

# Знаковые модели обучения в задаче планирования поведения

Александр Панов

Научно-учебная лаборатория  
процессно-ориентированных информационных систем  
Высшая школа экономики

24 января – Лабораторная ФКН



## 1 Введение

- Когнитивное компьютерное моделирование
- Знаковая картина мира

## 2 Модель элементов картины мира

- Нейронный субстрат
- Образная компонента знака
- Каузальная сеть

## 3 Модели когнитивных функций

- Семиотическая сеть
- Операции в семиотической сети

## 4 Планирование поведения

- Схема алгоритма
- Примеры

## 5 Прикладные задачи

- Многоагентная постановка
- Задача интеллектуального перемещения

# Кратко о себе

**Панов Александр Игоревич, к. ф.-м. н.**

- Научный сотрудник лаборатории «Динамические интеллектуальные системы» Института системного анализа Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук.
- Научный сотрудник и доцент ФКН ВШЭ.
- Доцент кафедры информатики и вычислительной математики Московского физико-технического института.
- Член Российской ассоциации искусственного интеллекта (РААИ).
- Член Сообщества биологически инспирированных когнитивных архитектур (BICA Society).
- Организатор Международной школы по биологически инспирированным когнитивным архитектурам (Fierce on BICA, Москва) и Международной конференции по биологически инспирированным когнитивным архитектурам (BICA-2016 — Нью-Йорк, BICA-2017 — Москва).
- Член редколлегии журнала Biologically Inspired Cognitive Architectures.
- Руководитель проектов РФФИ мол\_а, мол\_а\_дк, офи\_м.
- Ментор студенческой лаборатории по искусственному интеллекту (SLabAI).



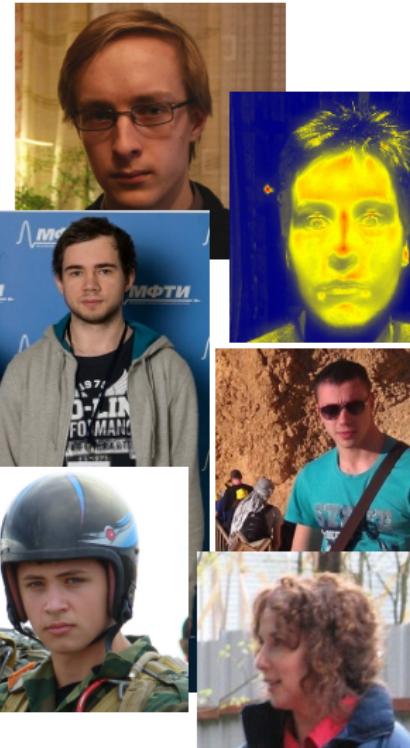
# Научные интересы

- *Когнитивное компьютерное моделирование*: планирование поведения, модели внимания, восприятия, принятия решений и обучения, знаковые системы.
- *Многоагентные системы*: образование коалиций, распределение ролей в коллективе, целеполагание.
- *Анализ данных*: выявление причинно-следственных связей, анализ психологических и медицинских данных.
- *Распознавание изображение*: выявление объектов на сложных сценах, рекуррентные и глубокие нейронные сети.
- *Системы управления*: управление поведением, многоуровневые архитектуры, робототехника.

# Группа когнитивного компьютерного моделирования



- Осипов Геннадий Семенович, д.ф.-м.н.
- Чудова Наталья Владимировна, к.псих.н.
- Кузнецова Юлия Михайловна, к.псих.н.
- Панов Александр, к.ф.-м.н.
- Киселев Глеб, асп. ИСА РАН
- Скрыник Алексей, студ. РГАТУ
- Петров Александр, вед. инж. РГАТУ
- Мирошниченко Андрей, студ. БГУ
- Филин Дмитрий, студ. ВШЭ
- Кудинов Антон, студ. ВШЭ
- Алина Жукова, студ. ВШЭ



# Картина мира субъекта деятельности

Картина мира субъекта деятельности - это представления субъекта о внешней среде, о своих собственных характеристиках, целях, мотивах, о других субъектах и операции (произвольные и непроизвольные), осуществляемые на основе этих представлений.

# Картина мира субъекта деятельности

Картина мира субъекта деятельности - это представления субъекта о внешней среде, о своих собственных характеристиках, целях, мотивах, о других субъектах и операции (произвольные и непроизвольные), осуществляемые на основе этих представлений.

Элементом картины мира является знак:

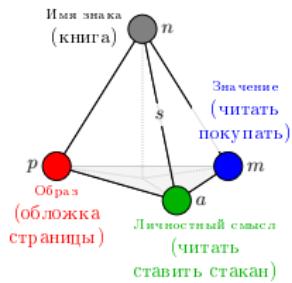
- в смысле культурно-исторического подхода Выготского-Лурии,
- выполняющий функции в соответствии с теорией деятельности Леонтьева.

# Картина мира субъекта деятельности

Картина мира субъекта деятельности - это представления субъекта о внешней среде, о своих собственных характеристиках, целях, мотивах, о других субъектах и операции (произвольные и непроизвольные), осуществляемые на основе этих представлений.

Элементом картины мира является знак:

- в смысле культурно-исторического подхода Выготского-Лурии,
- выполняющий функции в соответствии с теорией деятельности Леонтьева.

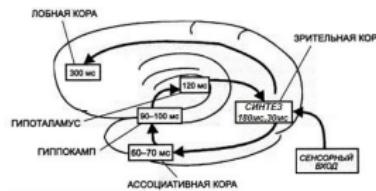
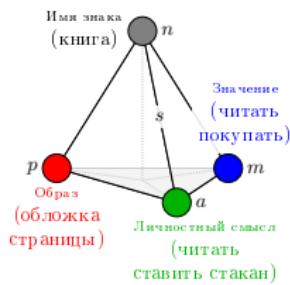


# Картина мира субъекта деятельности

Картина мира субъекта деятельности - это представления субъекта о внешней среде, о своих собственных характеристиках, целях, мотивах, о других субъектах и операции (произвольные и непроизвольные), осуществляемые на основе этих представлений.

Элементом картины мира является знак:

- в смысле культурно-исторического подхода Выготского-Лурии,
- выполняющий функции в соответствии с теорией деятельности Леонтьева.

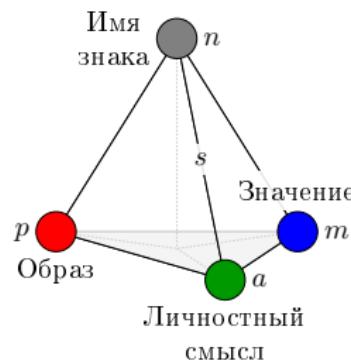


В пользу существования такой структуры свидетельствуют:

- нейрофизиологические данные (Эдельман, Иваницкий, Маунткастл и др.),
- другие психологические теории (например, трехкомпонентная модель Становиц).

Оsipov, Г. С., А. И. Panov и Н. В. Чудова. «Управление поведением как функция сознания. II. Синтез плана поведения». *Известия Российской академии наук. Теория и системы управления*. 2015.  
 — . «Управление поведением как функция сознания. I. Картина мира и целеполагание». *Известия Российской академии наук. Теория и системы управления*. 2014.

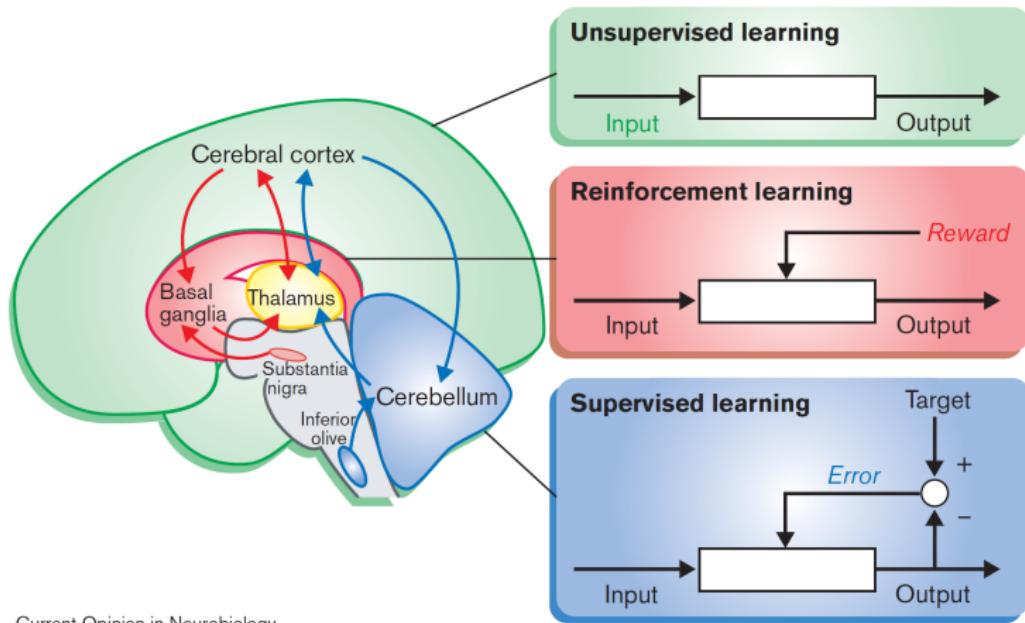
# Три образующих элемента картины мира



Представляемая сущность описывается тремя причинно-следственными (каузальными) структурами:

- **структура образа** - представление взаимосвязи внешних сигналов и внутренних характеристик субъекта (агента) - сенсо-моторное представление,
- **структура значения** - обобщенное знание о соотношениях во внешнем мире, согласованное в некоторой группе субъектов (агентов),
- **структура личностного смысла** - ситуационная потребностно-мотивационная интерпретация знаний о соотношениях во внешней среде (значение для себя).

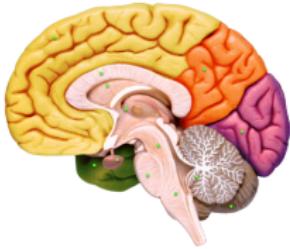
# Модели обучения в мозге



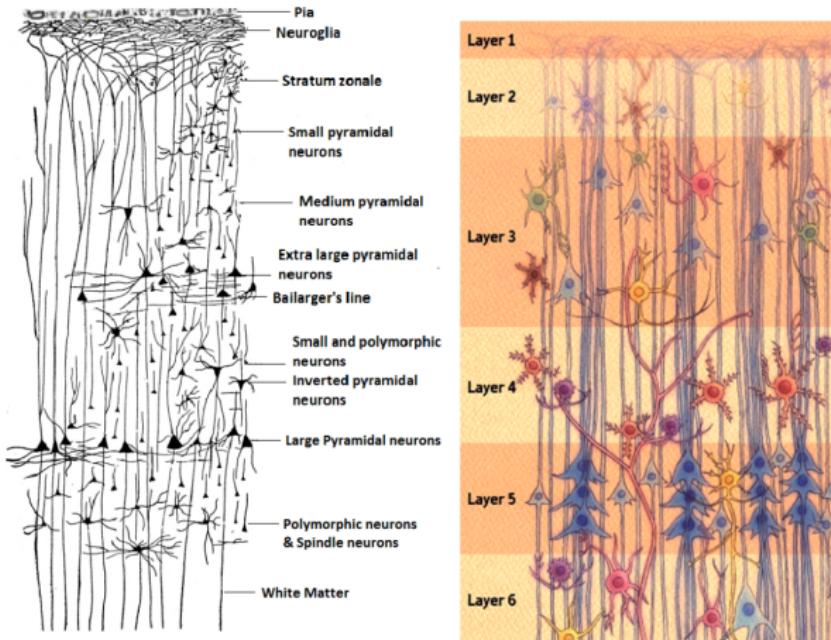
Current Opinion in Neurobiology

Doya, Kenji. "Complementary roles of basal ganglia and cerebellum in learning and motor control". *Current Opinion in Neurobiology*. Dec. 2000.

# Нейронный субстрат



## Histological Structure of the Cerebral Cortex

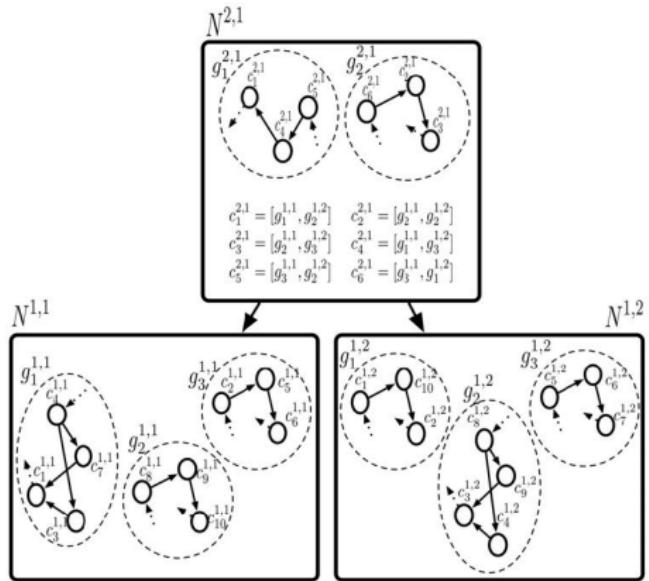


Rockland, Kathleen S. «Five points on columns». *Frontiers in neuroanatomy*. 2010.

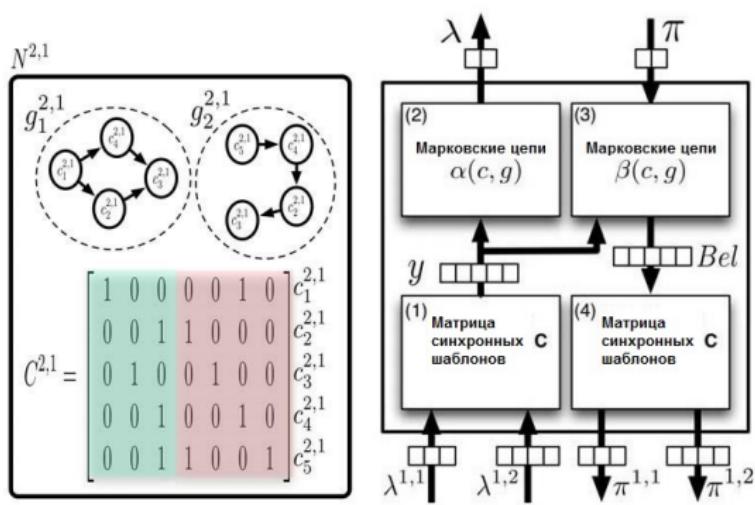
Mountcastle, V. B. *Perceptual Neuroscience. The Cerebral Cortex*. 1998.

## Гетерархическая модель

Разработана расширенная реализация иерархической временной памяти (hierarchical temporal memory - HTM) - гетерархическая каузальная сеть (heterarchical causal network - HCN).



# Гетерархическая модель



Skrynnik, A., A. Petrov, and A. I. Panov. "Hierarchical Temporal Memory Implementation with Explicit States Extraction".

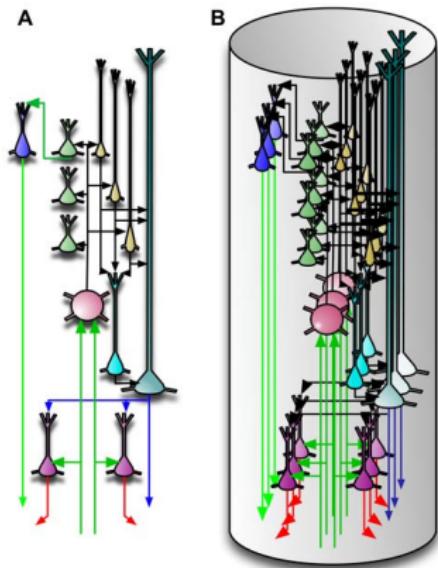
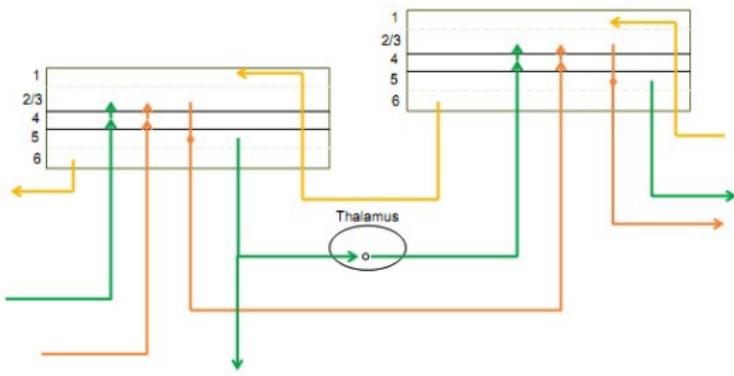
*Biologically Inspired Cognitive Architectures (BICA) for Young Scientists.* 2016.

Панов, А. И. «Алгебраические свойства операторов распознавания в моделях зрительного восприятия».

*Машинное обучение и анализ данных.* 2014.

Velichkovsky, B. M. "Heterarchy of cognition: The depths and the highs of a framework for memory research". *Memory.* 2002.

# Нейронная организация



Billaudelle, Sebastian and Subutai Ahmad. "Porting HTM Models to the Heidelberg Neuromorphic Computing Platform".  
2015.

George, Dileep and Jeff Hawkins. "Towards a mathematical theory of cortical micro-circuits". *PLoS computational biology*.  
2009.

# Модель процесса обучения

К основным принципам работы механизма обучения относятся:

- использование иерархии вычислительных узлов с восходящими и нисходящими связями,
- использование Хэббовских правил обучения,
- разделение пространственного и временного группировщиков,
- подавление второстепенной активации для формирования разреженного представления.

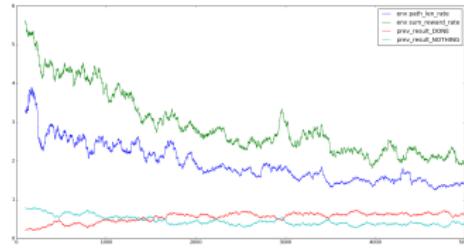
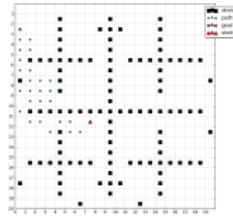
В результате работы механизма обучения по прецедентам (без учителя) формируются так называемые **каузальные матрицы**.

Панов, А. И. и А. В. Петров. «Иерархическая времененная память как модель восприятия и её автоматное представление». *Шестая Международная конференция «Системный анализ и информационные технологии» САИТ-2015 (15-20 июня 2015 г., г. Светлогорск, Россия): Труды конференции. В 2-х т. 2015.*

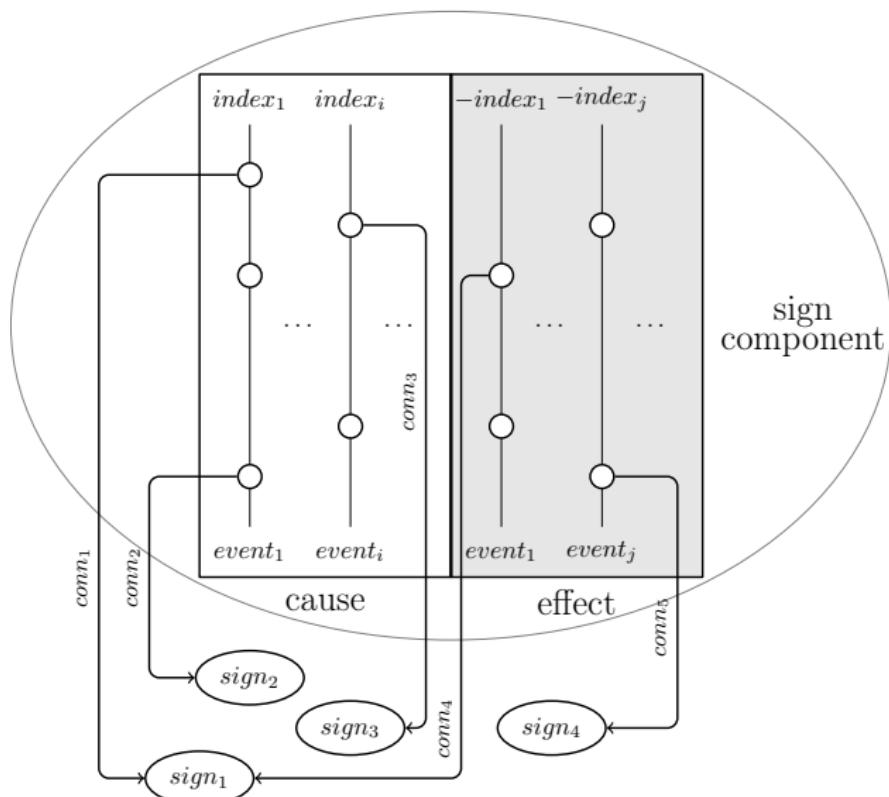
# Пробные эксперименты



- Начальное и конечное положения агента фиксированы. Между агентом и конечным положением расположена преграда.
- За каждое действие агент получает награду, если он идет кратчайшим путем к конечному положению, то он получит большую награду.
- HCN на простой карте:  $\sim 700$  итераций (1 клетка в колонке), 1800 итераций (с двумя клетками).
- Нейронная сеть (2 сверточных слоя и 5 полносвязных) на большой карте: только демонстрирует сходимость процесса обучения.



# Каузальная матрица



# Алгоритм $\mathfrak{A}_{th}$ актуализации знака

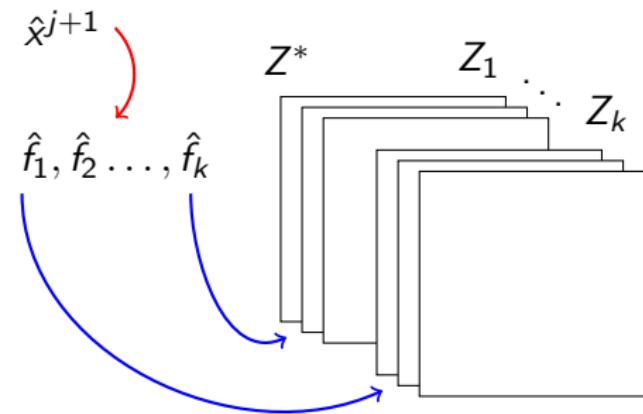
$\hat{f}_1, \hat{f}_2 \dots, \hat{f}_k$

# Алгоритм $\mathfrak{A}_{th}$ актуализации знака

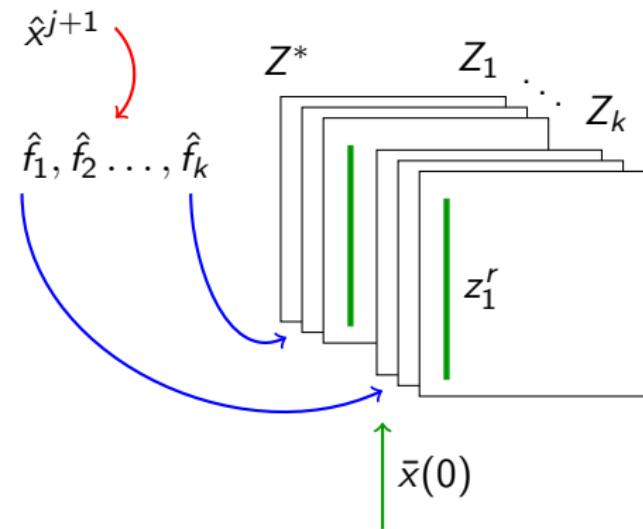
$$\hat{x}^{j+1}$$

$$\hat{f}_1, \hat{f}_2 \dots, \hat{f}_k$$

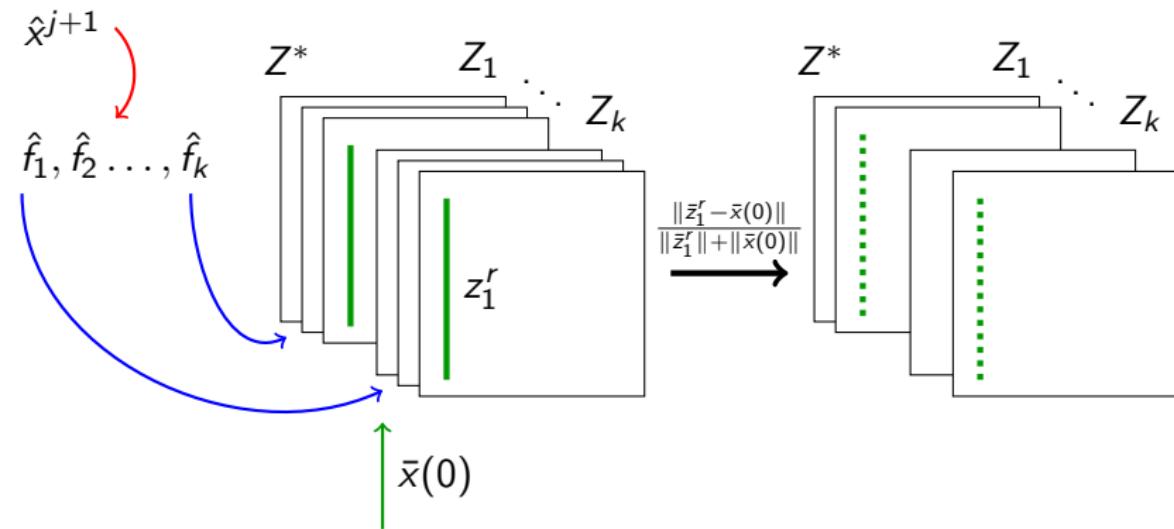
# Алгоритм $\mathfrak{A}_{th}$ актуализации знака



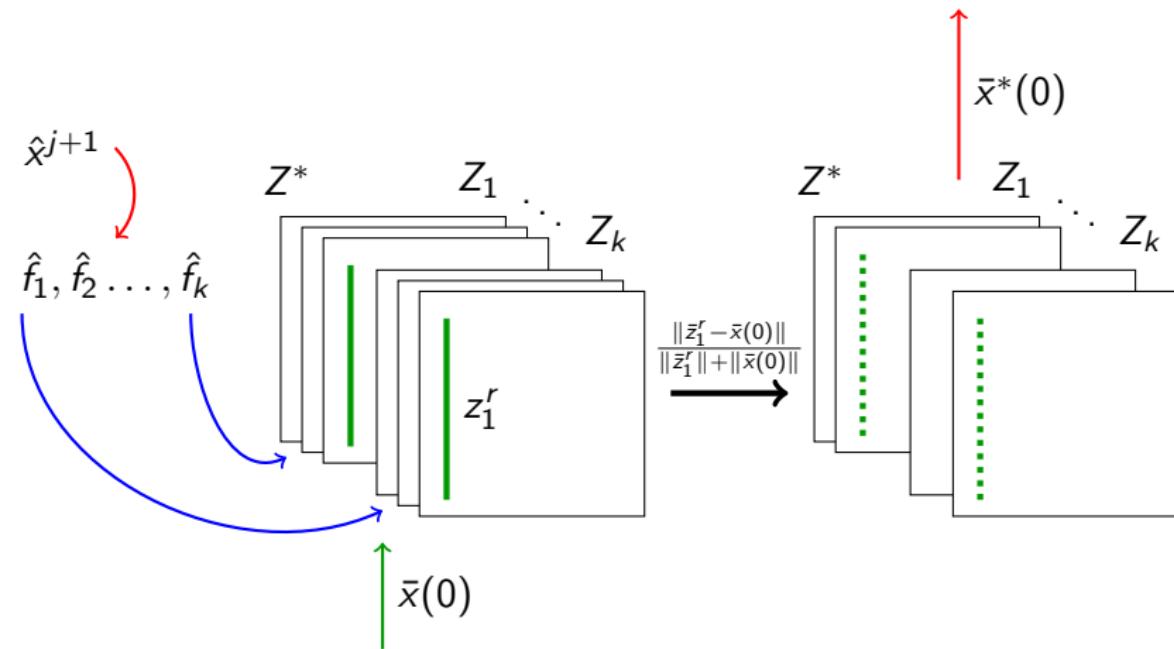
# Алгоритм $\mathfrak{A}_{th}$ актуализации знака



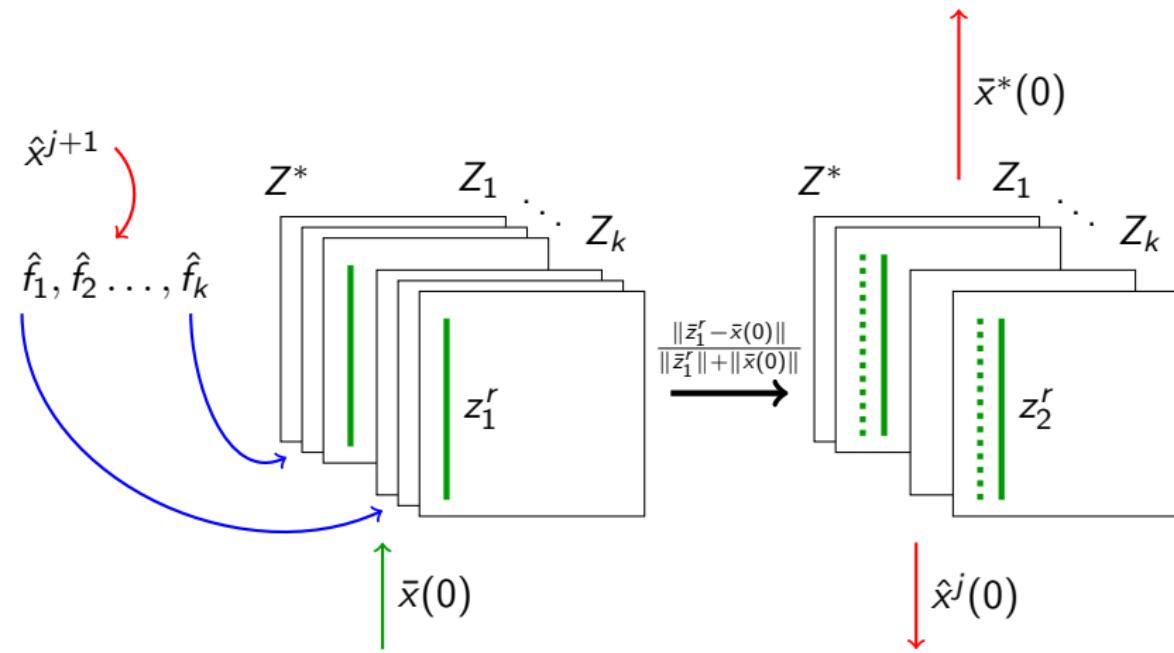
# Алгоритм $\mathfrak{A}_{th}$ актуализация знака



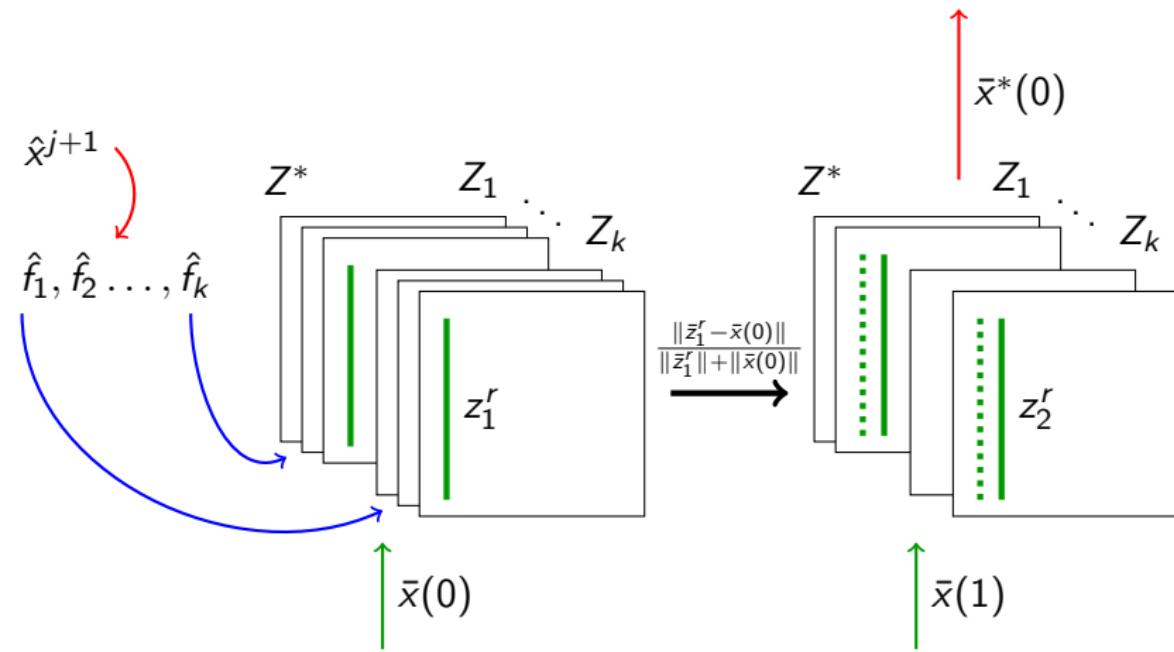
# Алгоритм $\mathfrak{A}_{th}$ актуализация знака



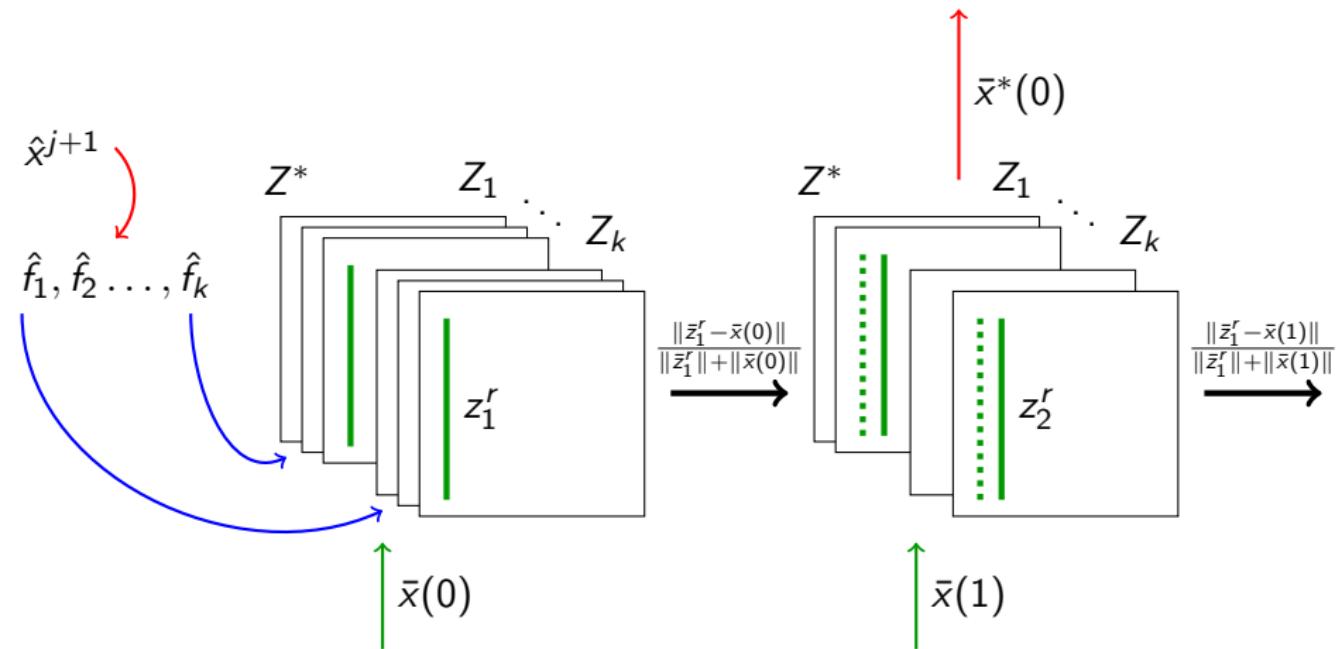
# Алгоритм $\mathfrak{A}_{th}$ актуализации знака



# Алгоритм $\mathfrak{A}_{th}$ актуализации знака



# Алгоритм $\mathfrak{A}_{th}$ актуализации знака

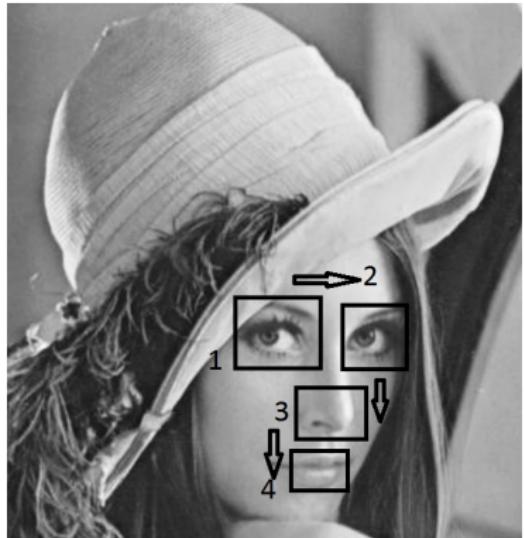
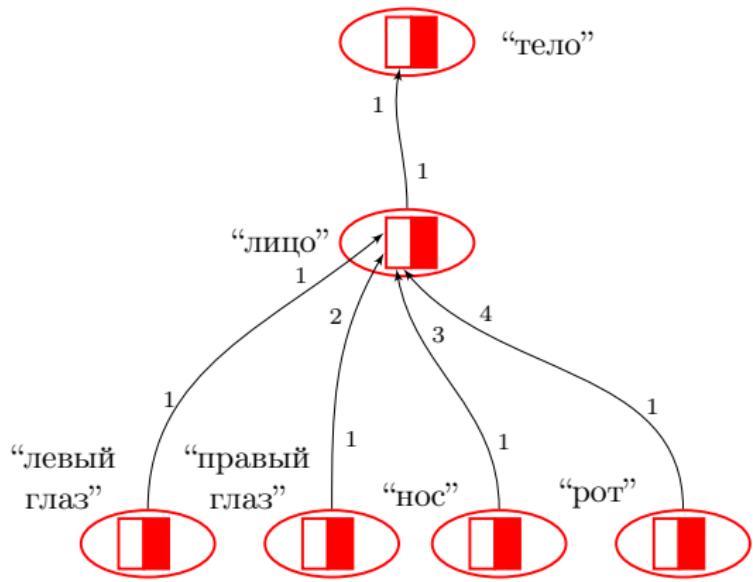


## Каузальная сеть на образах

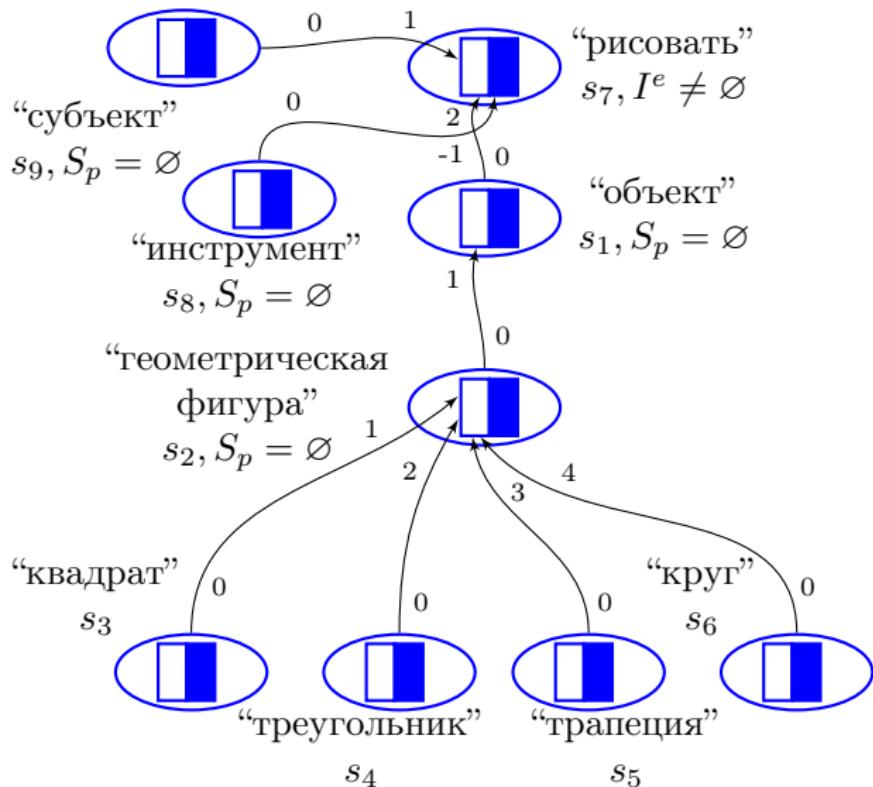
**Каузальная сеть** на множестве образов знаков  $W_p = \langle V_p, E_p \rangle$  - помеченный ориентированный граф, в котором

- каждому узлу  $v \in V_p$  ставится в соответствие кортеж каузальных матриц  $Z^p(s)$  образа некоторого знака  $s$  ( $v \rightarrow Z^p(s)$ );
- ребро  $e = (v_1, v_2)$  принадлежит множеству ребер графа  $E$ , если  $v_1 \rightarrow Z^p(s_1)$ ,  $v_2 \rightarrow Z^p(s_2)$  и  $s_1 \in S_p(s_2)$ ;
- каждому ребру графа  $e = (v_1, v_2)$ ,  $v_1 \rightarrow Z^p(s_1)$ ,  $v_2 \rightarrow Z^p(s_2)$  ставится в соответствие метка  $\epsilon = (\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3)$  - кортеж трех натуральных чисел:
  - $\epsilon_1$  - индекс исходной матрицы в кортеже  $Z^p(s_1)$ , может принимать специальное значение 0, если исходными могут служить любые матрицы из кортежа;
  - $\epsilon_2$  - индекс целевой матрицы в кортеже  $Z^p(s_2)$ , строка которой ставится в соответствие признаку  $s_1$ ;
  - $\epsilon_3$  - индекс столбца в целевой матрице, в которой в соответствующей признаку  $s_1$  строке стоит 1, может принимать положительные значения (*столбцы условий*) и отрицательные (*столбцы эффектов*).

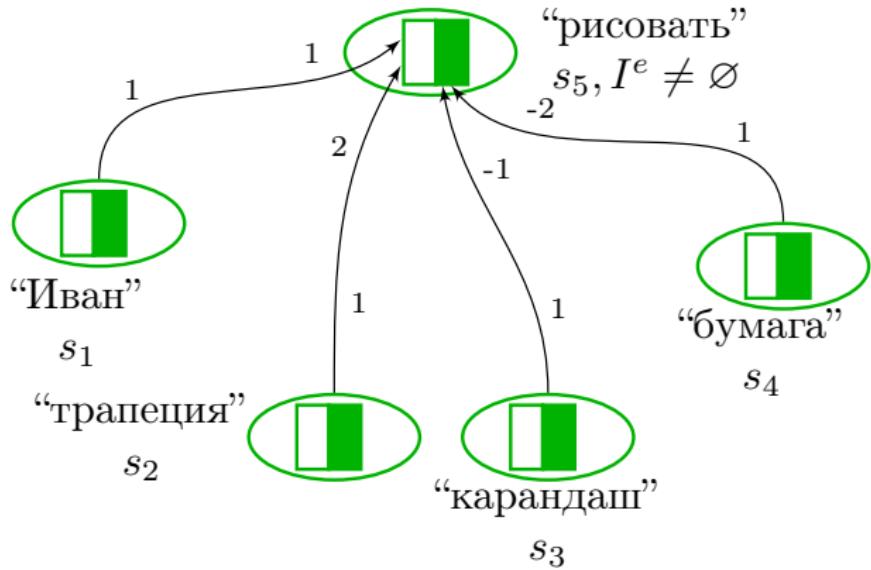
# Каузальная сеть на образах: пример



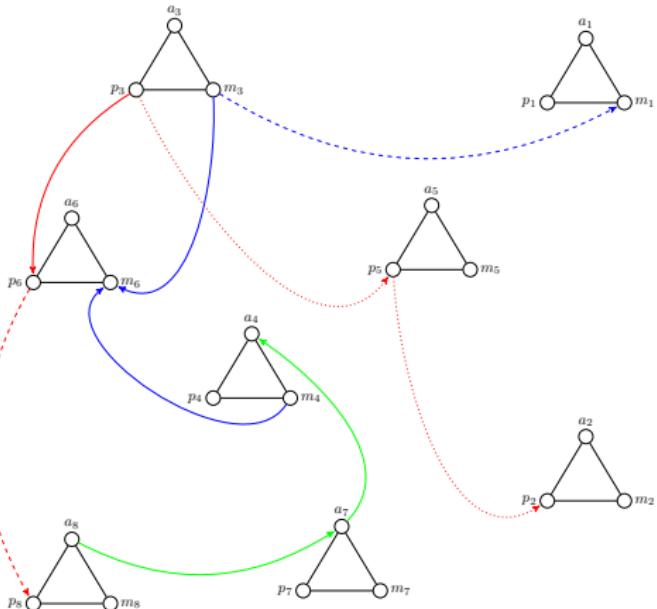
# Каузальная сеть на значениях: пример



# Каузальная сеть на личностных смыслах: пример



# Картина мира субъекта деятельности

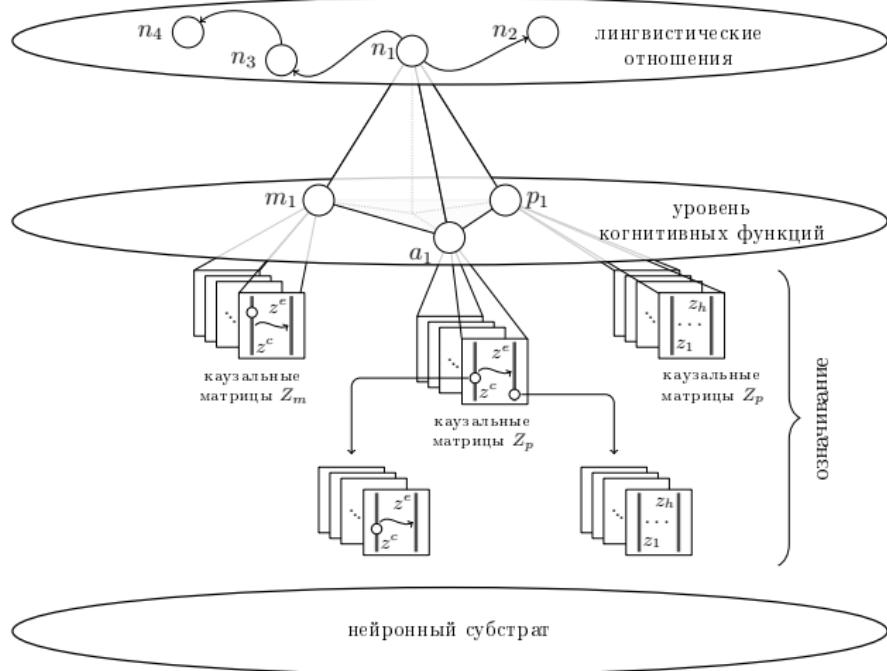


**Семиотическая сеть - пятерка**  
 $\Omega = \langle W_p, W_m, W_a, R_n, \Theta \rangle$ , где

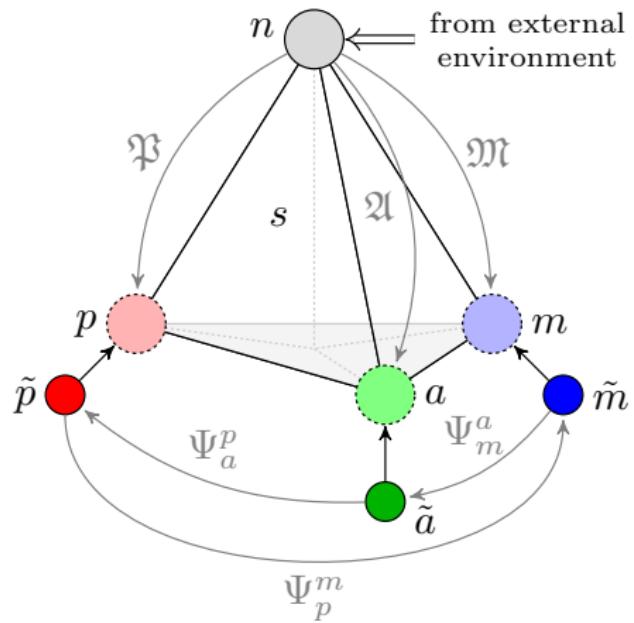
- $W_p, W_m, W_a$  - соответственно каузальные сети на множестве образов, значений и личностных смыслах,
- $R_n$  - семейство отношений на множестве знаков, сгенерированных на основе трех каузальных сетей, т.е.  
 $R_n = \{R_p, R_m, R_a\}$ ,
- $\Theta$  - семейство операций на множестве знаков.

Osipov, Gennady S. "Signs-Based vs. Symbolic Models". *Advances in Artificial Intelligence and Soft Computing*. 2015.

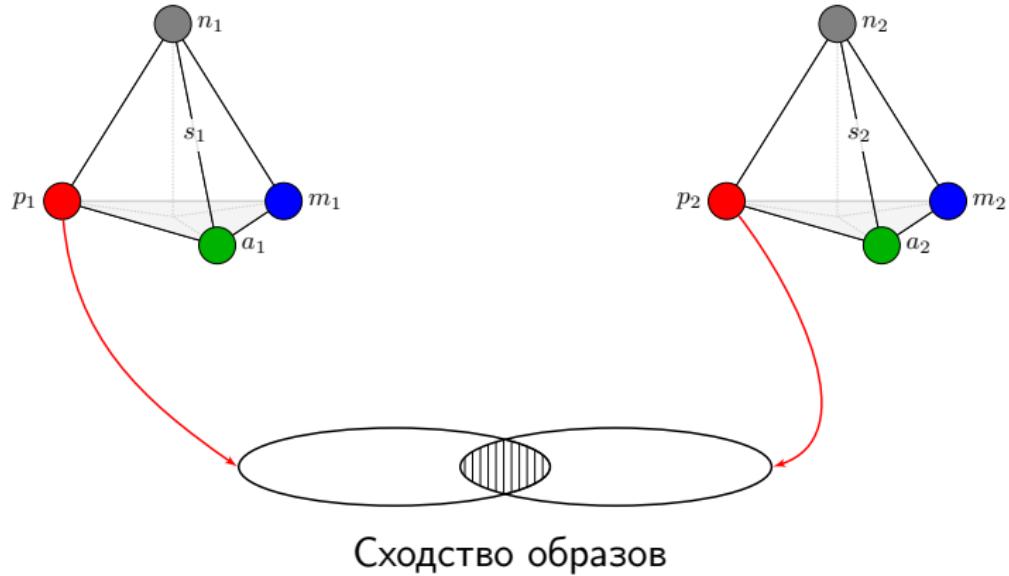
# Уровни представления



# Образование нового знака

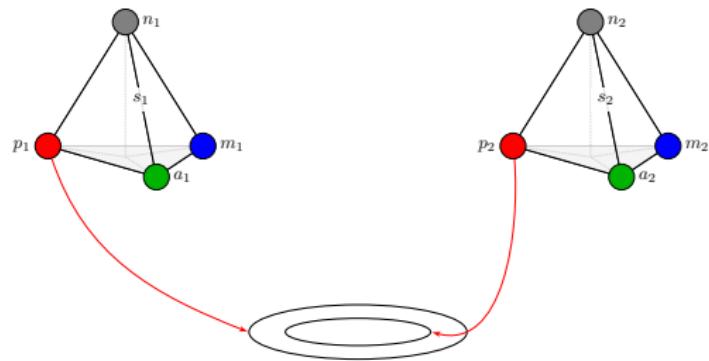


# Отношения на множестве компонент знака

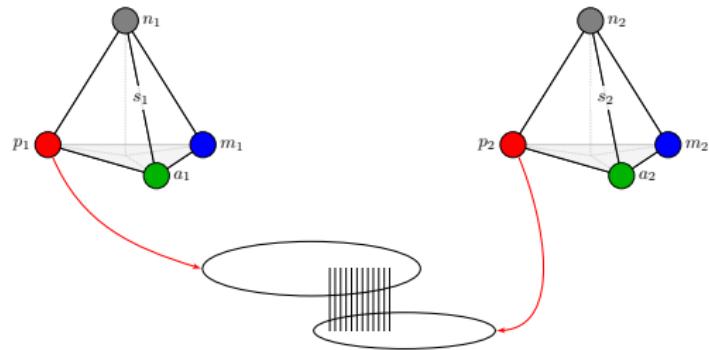


# Отношения на множестве компонент знака

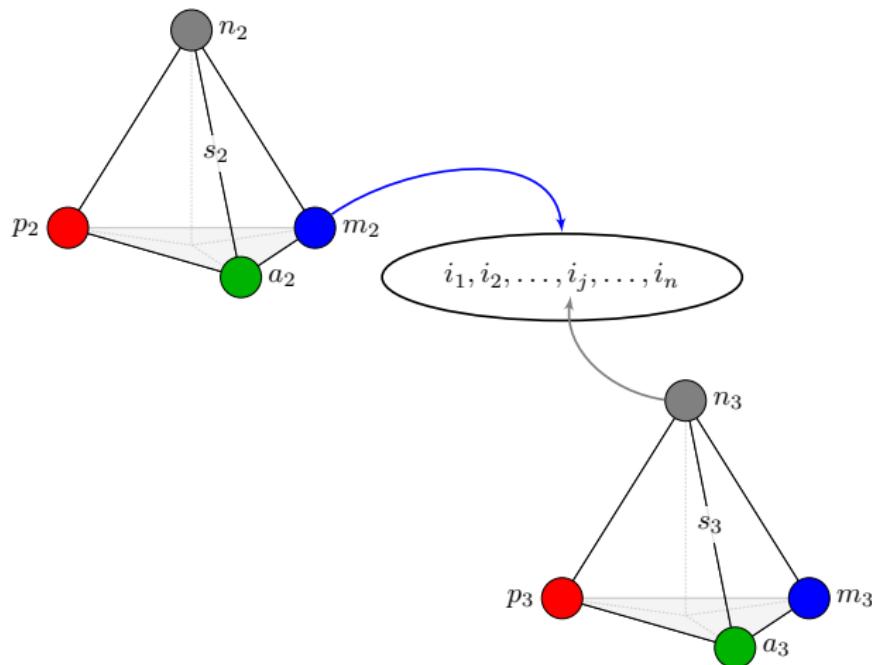
Включение образов



Противопоставление  
образов



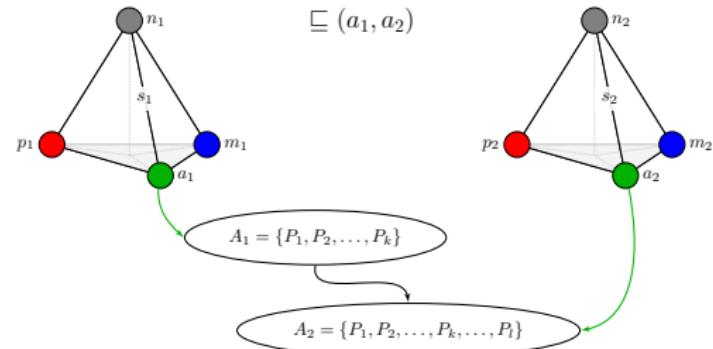
# Отношения на множестве компонент знака



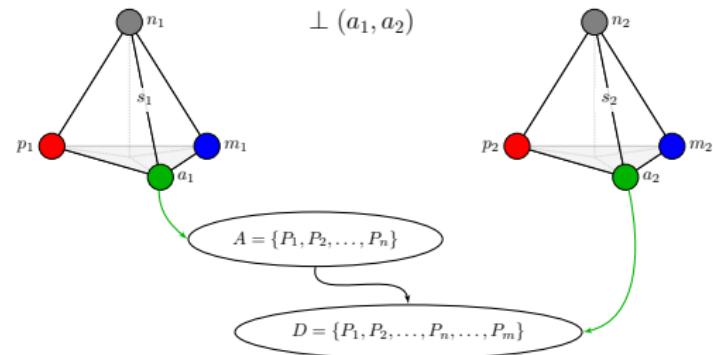
Сценарий на значениях

# Отношения на множестве компонент знака

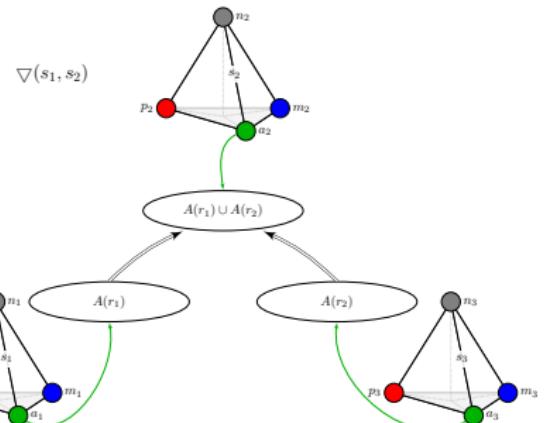
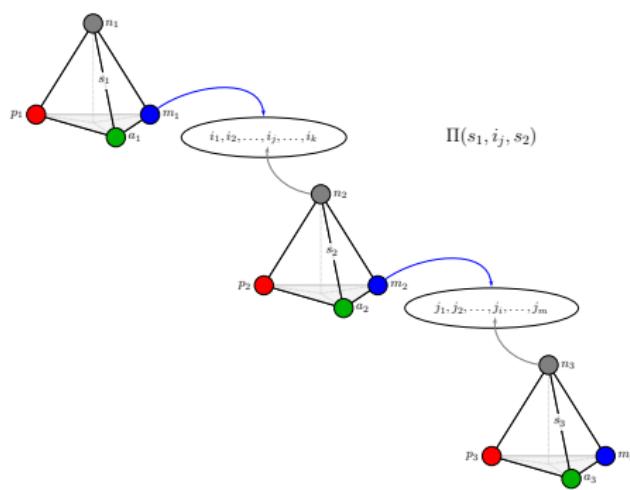
**Поглощение  
личностных смыслов**



**Противопоставление  
личностных смыслов**



# Операции на множестве компонент знака

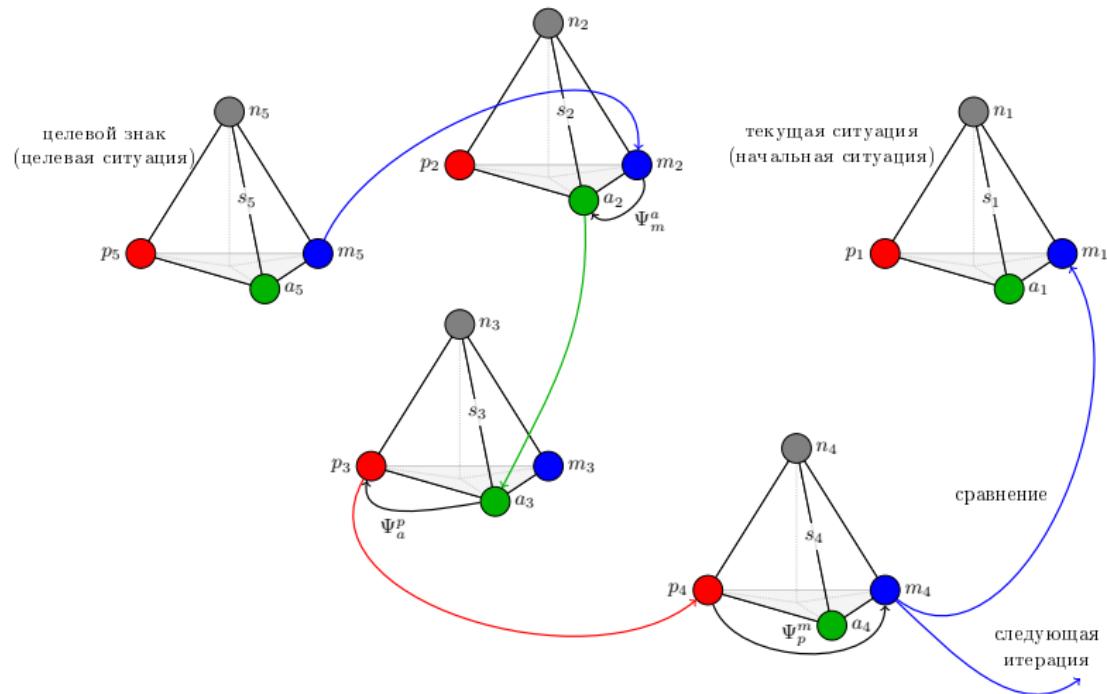


## Замыкание по значениям

## Агглютинация личностных смыслов

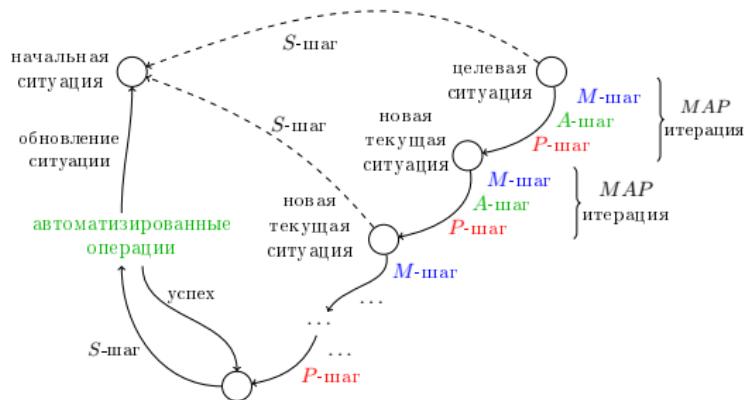
Osipov, G. S. "Sign-based representation and word model of actor". *2016 IEEE 8th International Conference on Intelligent Systems (IS)*. 2016.

# Модель функции планирование поведения



Osipov, Gennady S. "Signs-Based vs. Symbolic Models". *Advances in Artificial Intelligence and Soft Computing*. 2015.

# Алгоритм планирования поведения



Иерархический процесс планирования начинается с конченой ситуации и стремится достичь начальной ситуации.

MAP-итерация:

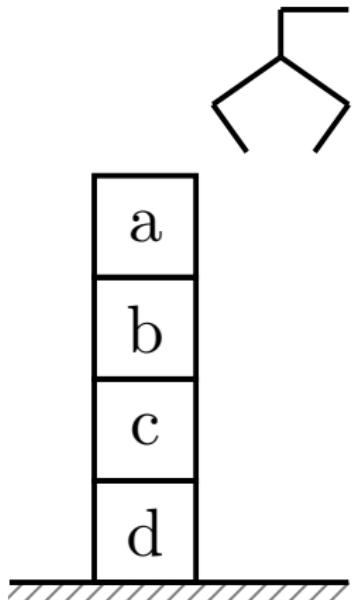
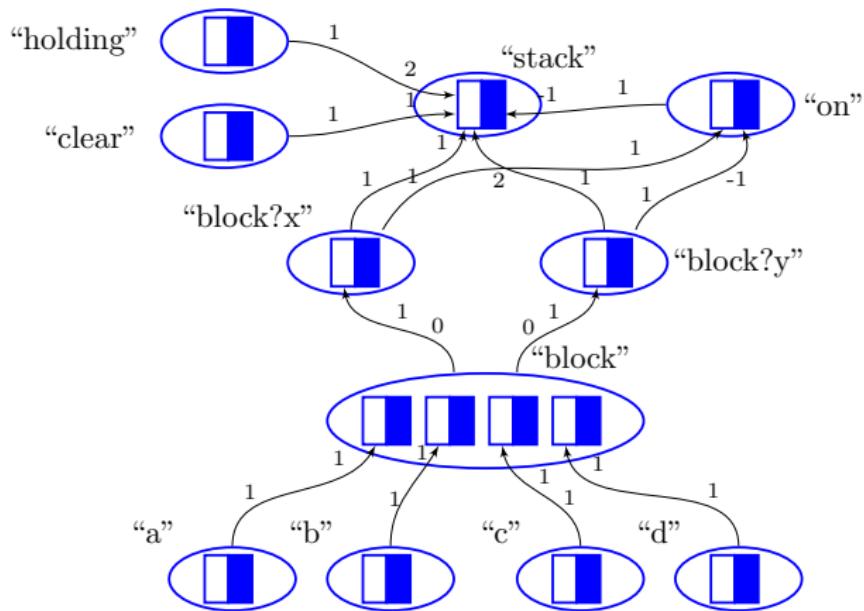
- **S-step** – поиск прецедентов выполнения действия в текущих условиях,
- **M-step** – поиск применимых действий на сети значений,
- **A-step** – генерация личностных смыслов, соответствующих найденным значениям,
- **P-step** – построение новой текущей ситуации по множеству признаков условий найденных действий.

Panov, A. I. and K. S. Yakovlev. "Behavior and path planning for the coalition of cognitive robots in smart relocation tasks". *Robot Intelligence Technology and Applications 4*. 2016.

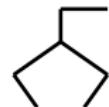
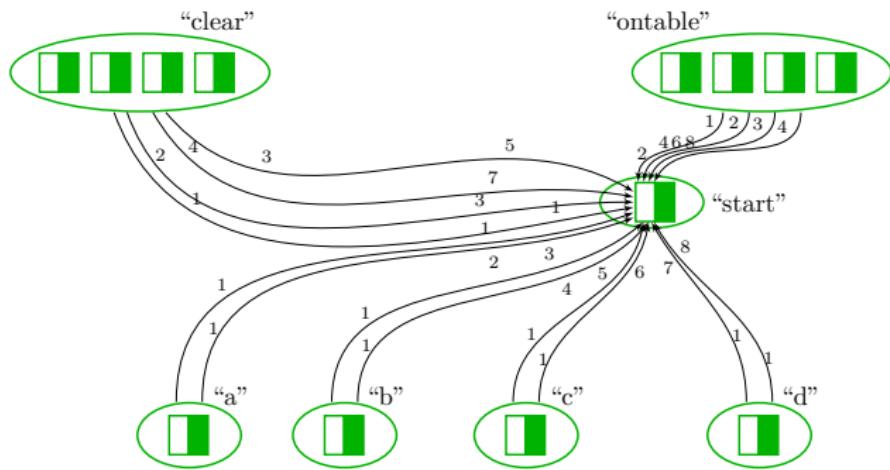
Panov, Aleksandr I. and Konstantin S. Yakovlev. "Psychologically inspired planning method for smart relocation task". *Procedia Computer Science*. 2016.

Panov, Aleksandr I. "Behavior Planning of Intelligent Agent with Sign World Model". *Biologically Inspired Cognitive Architectures*. 2017.

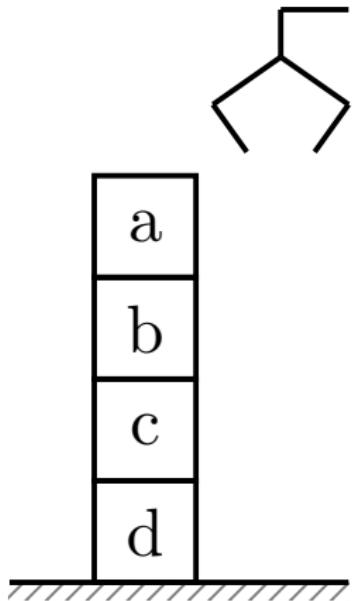
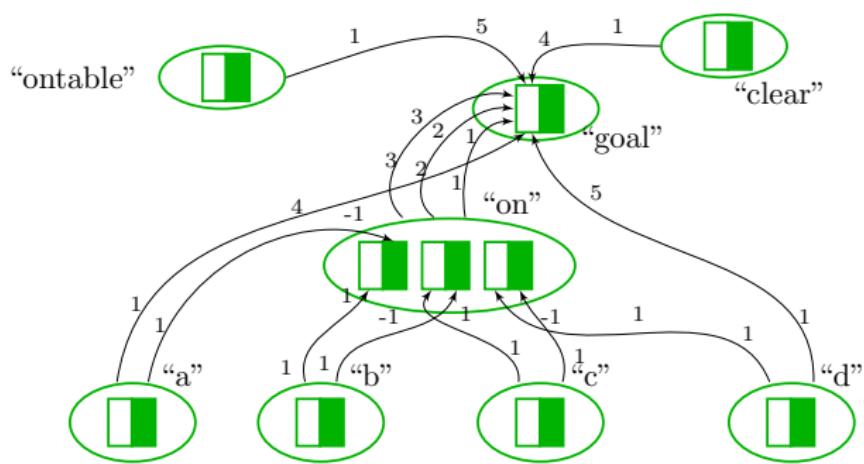
# Пример: фрагмент сети на значениях



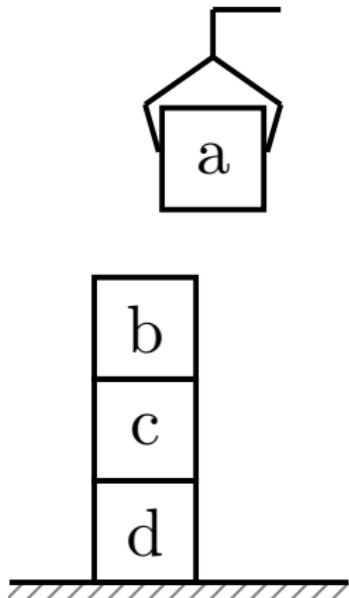
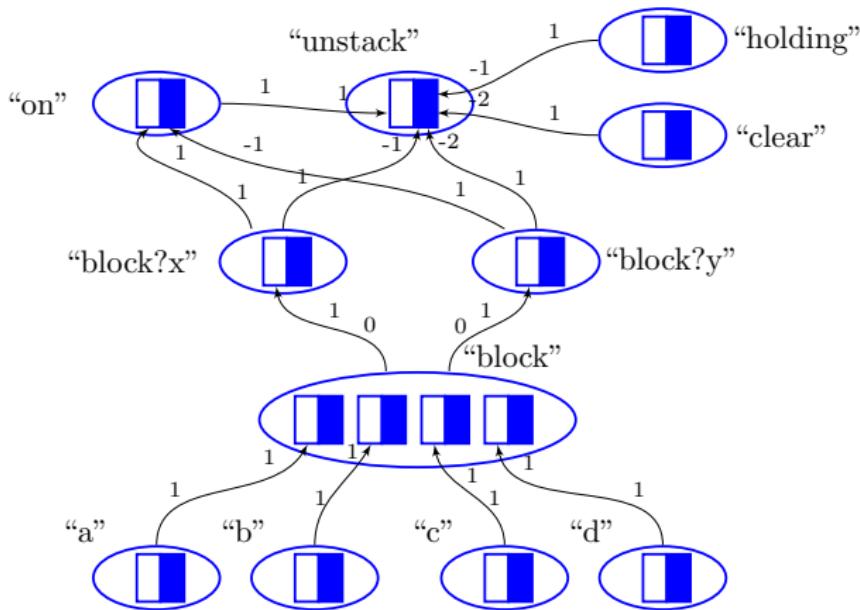
# Пример: сеть на смыслах - начальная ситуация



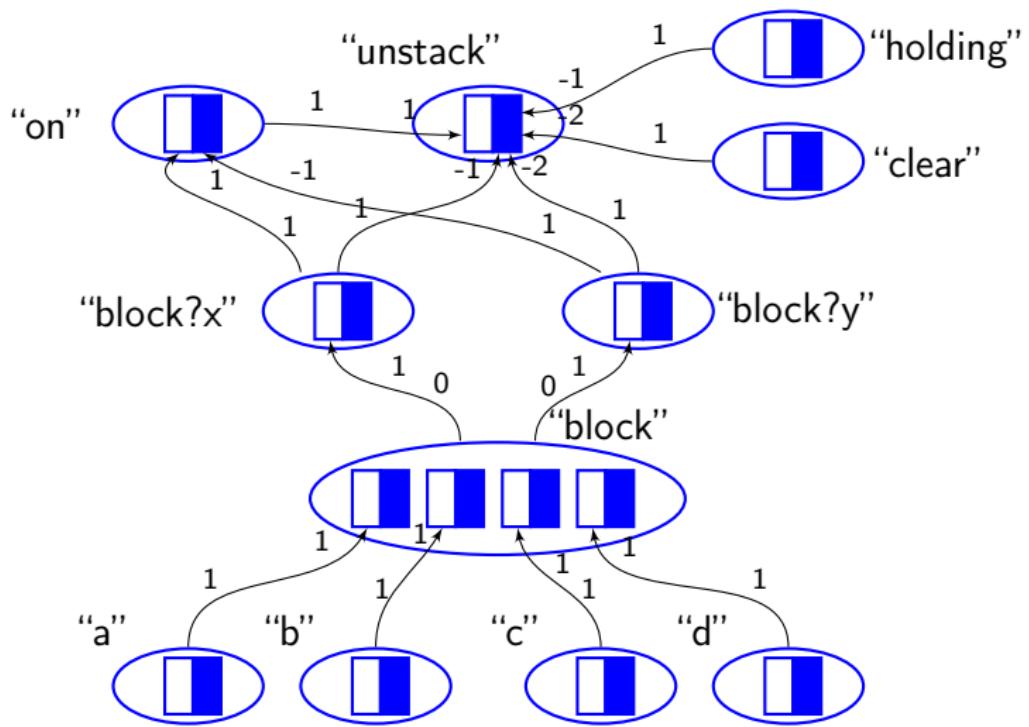
# Пример: сеть на смыслах - целевая ситуация



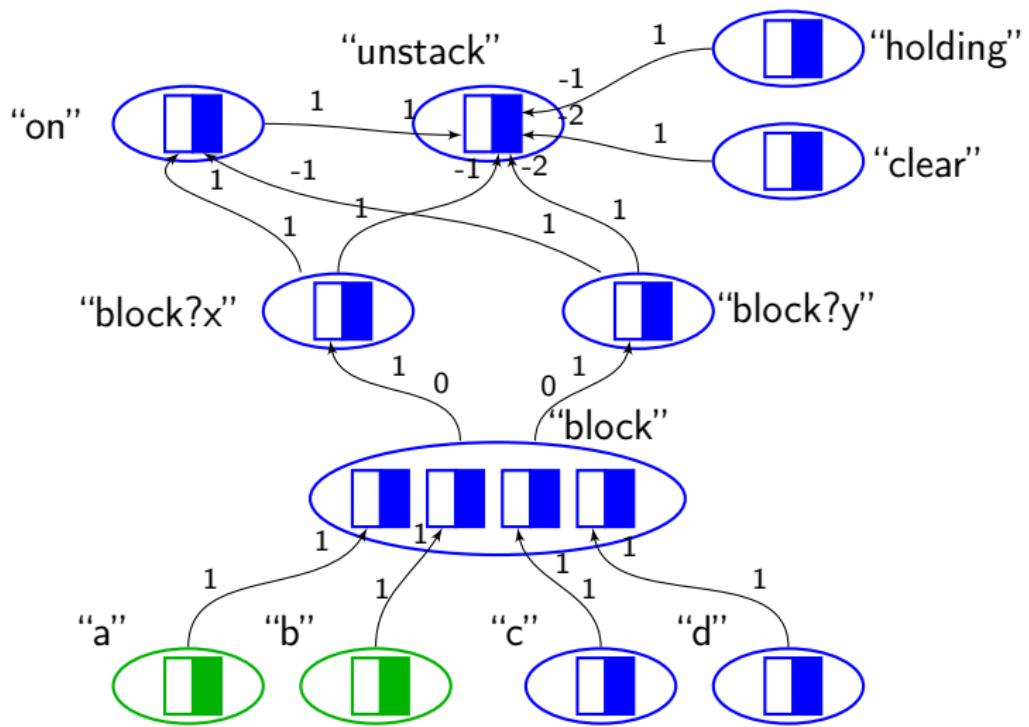
# Пример: фрагмент сети на значениях



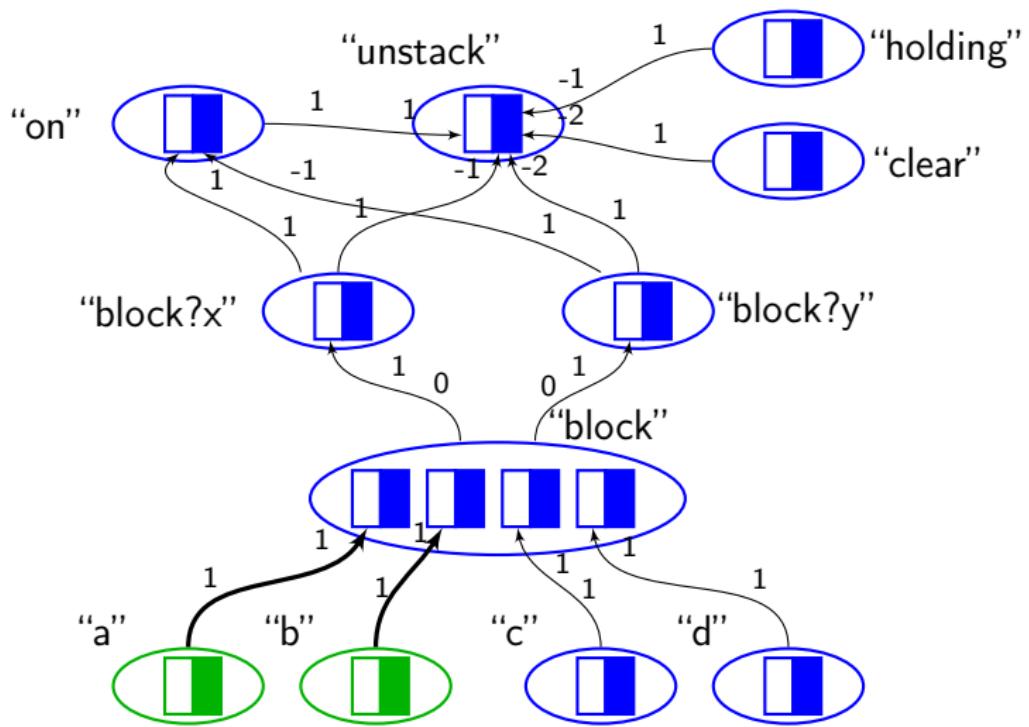
## Пример: генерация личностного смысла



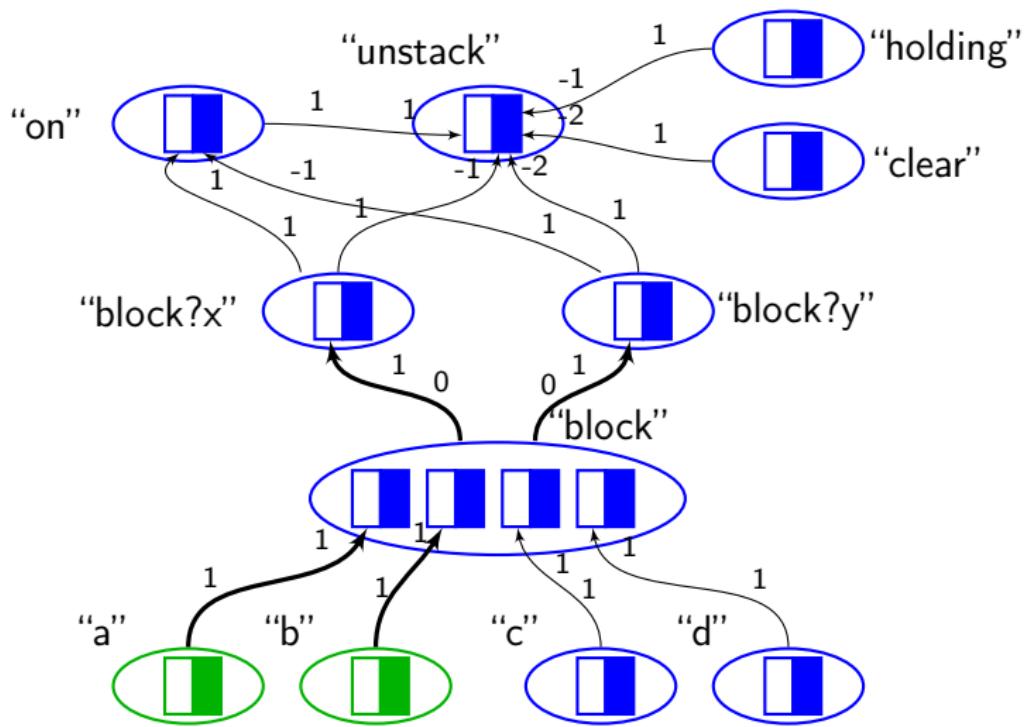
## Пример: генерация личностного смысла



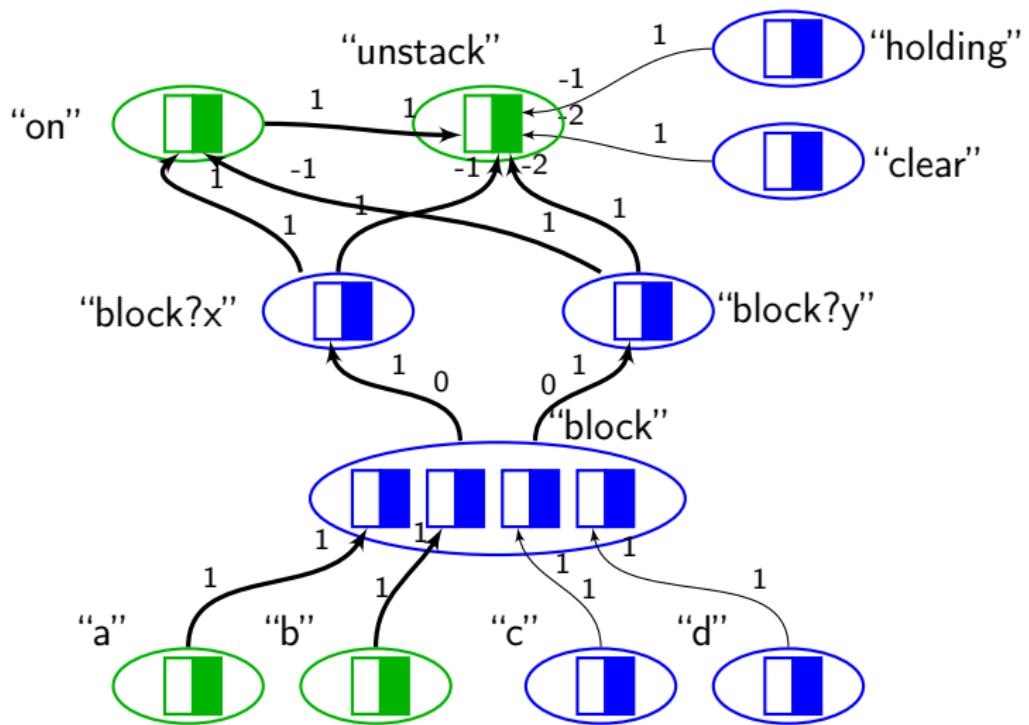
## Пример: генерация личностного смысла



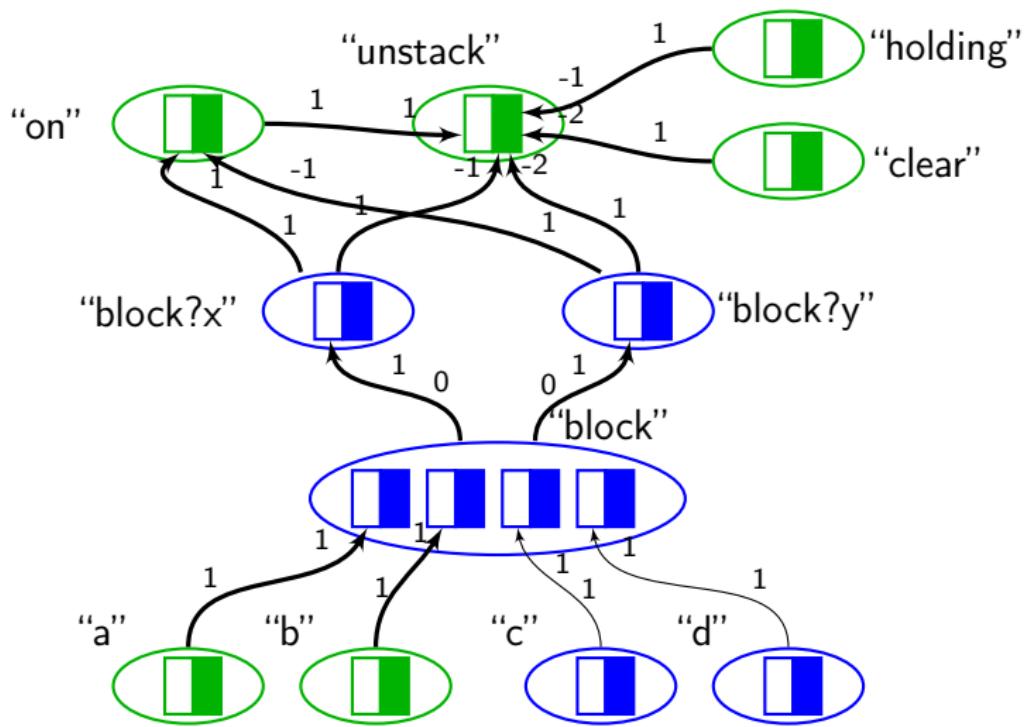
## Пример: генерация личностного смысла



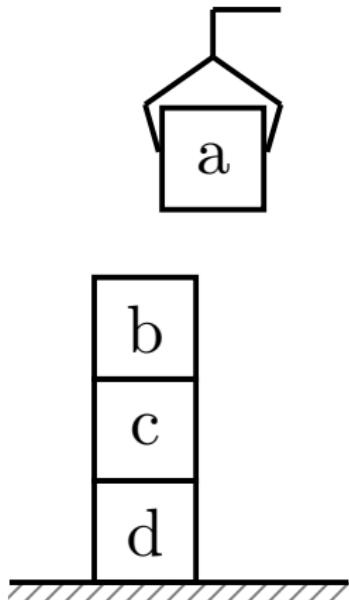
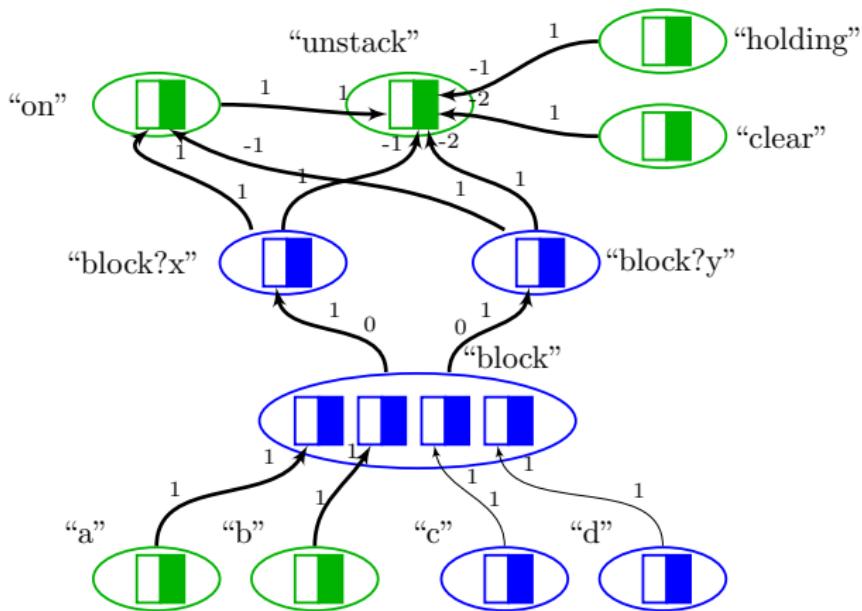
## Пример: генерация личностного смысла



## Пример: генерация личностного смысла

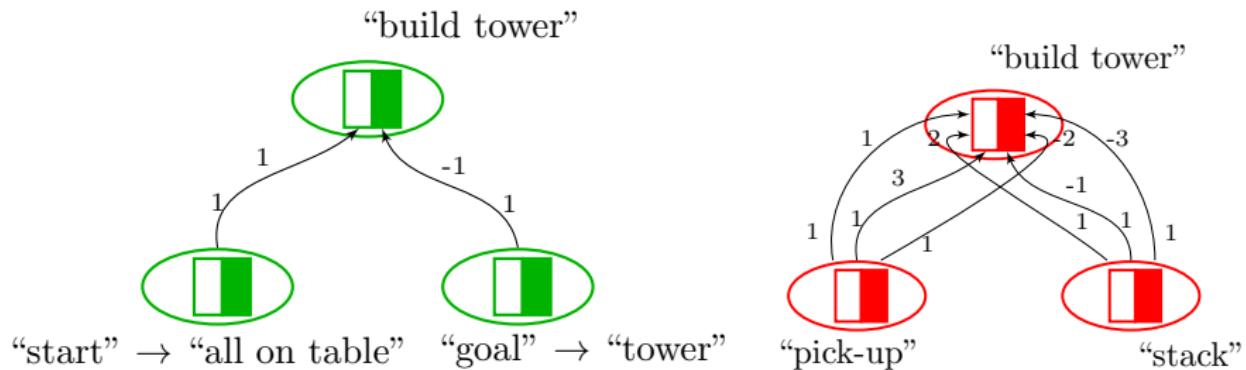


## Пример: текущая ситуация



# Обучение в процессе планирования

Образование нового правила и сохранение ситуаций - образование новых каузальных матриц



## Особенности постановки задачи

Рассматривается случай группового взаимодействия автономных технических объектов (агентов), в котором:

- агенты решают общую задачу (имеют общую цель высшего уровня),
- агенты действуют независимо друг от друга (децентрализованное управление), в т.ч. могут ставить индивидуальные подцели и достигать их,
- агенты обладают различными характеристиками, как техническими, так и когнитивными, т.е. разными стратегиями поведения,
- агенты обладают различными картинами мира,
- агенты действуют в меняющейся среде.

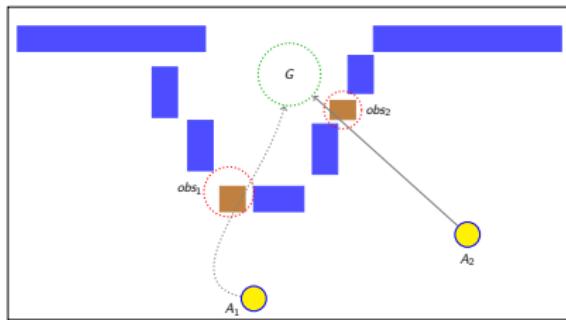
# Требования к представлению знаний

На представление пространственных и временных знаний в задаче согласованного перемещения с такими особенностями налагается ряд ограничений:

- необходимость поддержки некоторого протокола коммуникации, разделение знаний на коммуницируемые и некоммуницируемые (личные),
- необходимость выделения компоненты знания, не зависящей от индивидуальных (личных) характеристик агента,
- требование к наличию механизма связывания реальных объектов внешней среды и процедур их распознавания с символным коммуницируемым представлением (*symbol grounding problem*),
- поддержка механизмов пополнения картины мира (обучение и абстрагирование).

# Практические задачи

# Задача интеллектуального перемещения



## Задача

Целевая область не достижима некоторым агентом самостоятельно (с использованием только методов планирования траектории).

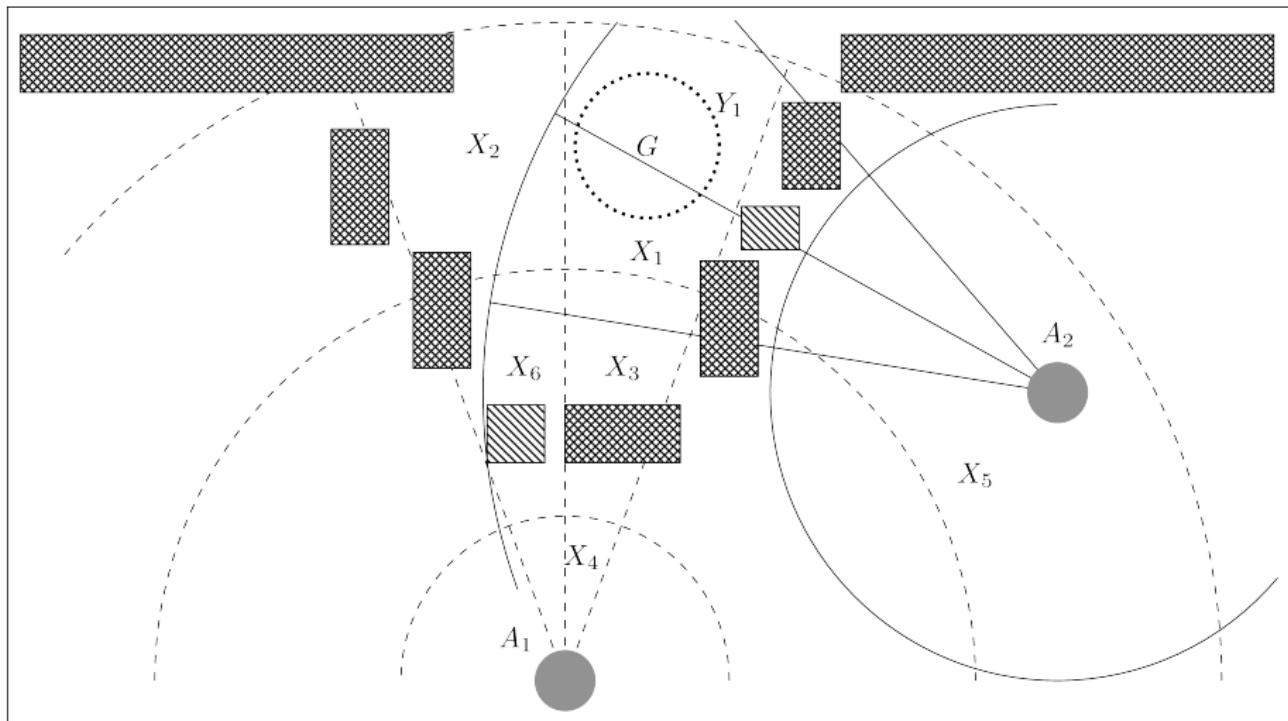
## Решение

Агенты должны поддерживать коммуникацию и модифицировать свои собственные планы с учетом коалиционных подзадач.

## Особенности:

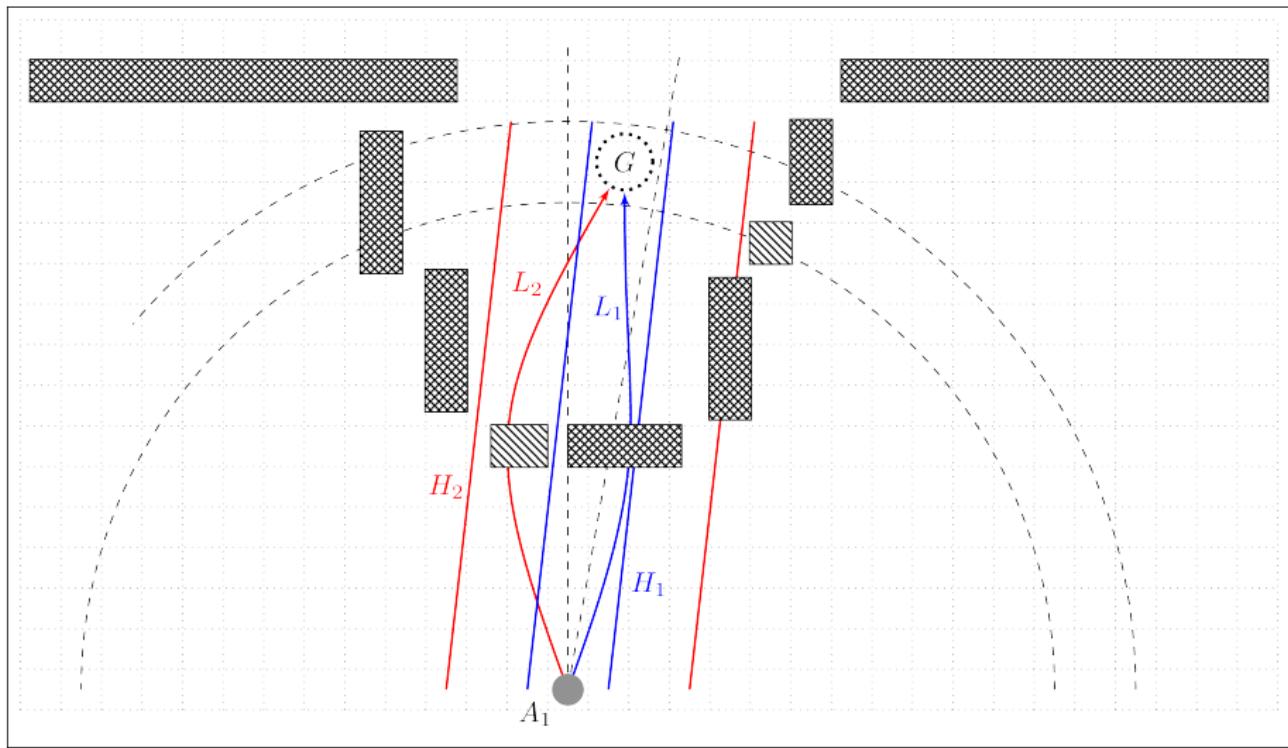
- Меняющаяся внешняя среда.
- Различные типы препятствий (некоторые могут быть разрушены).
- Агенты обладают различной функциональностью.
- Общая пространственная цель (ВСЕ агенты должны достичь определенной области на карте).

# Представление пространственных знаний



Панов, А. И. «Представление знаний автономных агентов, планирующих согласованные перемещения». Робототехника и техническая кибернетика. 2015.

# Представление пространственных знаний



Панов, А. И. и К. С. Яковлев. «Взаимодействие стратегического и тактического планирования поведения коалиций агентов в динамической среде». *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2016.

Панов (ПОИС ВШЭ)

Обучение в знаковой КМ

24 января – Лабораторная ФКН 43

## Представление действий по перемещению

Действия по перемещению — знаки  $s_t$  (признаки  $f_t$ ,  $t$  — тип перемещения), которым соответствуют каузальные матрицы типа  $Z_t$ , состоящие из трёх столбцов

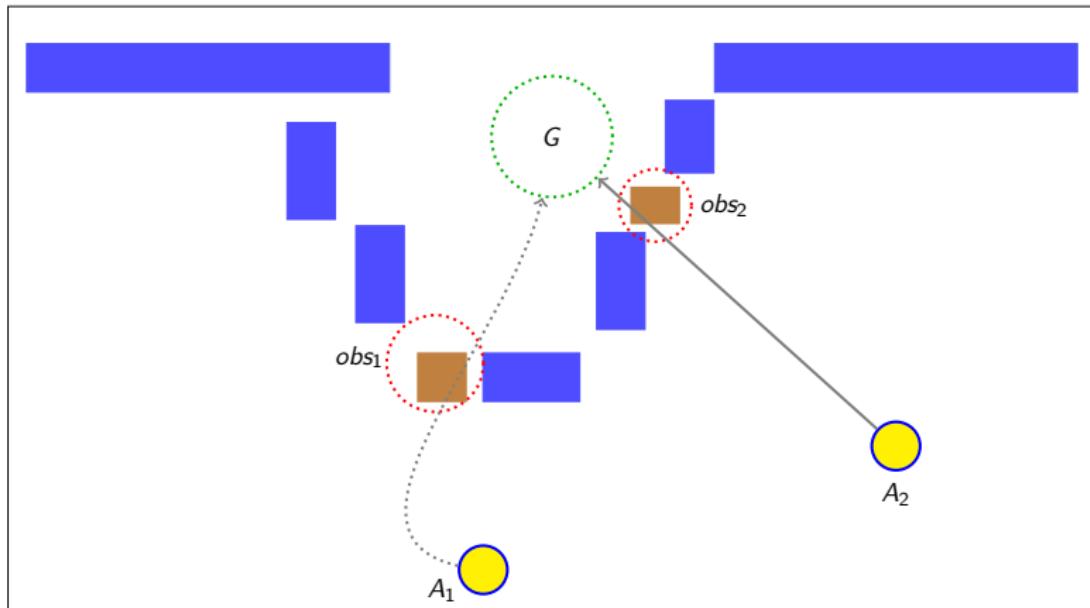
$$z_1 = (I_x, I), z_2 = (I_y, d_u, E), z_3 = (I_y, I, t_v),$$

где

- $I_x$ ,  $I_y$  — признаки, соответствующие категории расстояния в пространственной логике (например, вплотную, близко, далеко и др.),
- $d_u$  — признак, соответствующий категории направления в пространственной логике (например, впереди, слева и др.),
- $t_v$  — признак, соответствующий категории времени во временной логике (например, скоро, в будущем и др.),
- $I$  — признак присутствия самого агента,
- $E$  — признак отсутствия препятствия.

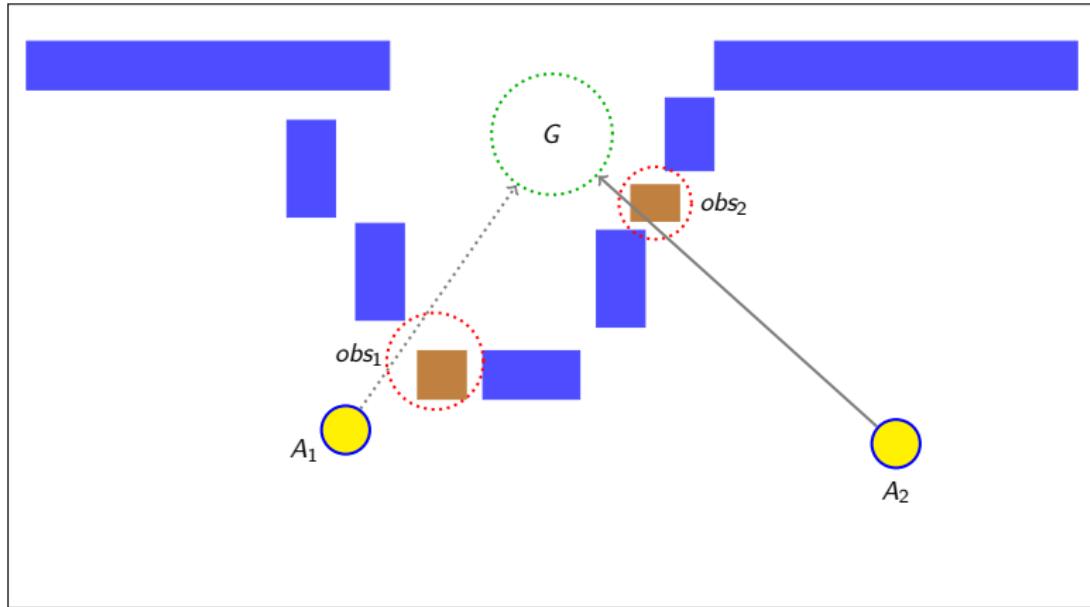
# Распределение ролей при решении задачи

## Пример по перемещению



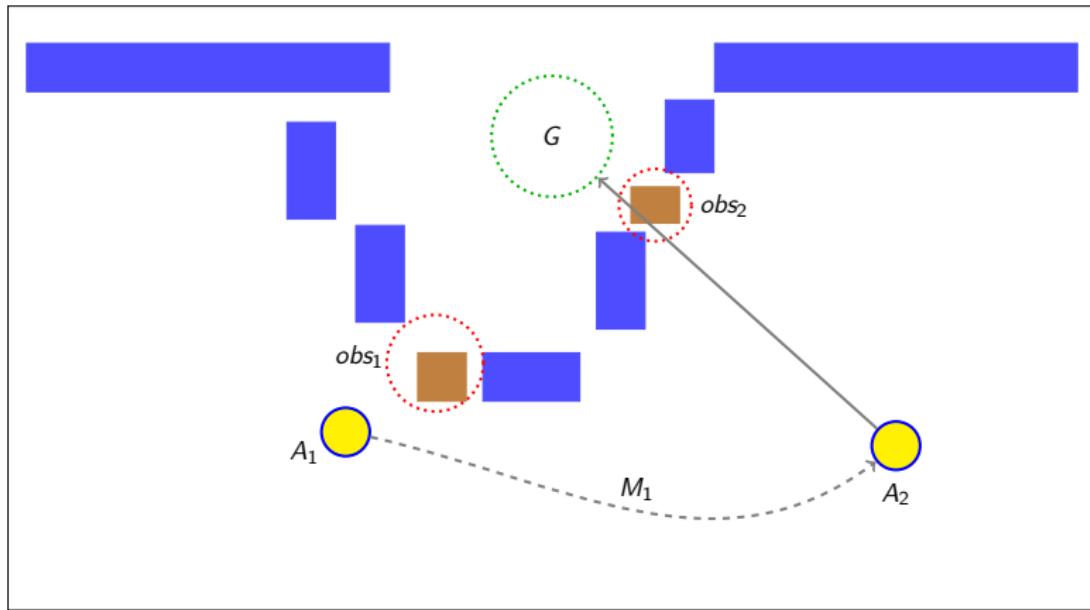
Актуализированные знаки агента  $A_1$ : “область  $X_6$ ”, “далеко”,  
“перемещение 1” → **операции планирования траектории**.

## Пример по перемещению



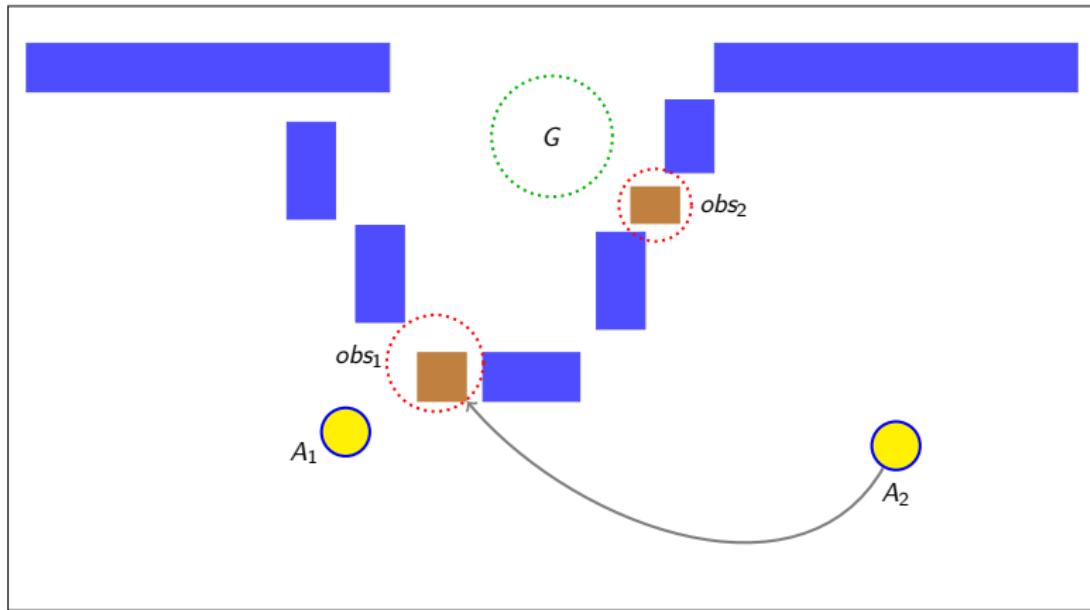
Актуализированные знаки агента  $A_1$ : “препятствие 1”, “рядом”, “область  $X_6$ ”.

## Пример по перемещению



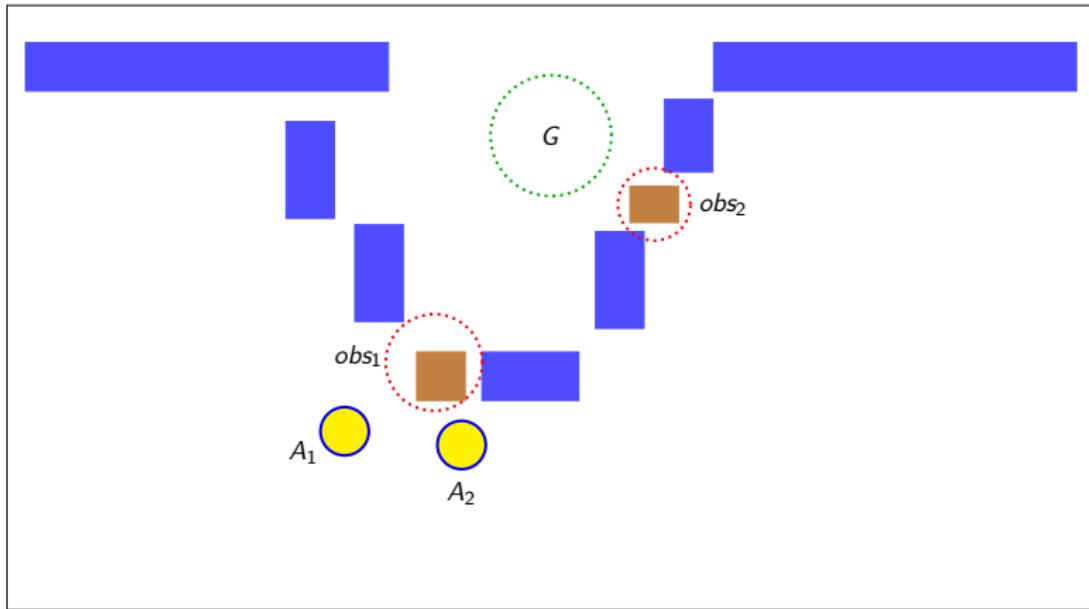
Актуализированные знаки агента  $A_1$ : “отправить сообщение”, “агент  $A_2$ ”.

## Пример по перемещению



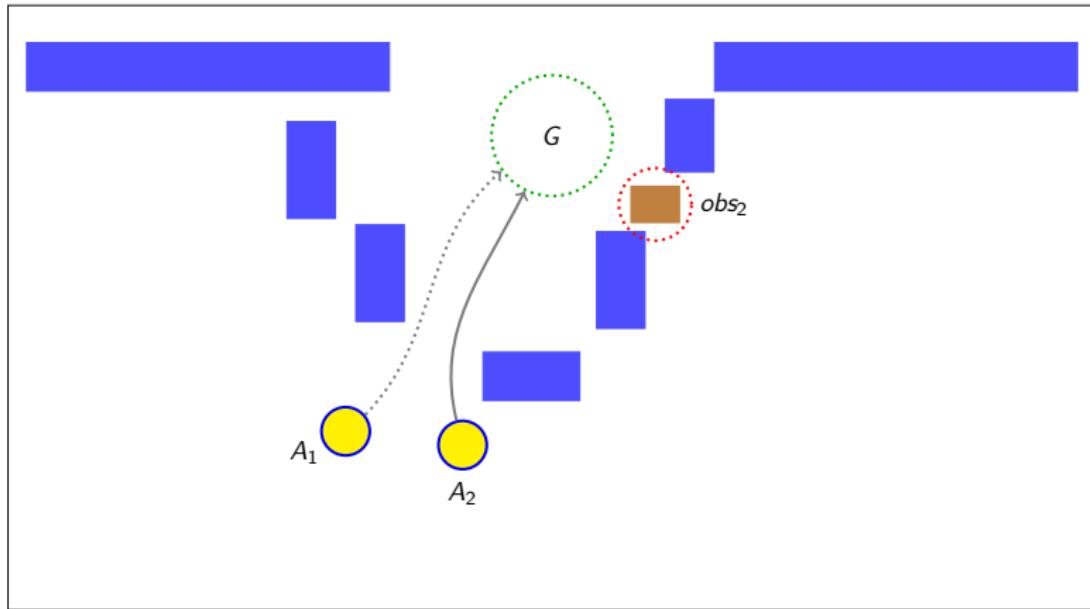
Актуализированные знаки агента  $A_2$ : “область  $Y_3$ ”, “далеко”,  
“перемещение 2” → **операции планирования траектории.**

## Пример по перемещению



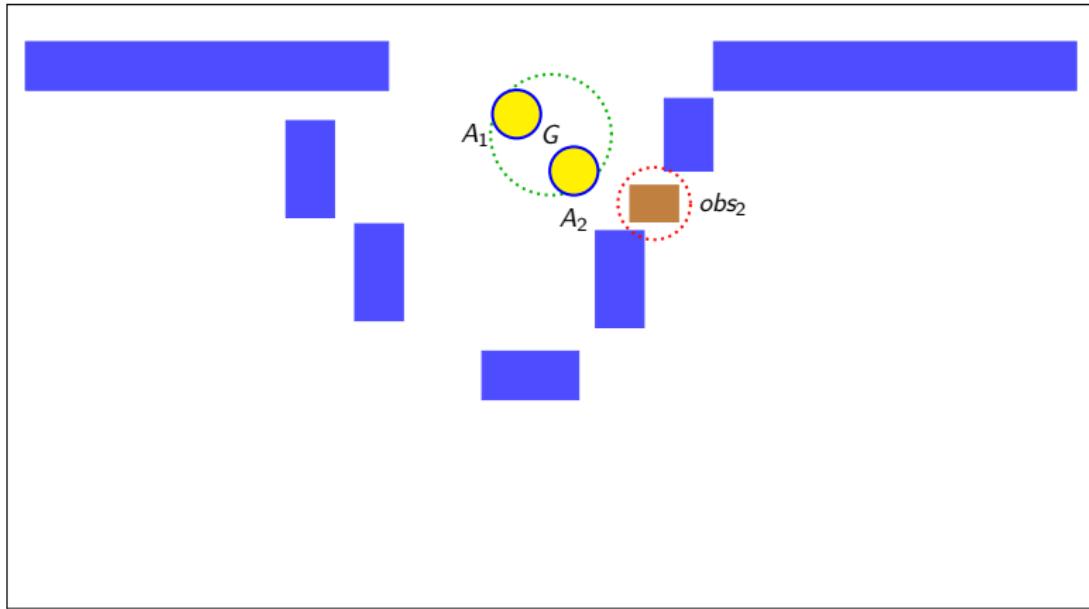
Актуализированные знаки агента  $A_2$ : “область  $Y_1$ ”, “рядом”,  
“препятствие 1”, “разрушить”.

## Пример по перемещению



Актуализированные знаки агента  $A_1$  and  $A_2$ : “далеко”, “перемещение 3”  
→ операции планирования траектории.

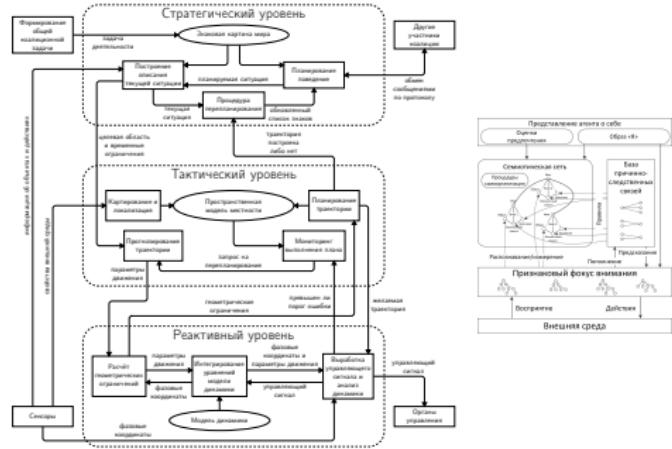
## Пример по перемещению



Актуализированные знаки агента  $A_1$  и  $A_2$ : целевое состояние ("область  $G$ ").

# Применение для решения интеллектуальных задач

- Моделирование внимания.
- Образование нового знания (концепта).
- Планирование поведения.
- Построение картины мира субъекта на основе текстов.
- Генерация сообщений на основе картин мира определенного типа (виртуальные ассистенты).
- Построение многоуровневых архитектур управления.



Emel'yanov, S., D. Makarov, A. I. Panov, and K. Yakovlev. "Multilayer cognitive architecture for UAV control". *Cognitive Systems Research*. 2016.

Макаров, Д. А., А. И. Панов и К. С. Яковлев. «Архитектура многоуровневой интеллектуальной системы управления беспилотными летательными аппаратами». *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2015.

Зубарев, Д. В., Д. А. Макаров, А. И. Панов и К. С. Яковлев. «Принципы построения многоуровневых архитектур систем управления беспилотными летательными аппаратами». *Авиакосмическое приборостроение*. 2013.

## Планы на следующий год

- Исследование биологически правдоподобного алгоритма образования каузальной матрицы.
- Исследование процессов выявления причинно-следственной связи.
- Проведение сравнительных экспериментов по обучению правилам поведения.

# Список публикаций

- Panov, Aleksandr I. "Behavior Planning of Intelligent Agent with Sign World Model". *Biologically Inspired Cognitive Architectures*. 2017.
- Emel'yanov, S., D. Makarov, A. I. Panov, and K. Yakovlev. "Multilayer cognitive architecture for UAV control". *Cognitive Systems Research*. 2016.
- Osipov, G. S. "Sign-based representation and word model of actor". *2016 IEEE 8th International Conference on Intelligent Systems (IS)*. 2016.
- Panov, A. I. and K. S. Yakovlev. "Behavior and path planning for the coalition of cognitive robots in smart relocation tasks". *Robot Intelligence Technology and Applications 4*. 2016.
- Panov, Aleksandr I. and Konstantin S. Yakovlev. "Psychologically inspired planning method for smart relocation task". *Procedia Computer Science*. 2016.
- Skrynnik, A., A. Petrov, and A. I. Panov. "Hierarchical Temporal Memory Implementation with Explicit States Extraction". *Biologically Inspired Cognitive Architectures (BICA) for Young Scientists*. 2016.
- Панов, А. И. и К. С. Яковлев. «Взаимодействие стратегического и тактического планирования поведения коалиций агентов в динамической среде». *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2016.
- Osipov, Gennady S. "Signs-Based vs. Symbolic Models". *Advances in Artificial Intelligence and Soft Computing*. 2015.
- Макаров, Д. А., А. И. Панов и К. С. Яковлев. «Архитектура многоуровневой интеллектуальной системы управления беспилотными летательными аппаратами». *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2015.
- Осипов, Г. С., А. И. Панов и Н. В. Чудова. «Управление поведением как функция сознания. II. Синтез плана поведения». *Известия Российской академии наук. Теория и системы управления*. 2015.
- Панов, А. И. «Представление знаний автономных агентов, планирующих согласованные перемещения». *Робототехника и техническая кибернетика*. 2015.
- Осипов, Г. С., А. И. Панов и Н. В. Чудова. «Управление поведением как функция сознания. I. Картина мира и целеполагание». *Известия Российской академии наук. Теория и системы управления*. 2014.
- Панов, А. И. «Алгебраические свойства операторов распознавания в моделях зрительного восприятия». *Машинное обучение и анализ данных*. 2014.

# Спасибо за внимание!

aapanov@hse.ru

<https://github.com/cog-isa/map-planner.git>