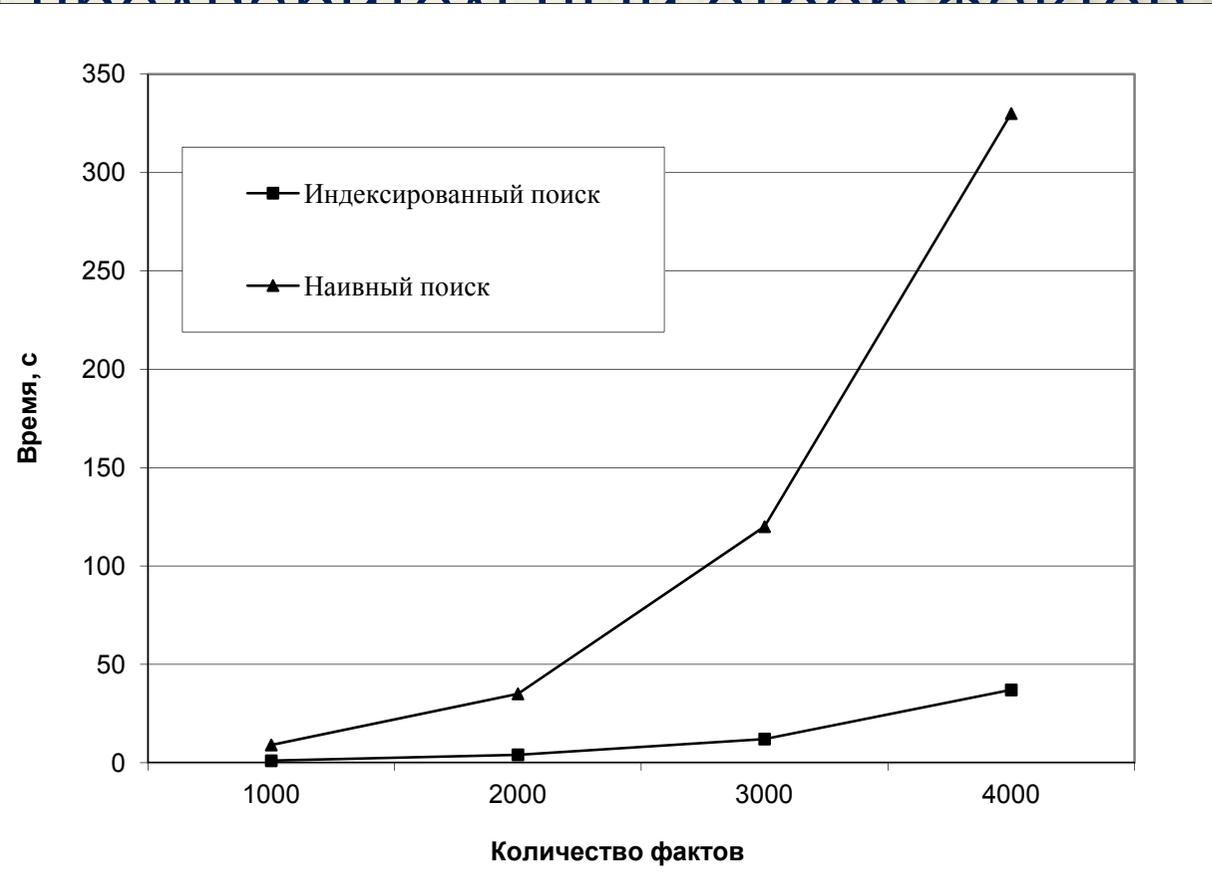
Релевантные факты д

$$I_j = [i_{ts}] \cap [i_{tp}] \cap$$

$$I_j = [i_{tp}] \cap [i_{to}],$$

$$I_j = [i_{ts}] \cap [i_{tp}],$$

$$I_j = [i_{tp}], p_j = c$$



$$U_v = [u_v] = \bigcap_{j \in C} [u_j]$$

$$I_{vj} = [i, u_i] \div [u_v]$$

$$I_j = \bigcap_{v \in C_j} I_{vj}$$

# МЕТОДЫ УСКОРЕНИЯ ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА

## Применение операций реляционной алгебры

Пусть

получ

$x_{II}$

Вмест

➤ пере

➤ вычи

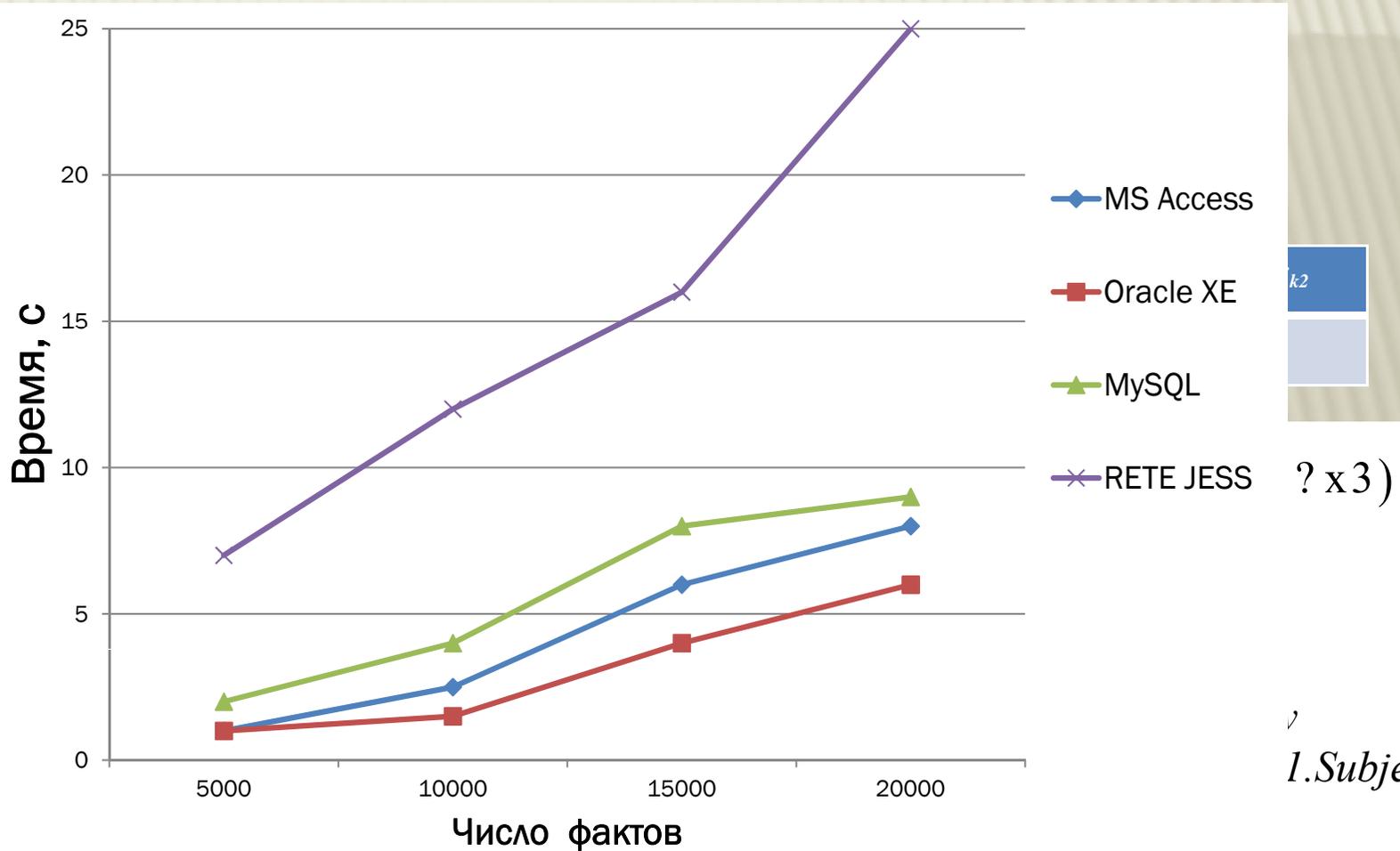
➤ объе

➤ соед

➤ прое

➤ допо

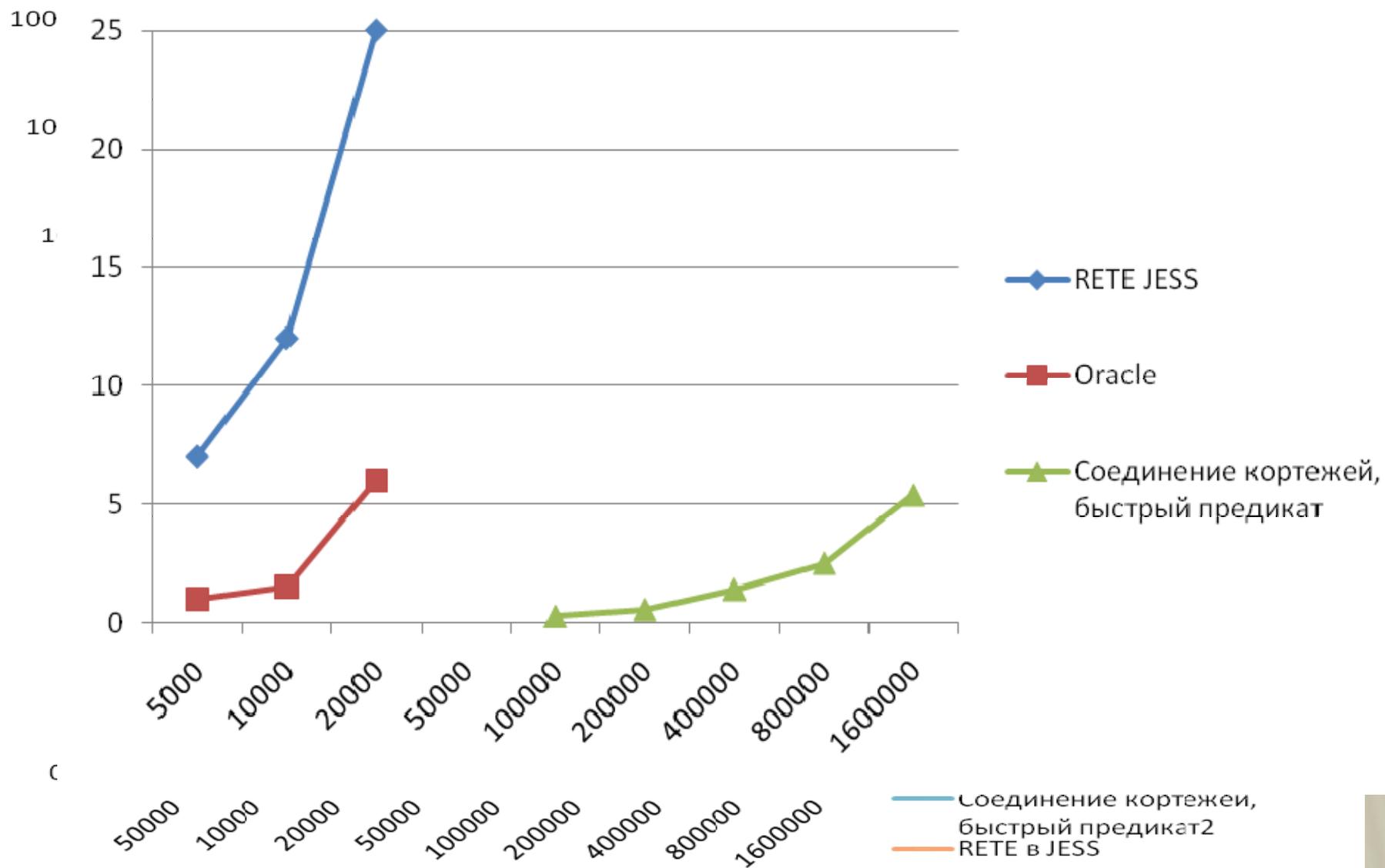
➤ филь



? x 3)

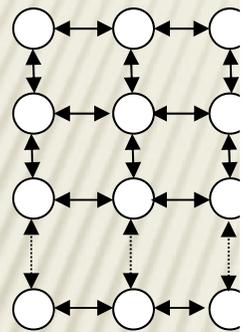
1.Subject

# МЕТОДЫ УСКОРЕНИЯ ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА



# МЕТОДЫ УСКОРЕНИЯ ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА

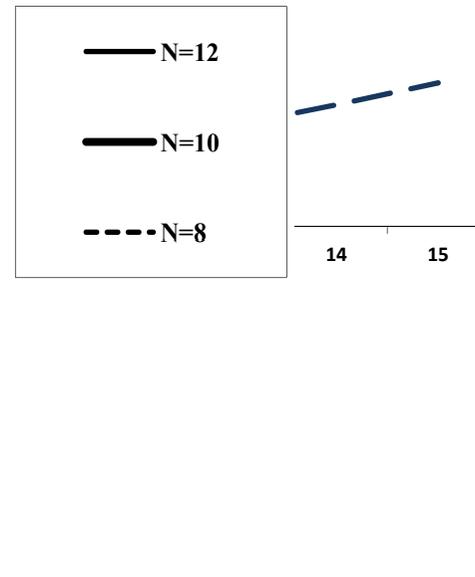
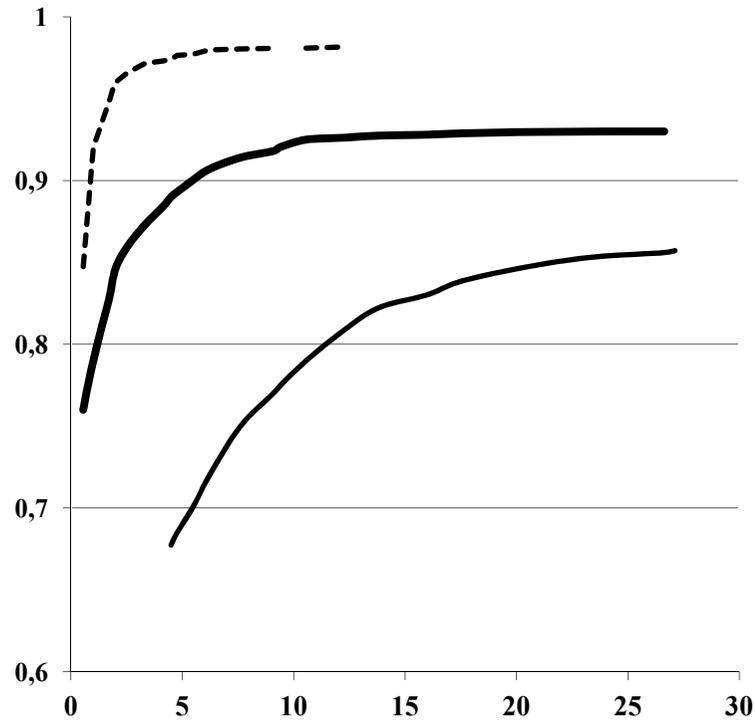
## Агентный подход к поиску решений и роевой интеллект



Число ра  
- при по  
- при слу  
Один аге  
глуби  
Много а  
ВОЗМО

Время покрытия сети маршрутами T, с

Показатель оптимальности



Время покрытия сети, с

# МЕТОДЫ УСКОРЕНИЯ ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА

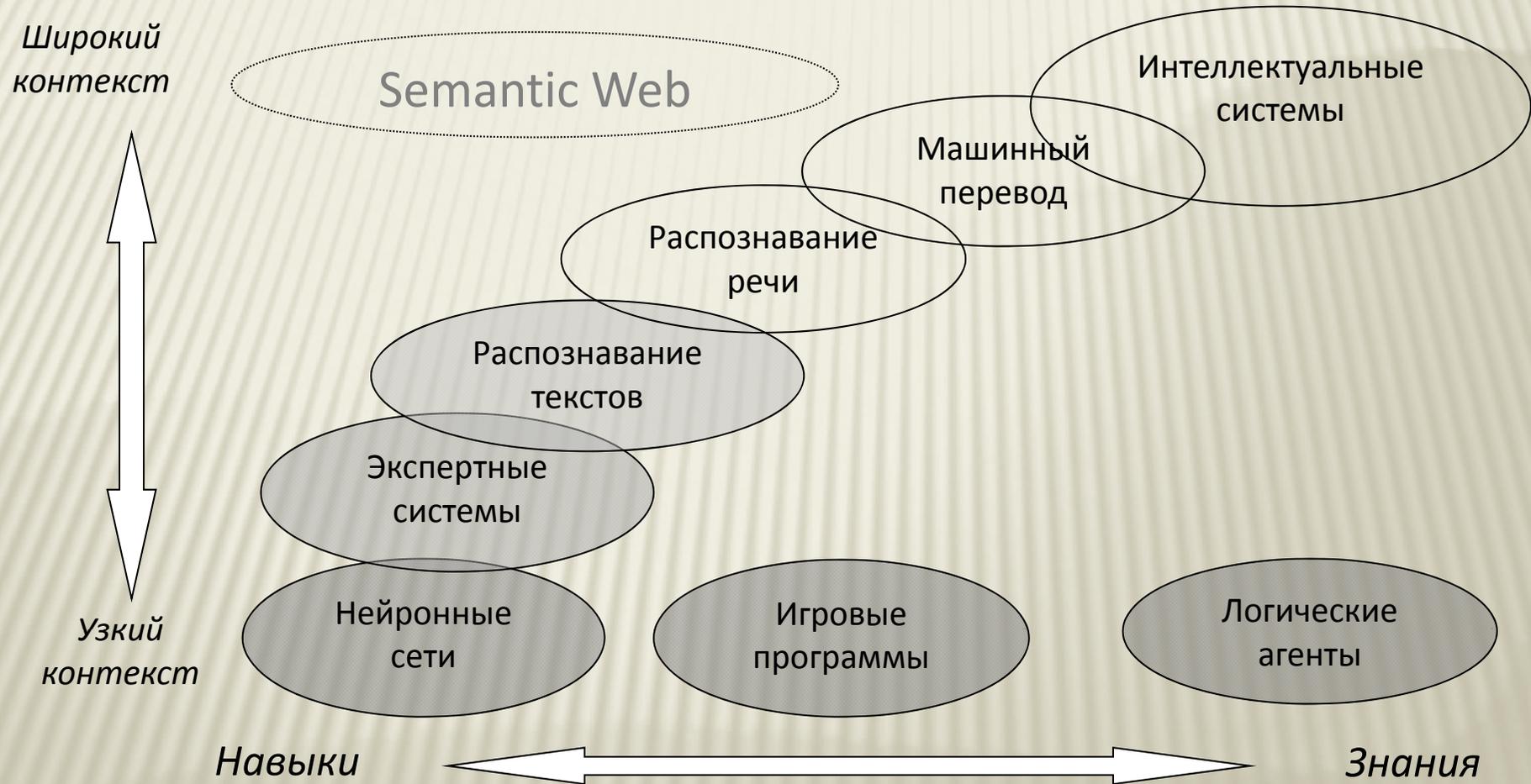
## Выводы:

1. Индексация фактов дает ускорение поиска решений в больших базах знаний, но сохраняется экспоненциальная сложность вывода.
2. Применение операций реляционной алгебры над множествами кортежей переменных обеспечивает квадратичный рост сложности вывода.
3. Применение реляционных операций над отсортированными списками позволяет говорить о линейной сложности вывода в пределах одного правила.
4. Мультиагентный подход в сочетании с роевым интеллектом позволяет эффективно решать задачи, имеющие экспоненциальную сложность. Качество решения – функция времени.

# КОМПЕТЕНТНОСТНЫЙ ПОДХОД К ИИ

Проект	Знания	Умения	Навыки	Успешность
Игровые программы	Правила игры	Эвристические алгоритмы, альфа-бета отсечения	Базы дебютов, партий лучших гроссмейстеров (шахматы)	Да
Экспертные системы	Факты, полученные от пользователя в диалоге	Машина вывода продукционной системы	Правила, реализующие связи внешних проявлений с гипотезами	Да
Нейронные сети	Обучающие выборки	Алгоритмы обучения	Обученные сети	Да
Логические агенты	Данные от сенсоров	Алгоритмы поведения	Нет	Да
Оптическое распознавание символов	Словари, грамматики	Алгоритмы обучения	Типовые образы символов, шаблоны предложений	Да
Распознавание речи	Словари фонем, слов, грамматики	Алгоритмы распознавания слов	Типовые сочетания слов	Распознавание отдельных слов
Машинный перевод	Словари, грамматики	Алгоритмы перевода	Нет	На уровне отдельных фраз
Интеллектуальные системы	Обширные базы фактов и правил	Машина вывода с алгоритмами ускорения	Нет	На уровне отдельных задач

# КОМПЕТЕНТНОСТНЫЙ ПОДХОД К ИИ



# ВЫВОД НА ОСНОВЕ ПРЕЦЕДЕНТОВ (CASE BASED REASONING)

% ----- Без прецедентов -----

move(1). move(2). move(3).

% правило хорошего хода

good\_move( X, M ) :-

move(M), X - M = 1.

good\_move( X,M ) :-

move(M),

X1 is X-M,

not(good\_move(X1,\_)).

% -----С прецедентами -----

move(1). move(2). move(3).

good\_move( X, M ) :- precedent(X,M),!

good\_move( X, M ) :-

move(M), X - M = 1.

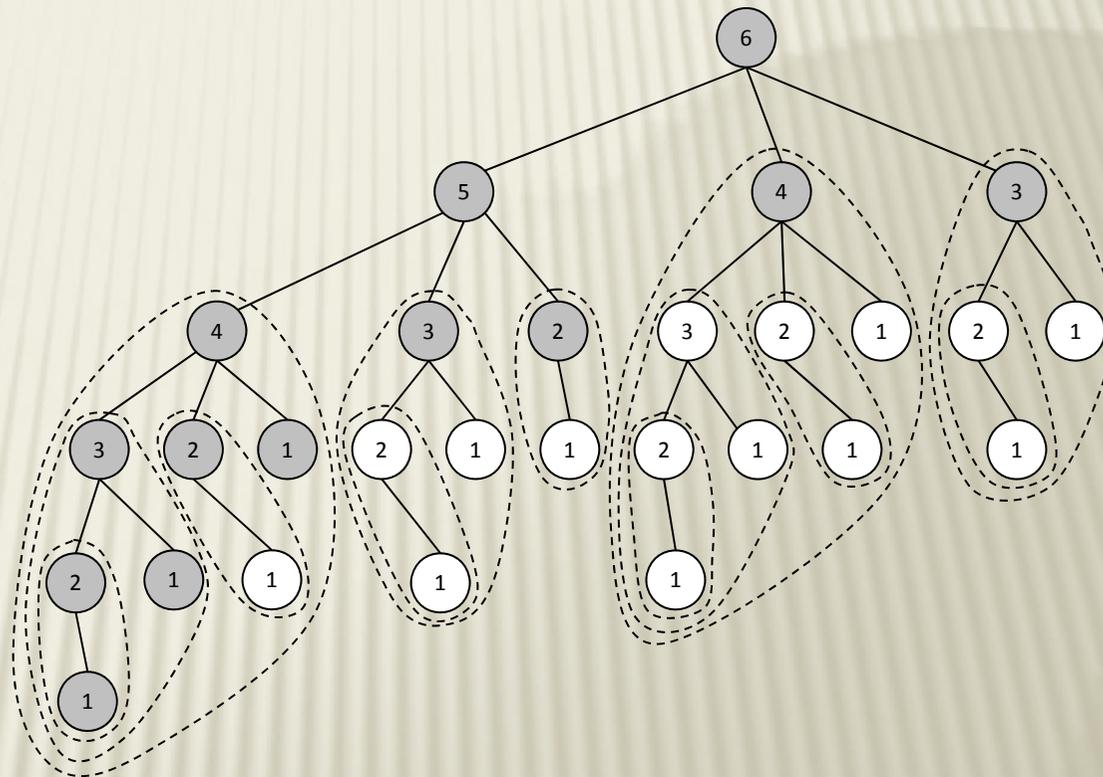
good\_move( X,M ) :-

move(M),

X1 is X-M,

not(good\_move(X1,\_)),

assert(precedent(X,M)).



Для N=23: Исходное дерево - 20 тыс.узлов, с применением прецедентов - 57 узлов.

# ВЫВОД НА ОСНОВЕ ПРЕЦЕДЕНТОВ : МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ АКТУАЛЬНОСТИ

1. Актуальность к ним

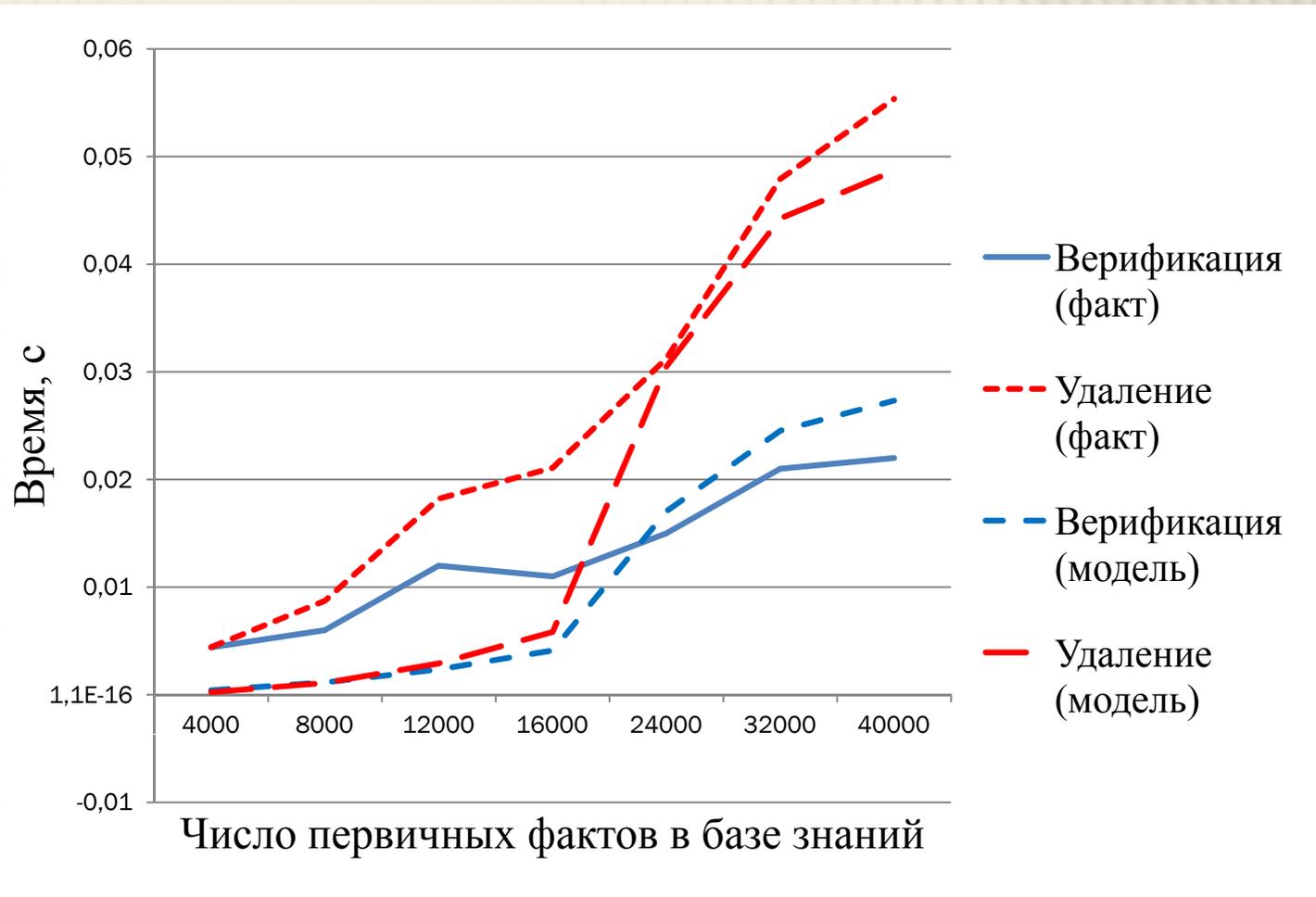
Ср. время извлечения  $t_1$

2. При каждом прецеденте

Ср. время извлечения

Ср. время удаления

$\tau$  – время извлечения  
 $P$  – множество использованных



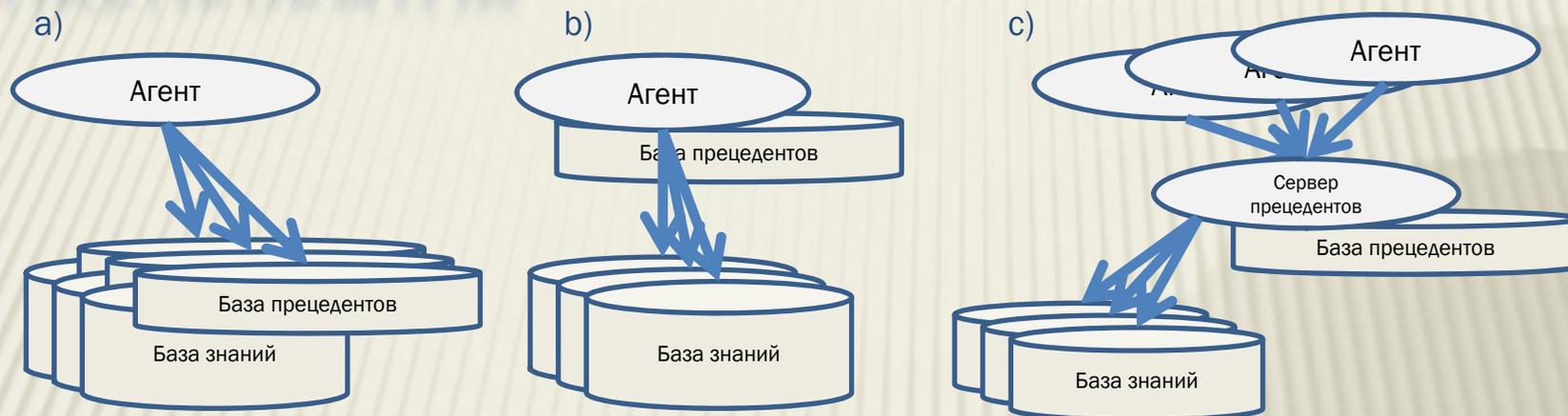
# КОНЦЕПЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АГЕНТА

Компетентностный подход позволяет устранить экспоненциальную сложность логического вывода в продукционных системах

## ПРОБЛЕМЫ

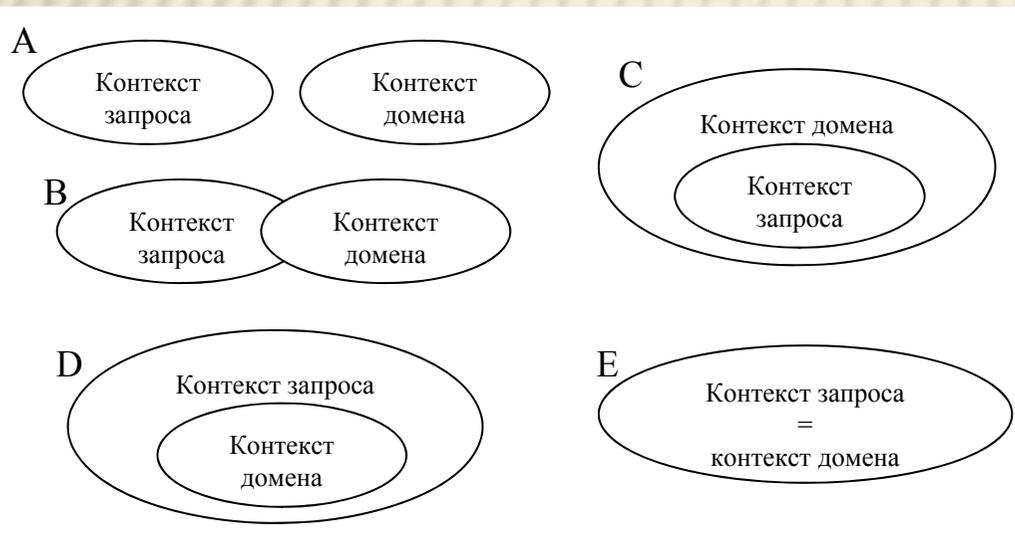
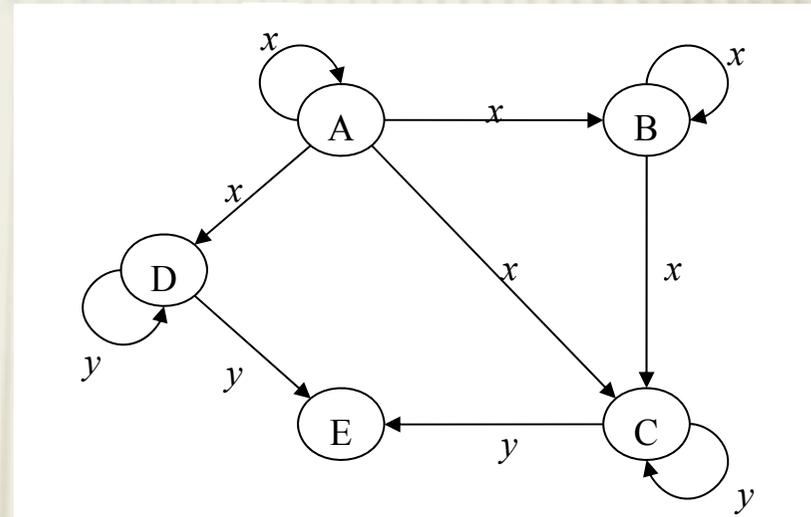
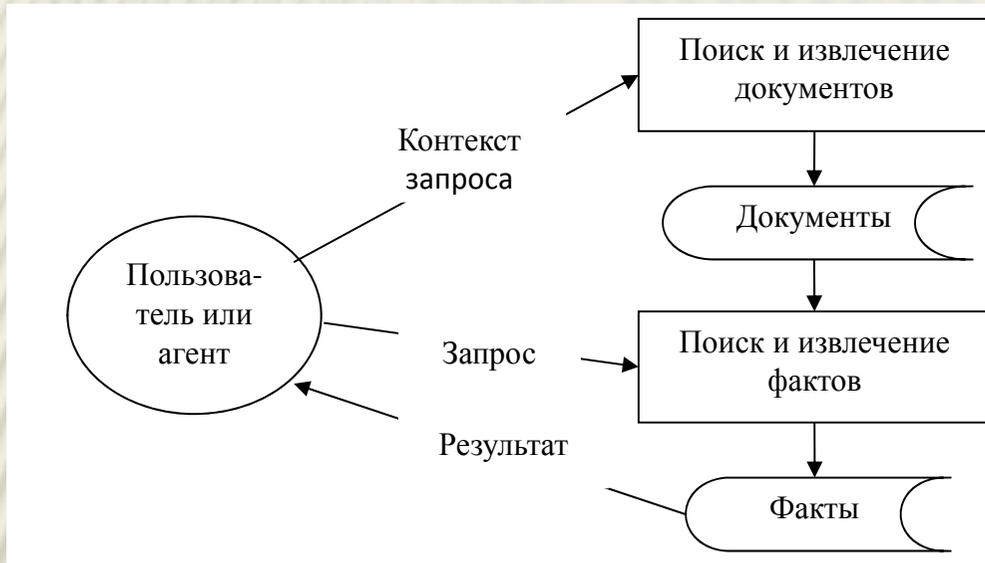
- проблема актуальности прецедентов;
- проблема размещения и администрирования прецедентов;
- проблема противоречивости фактов.

# ВАРИАНТЫ РАЗМЕЩЕНИЯ БАЗЫ ПРЕЦЕДЕНТОВ



Вариант а)	Вариант б)	Вариант с)
<b>Преимущества</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Децентрализация базы прецедентов</li> <li>▪ Авторы документов могут контролировать состав прецедентов</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>Персональный агент для каждого пользователя</b></li> <li>▪ Совпадение контекста пользователя с базой прецедентов</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>Широкая доступность</b></li> <li>▪ <b>Повторное использование прецедентов</b></li> <li>▪ Возможность оптимизации состава базы знаний</li> <li>▪ <b>Возможность коммерциализации</b></li> </ul>
<b>Недостатки</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Множество прецедентов не коррелирует с множеством запросов</li> <li>▪ <b>Необходимость локального размещения всех фактов предметной области</b></li> <li>▪ <b>Зависимость от авторов</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>Длительное обучение агента</b></li> <li>▪ Большие затраты на администрирование</li> <li>▪ <b>Множественное дублирование прецедентов</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Не учитывается контекст пользователя</li> <li>▪ Отчуждение от авторов документов</li> <li>▪ <b>Необходимость капиталовложений</b></li> </ul>

# УПРАВЛЕНИЕ КОНТЕКСТОМ



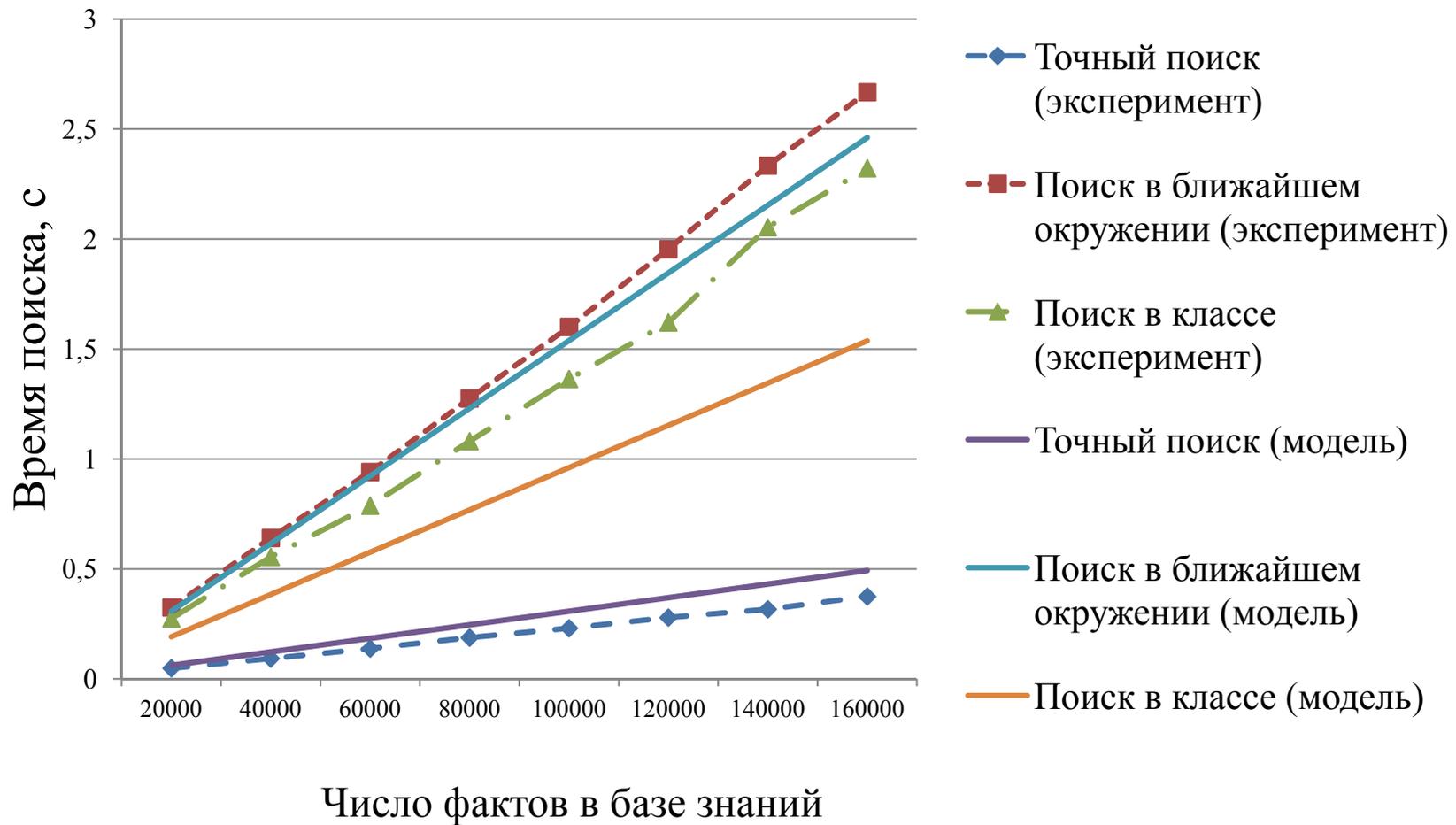
$$T \approx \tau N \frac{(A + 3)}{2},$$

$$T_x \approx \tau N (1 + A + \delta),$$

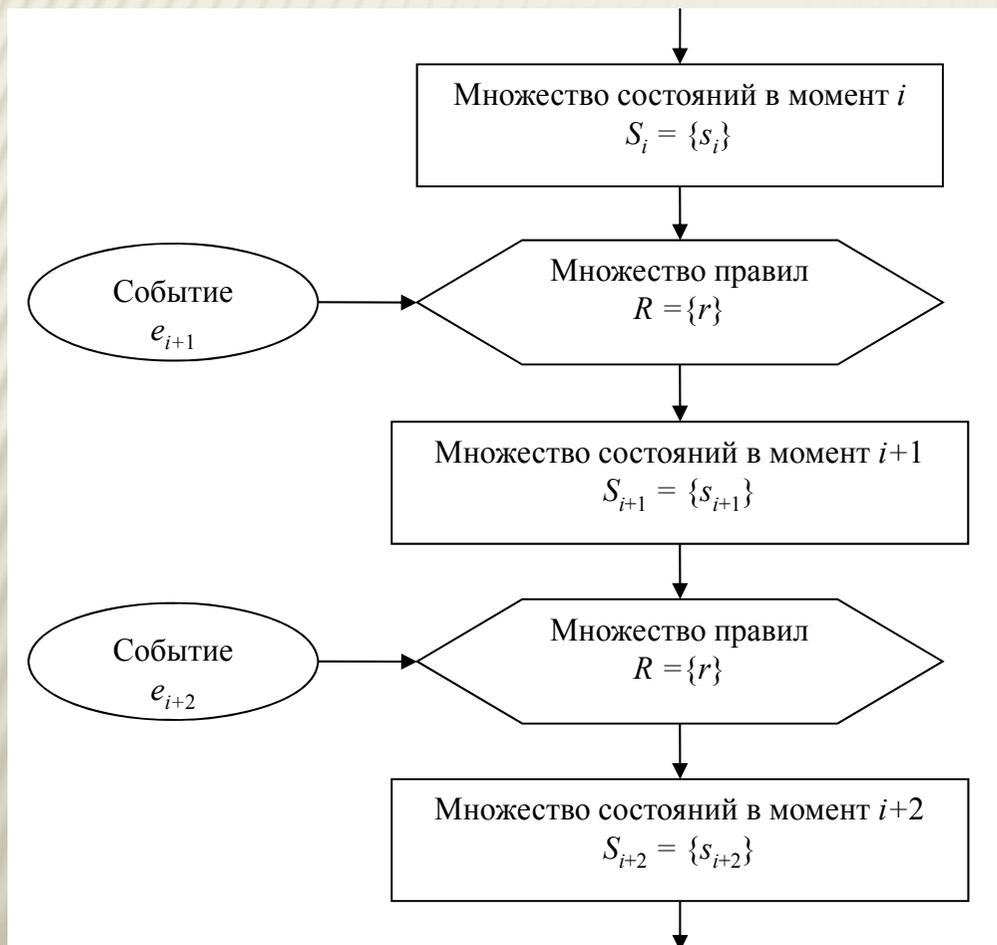
$$T_c \approx \tau N \left(1 + A + C + \frac{A}{C}\right).$$

где  $N$  – число фактов в базе знаний,  $\tau$  – среднее время доступа к одному факту,  $A$  – число атрибутов или классов, релевантных условию запроса,  $i=(1, n)$ ,  $\delta_i$  – число допустимых значений атрибута,  $C$  – число экземпляров класса.

# УПРАВЛЕНИЕ КОНТЕКСТОМ



# УПРАВЛЕНИЕ ПРЕЦЕДЕНТАМИ В ПРОСТРАНСТВЕ СОСТОЯНИЯ-СОБЫТИЯ



Первичные факты

$E = \{e\}$  - события,

Вторичные факты

$S = \{s\}$  - состояния

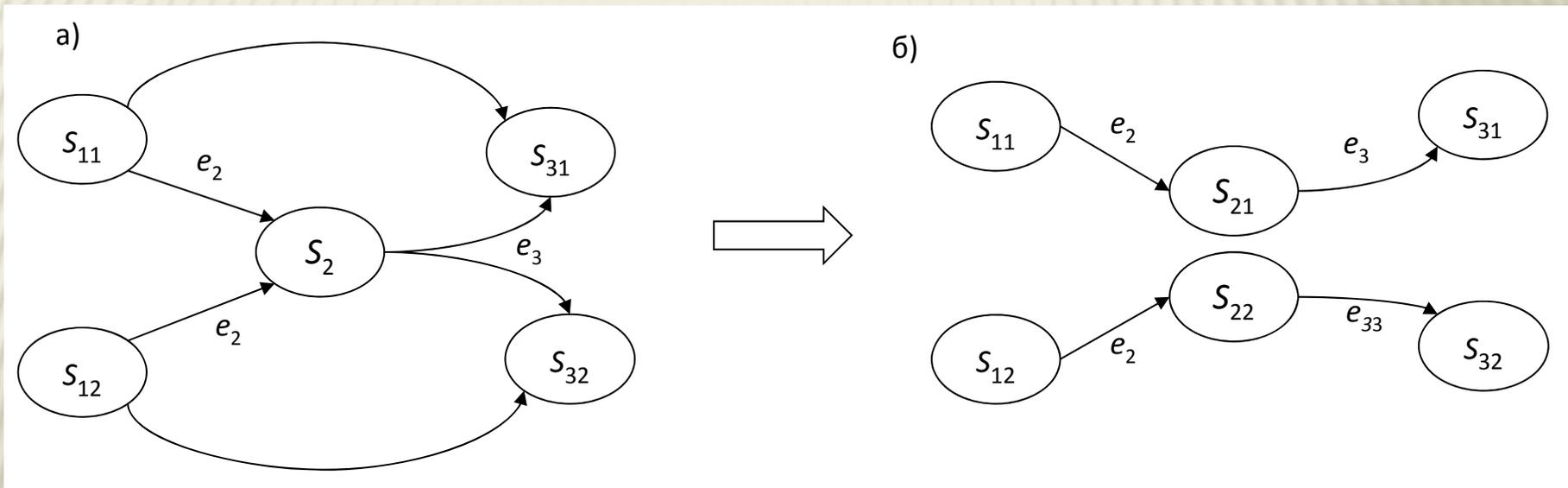
Правило:

$r: (\{s_{t-1}\}, \{e_t\}) \rightarrow s_t$

Требование вычислимости:

$s_i = \varphi(e_i, s_{i-1})$ .

# УПРАВЛЕНИЕ ПРЕЦЕДЕНТАМИ В ПРОСТРАНСТВЕ СОСТОЯНИЯ-СОБЫТИЯ

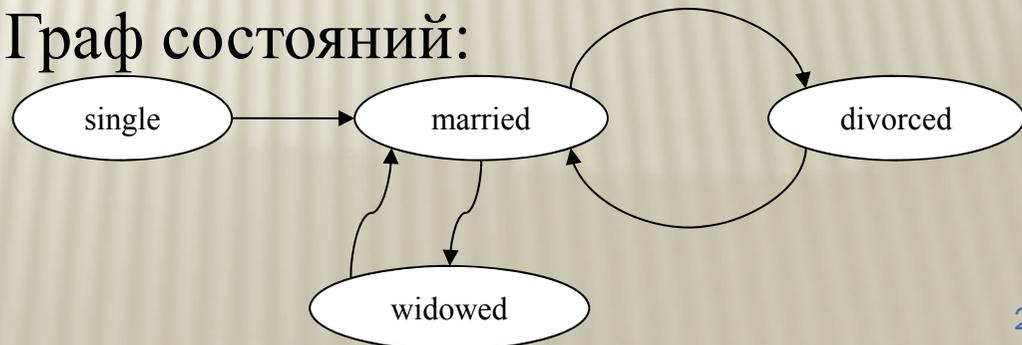


Декомпозиция состояний

а)  $s_i = \varphi(e_i, s_{i-1}, s_{i-2})$ .

б)  $s_i = \varphi(e_i, s_{i-1})$ .

Граф состояний:



# ИС В БАЗИСЕ ТРОИЧНОЙ ЛОГИКИ

$X$	$\bar{X}$
-1	1
0	0
1	-1

$X$	$Y$	$X \wedge Y$	$X \vee Y$
-1	-1	-1	-1
-1	0	-1	0
-1	1	-1	1
0	0	0	0
0	1	0	1
1	1	1	1

$\exists fact \rightarrow ternary(fact, 1);$

$[\exists \varphi, \varphi \rightarrow \overline{fact}] \rightarrow ternary(fact, -1);$

$\bar{\exists} fact, [\bar{\exists} \varphi, \varphi \rightarrow \overline{fact}] \rightarrow ternary(fact, 0).$

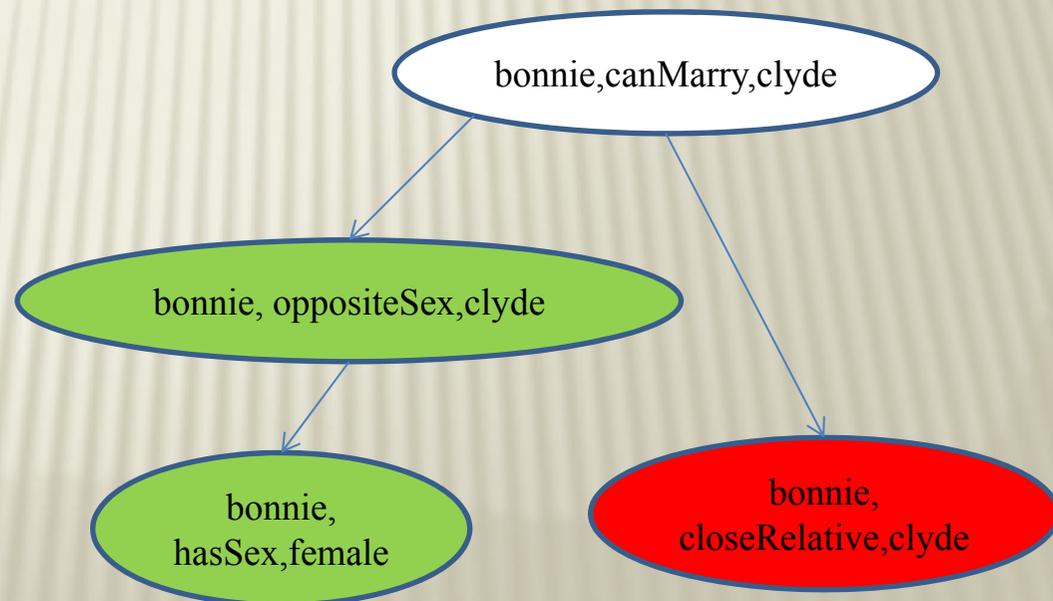
$ternary(X, canMarry, Y, Certainty,$

$[X, canMarry, Y, Cty, Cond1, ['NOT'|Cond2]]:-$

$ternary(X, oppositeSex, Y, Cty1, Cond1), Cty1 \geq 0,$

$ternary(X, closeRelative, Y, Cty2, Cond2), Cty2 \leq 0,$

$Certainty \text{ is } \min(Cty1, -Cty2).$



# ВЫВОДЫ

---

1. Антропоморфная модель интеллектуального агента для больших баз знаний является актуальной и технически реализуемой.
2. В продукционной модели знаний отсутствует компонент «навыки». При этом большую часть времени в поведении человека превалируют интеллектуальные навыки, а не логическое мышление.
3. Вывод на основе прецедентов является аналогом интеллектуальных навыков человека и позволяет снизить сложность поиска до полиномиальной.
4. Процесс создания и сопровождения базы прецедентов может управляться запросами, расписаниями или событиями. Последний способ является наиболее простым в реализации, но предъявляет повышенные требования к онтологической организации знаний, используемой всеми участниками создания и использования ресурсов, на которых размещаются базы знаний.
5. В допущении открытого мира база фактов должна строиться в пространстве «состояния – события». Текущее состояние любого объекта может быть вычислено путем обработки всех событий, произошедших после известного предыдущего состояния.

# ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ЗНАНИЙ

---

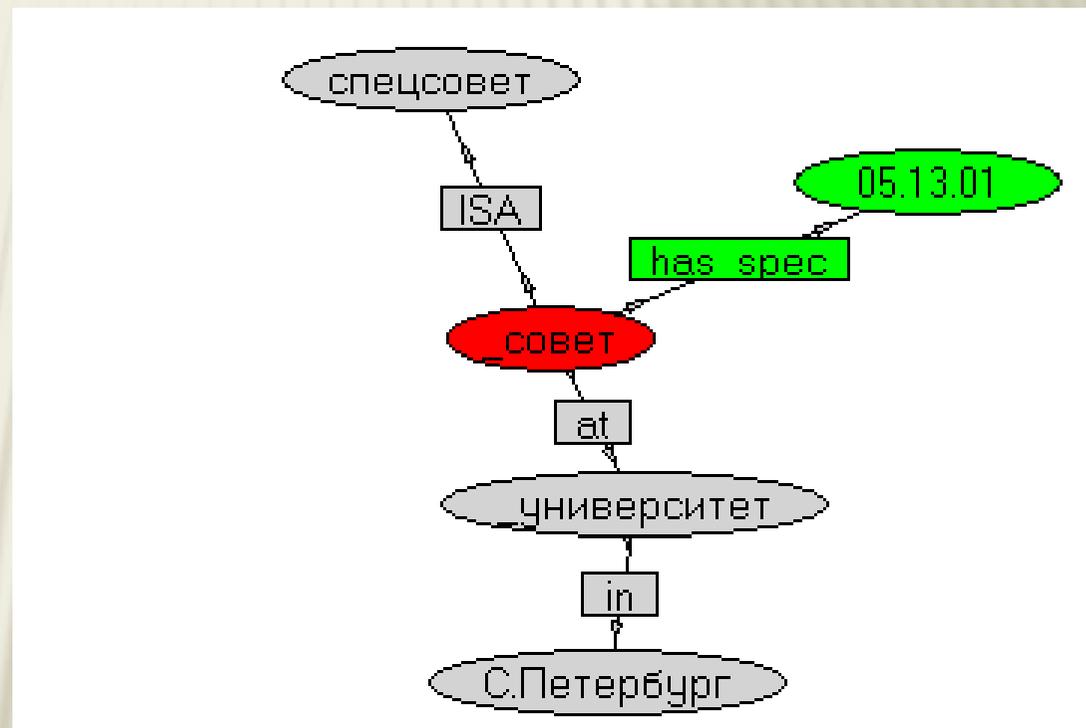
## Задачи:

- ❑ Графический язык запросов к базе знаний
- ❑ Отображение сложных предметных областей
- ❑ Объяснение результатов найденных решений

# ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ЗНАНИЙ

## Графический язык запросов vs. SPARQL

```
SELECT ?S ?University  
WHERE  
{?S ISA 'спецсовет' .  
?S has_spec '05.13.01' .  
?S at ?University .  
?University in 'С.Петербург'}
```





# ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ЗНАНИЙ

Semantic

File Edit Window Help

Semantic

Subject Predicate Object Machine says Rules: Found Tried

\* \* \* 212.227.03 at СПбНИУ ИТМО.

Say  
More  
Wide  
Wide All  
Deep  
Up  
Forget Fact  
Why  
All Facts

Redraw  
Exit

науки

технические науки

информатика ВТ управление

сист анализ упр обработка информации

05.00.00

05.13.00

05.13.01

212.227.03

at

СПбНИУ ИТМО

in

С.Петербург

01.04.05

07.00.00

05.07.00

05.13.20

05.13.19

05.13.18

05.13.17

05.13.16

05.13.15

05.13.14

05.13.13

05.13.12

05.13.11

05.13.10

05.13.09

05.13.08

05.13.07

05.13.06

05.13.05

05.13.04

05.13.03

05.13.02

05.13.01

05.13.00

05.12.00

05.11.00

05.10.00

05.09.00

05.08.00

05.07.00

05.06.00

05.05.00

05.04.00

05.03.00

05.02.00

05.01.00

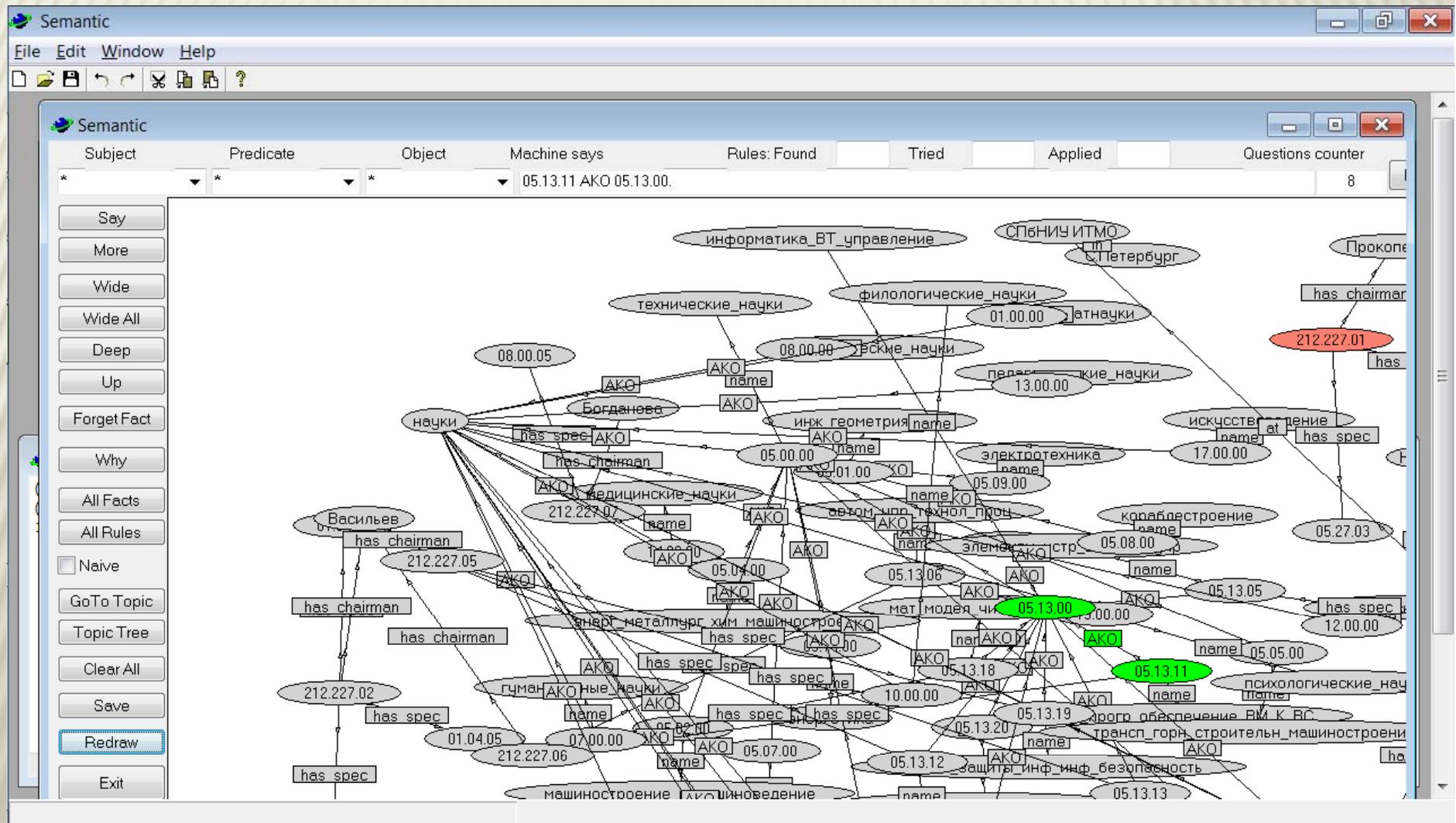
04.00.00

03.00.00

02.00.00

01.00.00

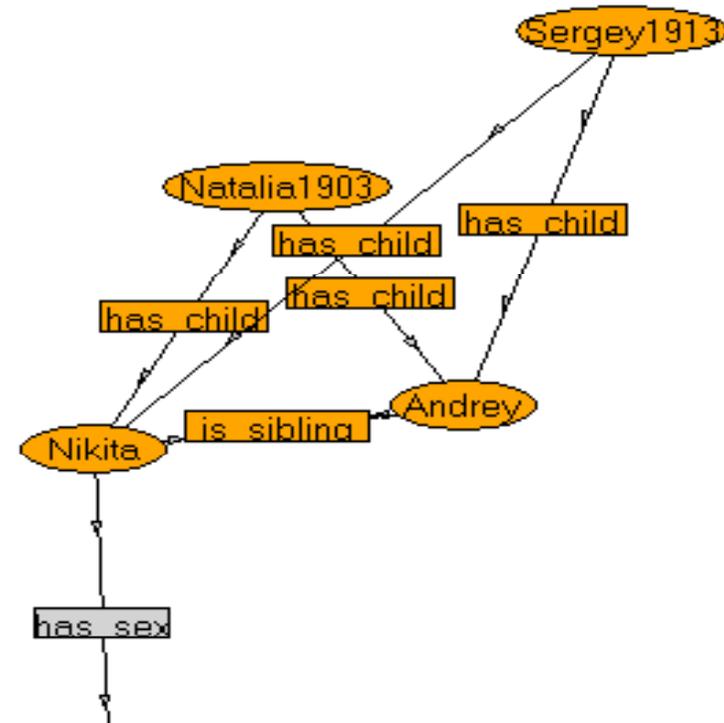
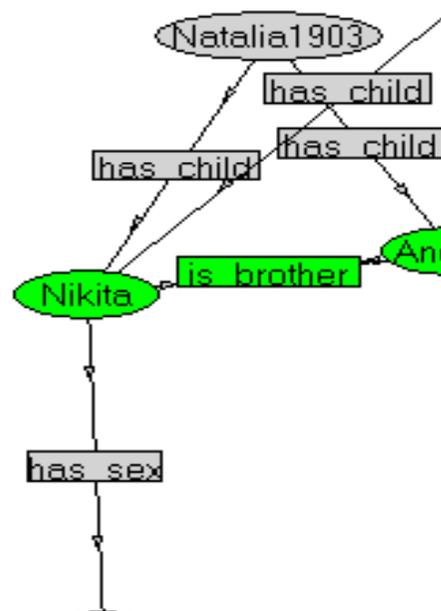
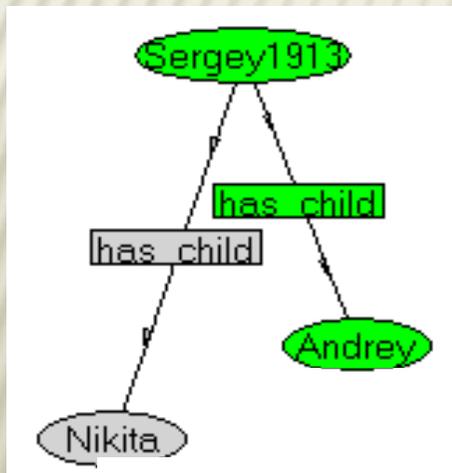
# ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ЗНАНИЙ



# ВИЗУАЛИЗАЦИЯ. ПРАВИЛА И ОБЪЯСНЕНИЯ (1)

IF ?x has\_child ?y AND ?x has\_child ?z AND ?y differs ?z  
 THEN ?y is\_sibling ?z

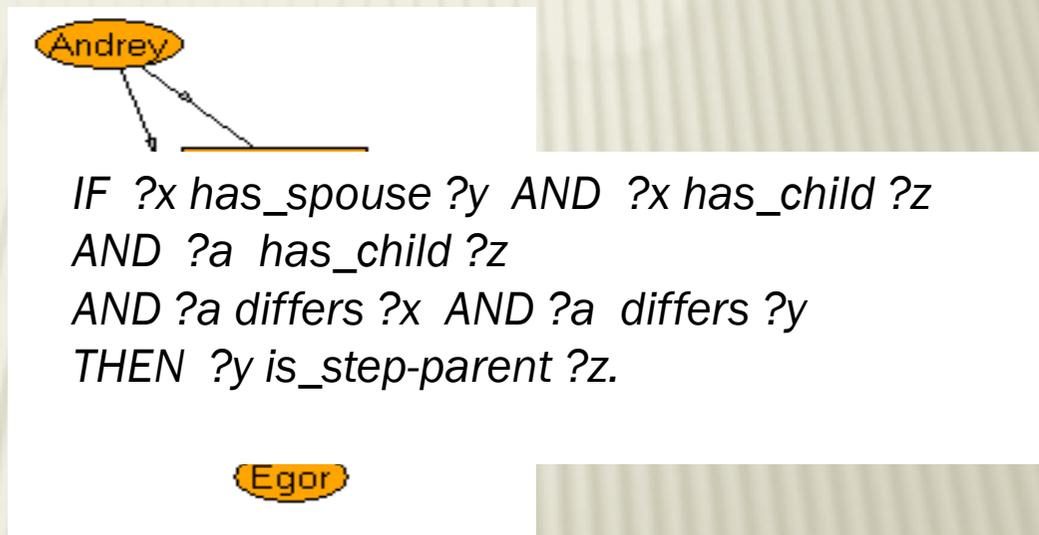
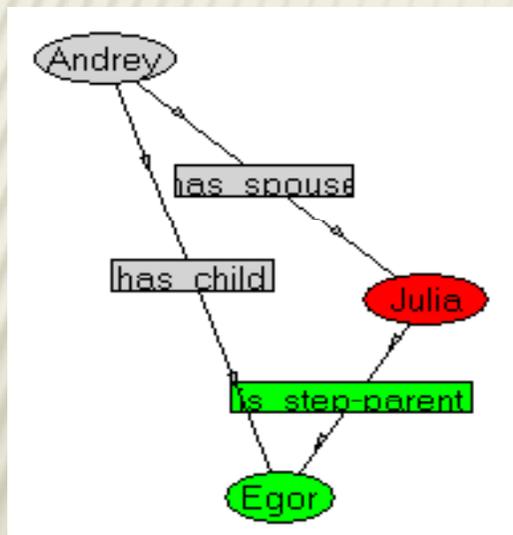
IF ?x is\_sibling ?y AND  
 THEN ?x is\_brother ?y



Nikita is\_sibling Andrey BECAUSE Sergey1913 has\_child Nikita  
 AND Segrey1913 has\_child Andrey AND Nikita differs Andrey

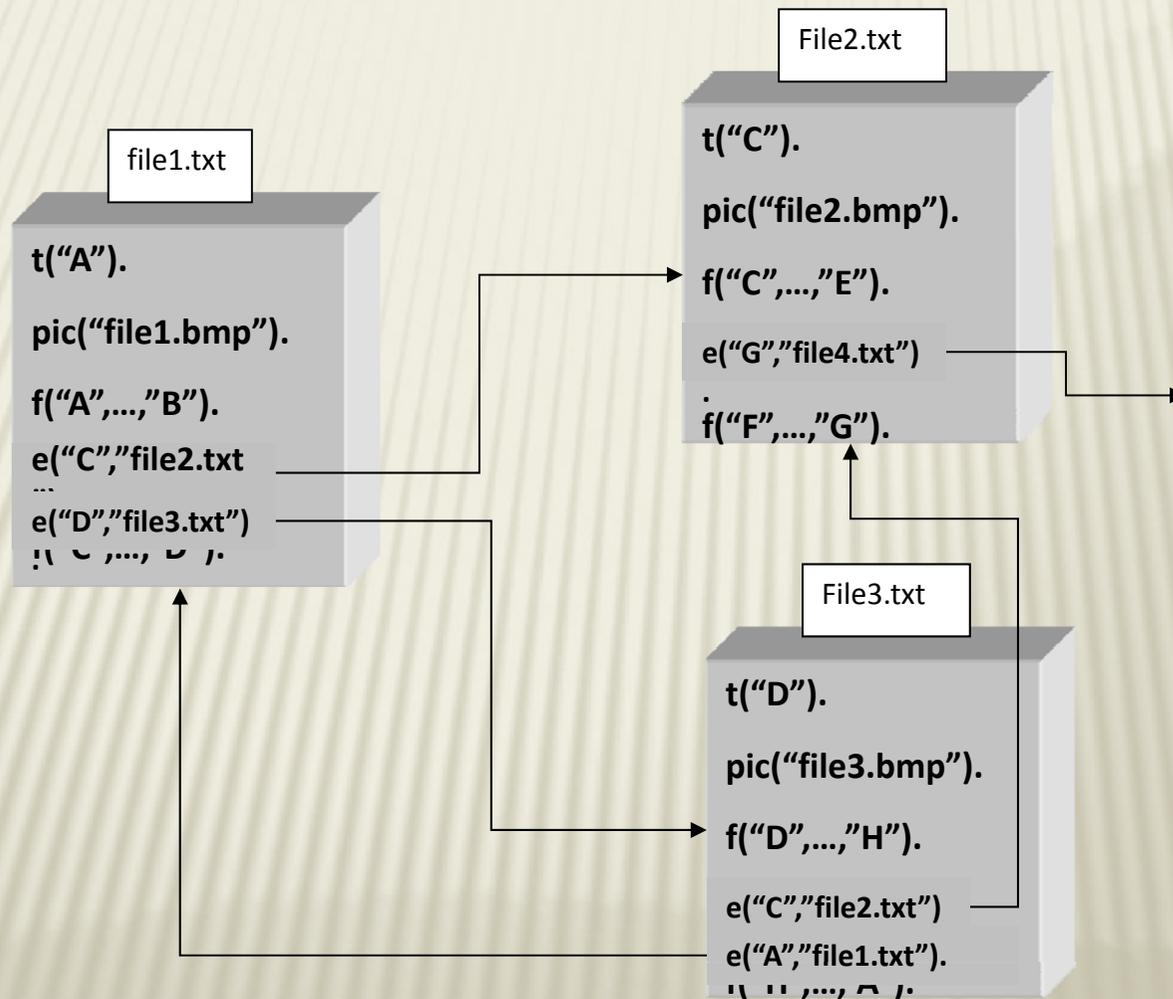
## ВИЗУАЛИЗАЦИЯ. ПРАВИЛА И ОБЪЯСНЕНИЯ (2)

IF ?x has\_spouse ?y AND ?x has\_child ?z AND NOT ?y has\_child ?z  
THEN ?y is\_step-parent ?z.



Julia is\_step-parent Egor BECAUSE  
Julia NOT has\_child Egor AND Andrey has\_spouse Julia  
AND Andrey has\_child Egor.

# ВИЗУАЛИЗАЦИЯ. УПРАВЛЕНИЕ КОНТЕКСТОМ



# ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ЗНАНИЙ. ВЫВОДЫ

1. В отличие от баз данных, в которых результаты обработки запросов представлены множествами однородных кортежей, доступ к базам знаний порождает разнообразные факты, связанные между собой. Вследствие этого визуализация знаний является важной составной частью интеллектуальных систем на основе баз знаний. **Семантический граф** является привлекательной формой отображения знаний.
2. Отображение семантического графа даже небольшой предметной области на двумерное пространство является проблематичным вследствие большого числа связей между объектами. **Для восприятия фактов человеком необходимы специальные методы**, позволяющие согласовать визуализацию знаний с возможностями человека.
3. **Контекстный подход**, как универсальный способ организации обмена информацией, позволяет решить проблему визуализации даже больших предметных областей. Управление контекстом в процессе визуализации знаний позволяет отображать на экране только информацию, необходимую для передачи семантики сообщения.

# НАУЧНАЯ НОВИЗНА (1)

---

1. К оценке количества информации в базах данных и знаний применен контекстный подход, позволивший вычислять информативность понятий и фактов методами теории информации, а также подвергать эту задачу декомпозиции на разных уровнях обобщения.
2. Разработан метод индексации и предварительного отбора фактов для применения в правилах логического вывода, позволяющий сокращать размерность поиска на дереве решений, в т.ч. для базы фактов, подверженной изменениям.
3. К логическому выводу применены теоретико-множественные операции, на основе которых задача поиска решений в продукционной модели знаний может быть перенесена в среду реляционных СУБД.
4. Разработаны методы быстрого логического вывода в среде программирования Prolog, основанные на реляционных операциях над отсортированными кортежами переменных, входящих в условия правил.

## НАУЧНАЯ НОВИЗНА (2)

---

6. Исследован многоагентный подход с методами роевого интеллекта к информационному поиску, продемонстрировавшими эффективность простейших алгоритмов поведения агентов для нахождения решений.
7. К анализу систем ИИ применен компетентностный антропоморфный подход с применением механизма интеллектуальных навыков, позволяющий устранить экспоненциальный рост сложности задачи логического вывода.
8. Разработана модель знаний в пространстве состояния – события, объединяющая первичные факты, заносимые в базу явным образом, и вторичные факты, выводимые из правил.
9. Разработана концептуальная модель интеллектуального агента в продукционных системах с применением моделирования на основе прецедентов, позволяющего устранить экспоненциальную сложность поиска решений в базах знаний.
10. Разработаны методы визуализации знаний для взаимодействия с интеллектуальным агентом и интерпретации результатов работы агента с использованием механизма управления контекстом.

---

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**