

# Когнитивное компьютерное моделирование и искусственный интеллект

Александр Панов

Отдел «Интеллектуальные динамические системы и когнитивные исследования»  
Институт системного анализа  
Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление»  
Российской академии наук

19 марта – Семинар AI@MIPT



## 1 Введение

- О лаборатории
- Психологические идеи
- 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
- Распределение ролей в коллективе
- Обучение с подкреплением
- Другие задачи

# Кратко о себе

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

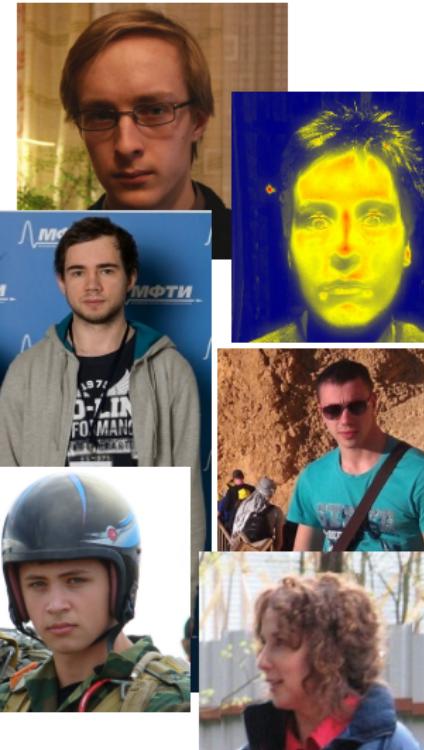
- Старший научный сотрудник лаборатории «Динамические интеллектуальные системы» ИСА ФИЦ ИУ РАН.
- Научный сотрудник и доцент ФКН ВШЭ.
- Доцент кафедры системных исследований Московского физико-технического института (МФТИ).
- Член Российской ассоциации искусственного интеллекта (РААИ).
- Член Сообщества биологически инспирированных когнитивных архитектур (BICA Society).
- Участие в организации Международной конференции по биологически инспирированным когнитивным архитектурам (BICA-2016 — Нью-Йорк, BICA-2017 — Москва), Международной школы по биологически инспирированным когнитивным архитектурам (Fierce on BICA, Москва) и школы молодых ученых по ИИ (ISyT 2017, Санкт-Петербург).
- Член редколлегии журнала Biologically Inspired Cognitive Architectures.
- Руководитель проектов РФФИ мол\_а, мол\_а\_дк, офи\_м.
- Ментор студенческой лаборатории по ИИ (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, асп. ИСА РАН
- Ковалев Алексей, асп. ВШЭ
- Борзилов Александр, студ. МФТИ
- студенты SLabAI



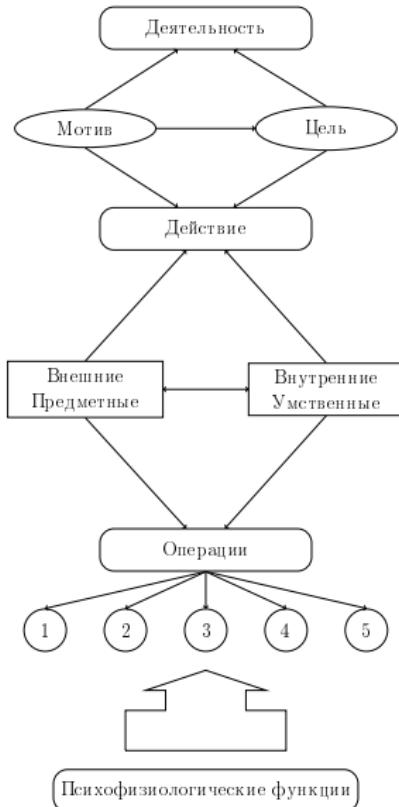
# Культурно-исторический подход Выготского



Теория происхождения и развития высших психических функций:

- Социальная среда - главный источник развития личности.
- Овладение культурой, способами поведения и мышления.
- Развитие когнитивных функций происходит в первую очередь через использование ребенком «психологических орудий», путем овладения системой знаков-символов, таких как язык, письмо, счет.
- Внешняя деятельность, когда культурные средства имеют предметный вид, по мере отработки сворачивается (интериоризуется) во внутренний план.
- На первом этапе внешней деятельности ребенок все делает в сотрудничестве со взрослыми, «зона ближайшего развития».
- Развитие - не ровно-постепенный, а стадиальные процессы.
- Сознание развивается через диалог: диалог ребенка со взрослым либо диалог взрослого со взрослым.

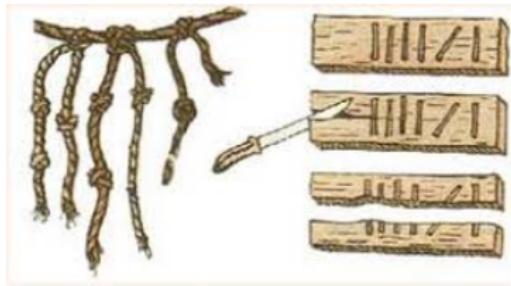
# Культурно-исторический подход



## Основные положения:

- Поведение человека - это двойная иерархическая структура мотивы-цели и действия-операции.
- Деятельность – это активный, целенаправленный процесс.
- Действия человека предметны; их цели носят социальный характер.
- Сознание и деятельность неразрывно связаны.

# Знак как орудие психической деятельности



- Знак - это искусственно созданный человеком стимул, средство для управления своим поведением и поведением других.
- История развития человечества - это история развития знака: чем более развита система знаков в поколении, тем более развиты высшие психические функции.
- Знаки: наскальный рисунок, приметы, жесты, речь, ноты и т.д.

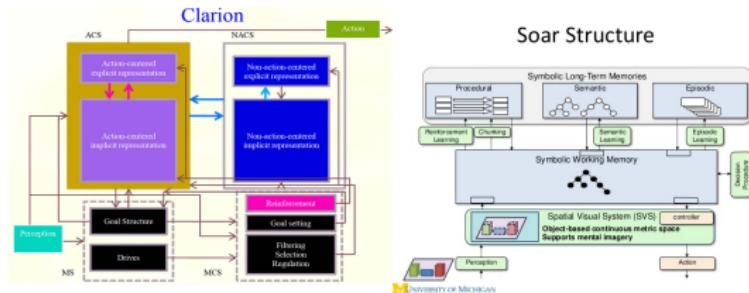
# Прикладная семиотика



Семиотические базы знаний:

- **Именованность:** информационная единица, которая претендует на то, чтобы называться знанием, должна иметь некоторую собственную метку - имя.акс
- **Структурированность:** информационная единица должна обладать своей внутренней структурой.
- **Принцип матрешки:** знаки за счет связей наследования как бы вкладываются друг в друга, обеспечивая описание сущностей на различных уровнях.
- **Связность:** знаки благодаря различным отношениям объединяются в сеть.
- **Активность:** в сетях знаков становится возможной реализация принципа «активизация знаний – источник активизации процедур».
- **Рефлексивность:** появление метауровня позволяет системе рассуждать о самой себе, о характере имеющейся у нее информации об окружающем мире.

# Когнитивные архитектуры



Недостатки современных когнитивных архитектур:

- Концептуальная нерешенность проблемы привязки символов (symbol grounding problem) - CLARION
- Отсутствие деятельностной модели поведения системы - реализация только некоторых когнитивных аспектов
- Иерархичность представления знаний (4D/RCS)
- Возможность реализации иерархического планирования
- Реализация обучения концептуальным знаниям - Cognitive Mario
- Моделирование рефлексивного поведения

# 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:

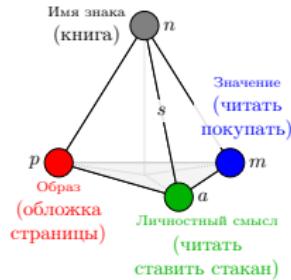
- в смысле культурно-исторического подхода Выготского-Лурии,
- выполняющий функции в соответствии с теорией деятельности Леонтьева.

# 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.

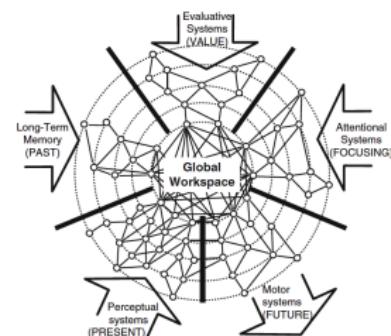
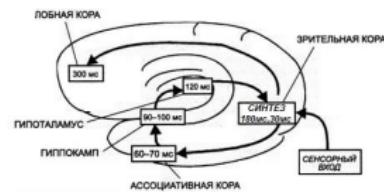
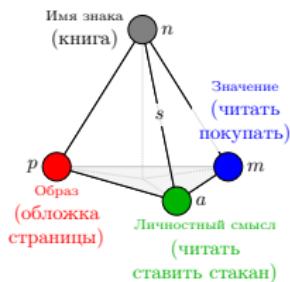


# Картина мира субъекта деятельности

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:

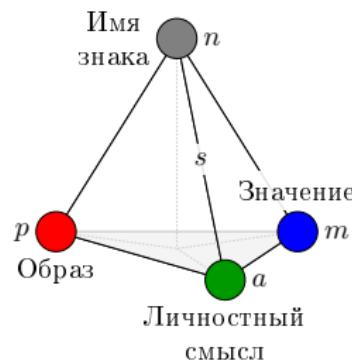
- в смысле культурно-исторического подхода Выготского-Лурии,
- выполняющий функции в соответствии с теорией деятельности Леонтьева.



В пользу существования такой структуры свидетельствуют:

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

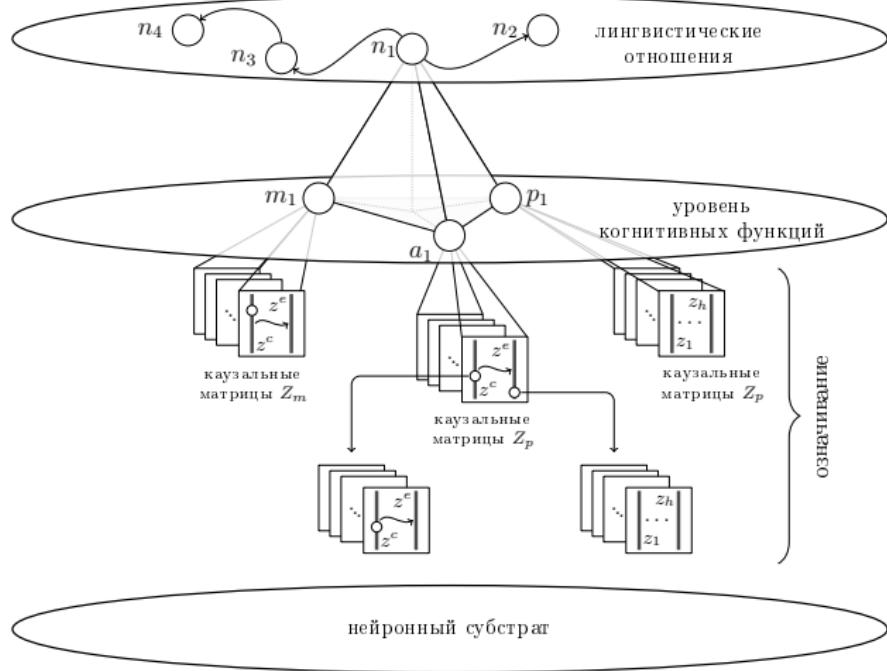
# Три образующих элемента картины мира



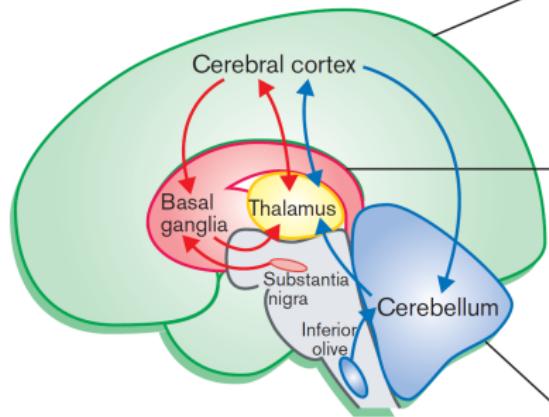
Представляемая сущность описывается тремя причинно-следственными (каузальными) структурами:

- **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).

# Уровни представления



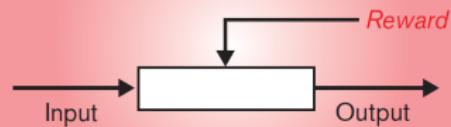
# Модели обучения в мозге



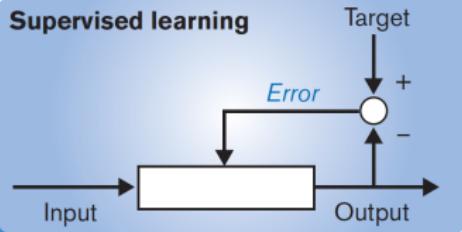
## Unsupervised learning



## Reinforcement learning

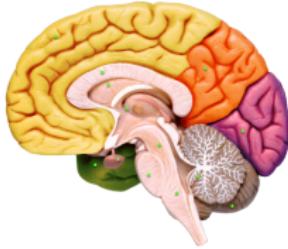


## Supervised learning

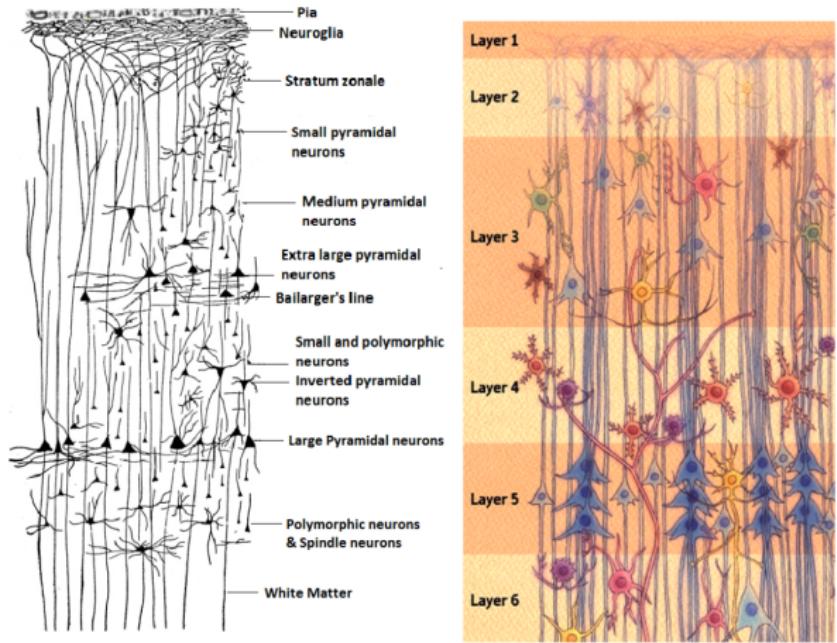


Current Opinion in Neurobiology

# Нейронный субстрат

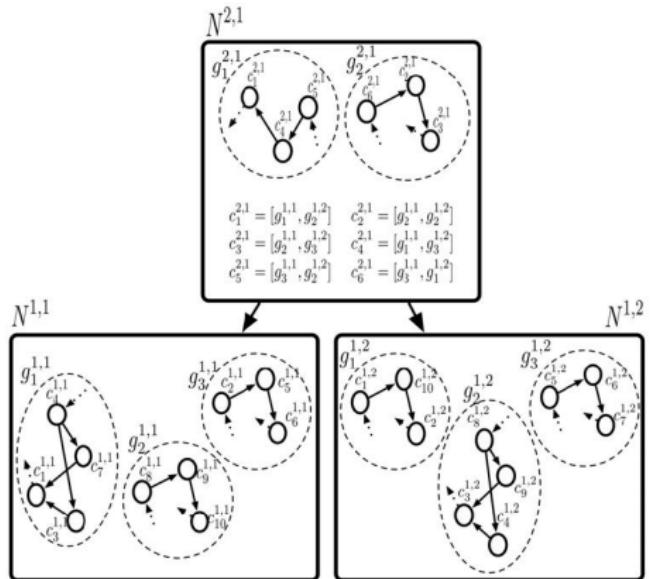


## Histological Structure of the Cerebral Cortex

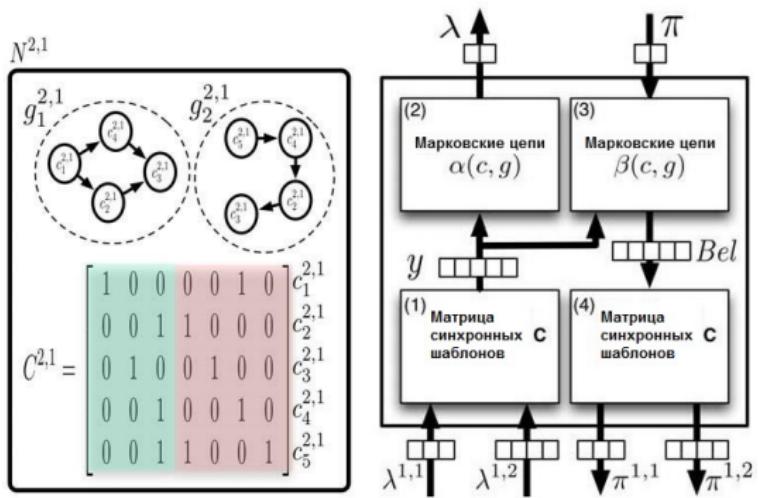


## Гетерархическая модель

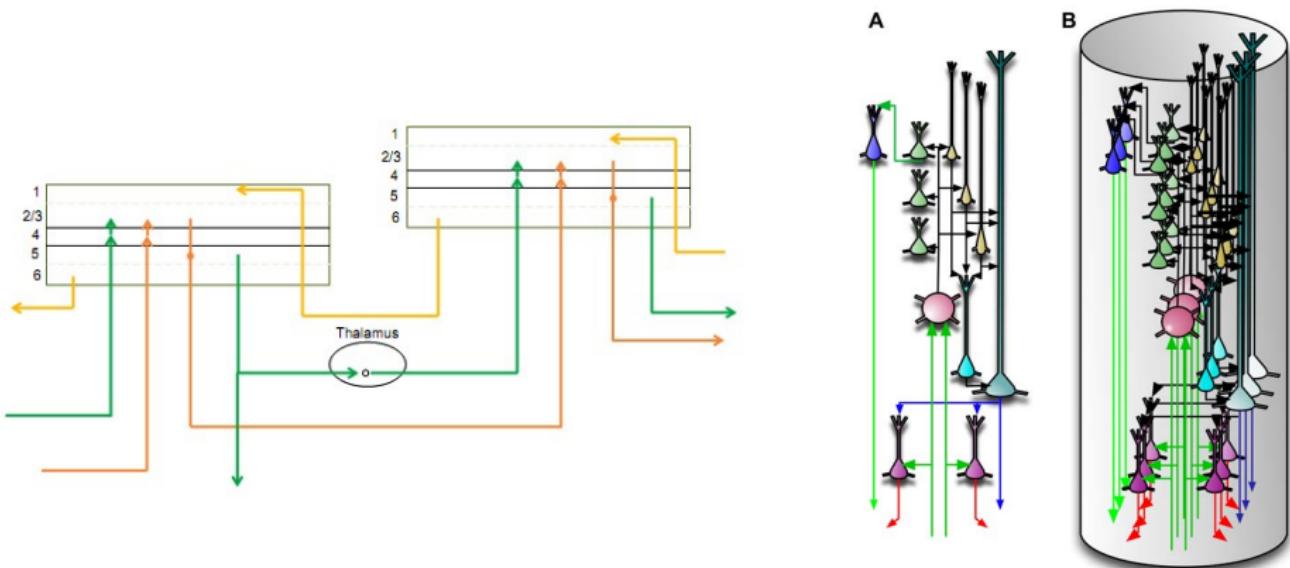
Разработана расширенная реализация иерархической временной памяти (hierarchical temporal memory - HTM) - гетерархическая каузальная сеть (heterarchical causal network - HCN).



# Гетерархическая модель



# Нейронная организация



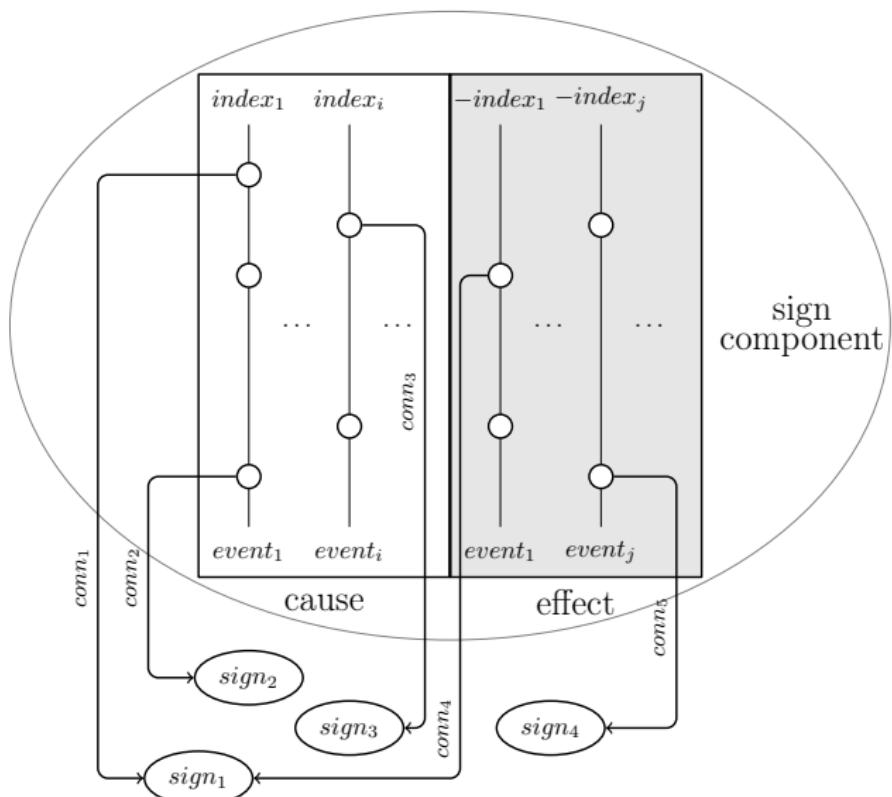
## Модель процесса обучения

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**.

# Каузальная матрица



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

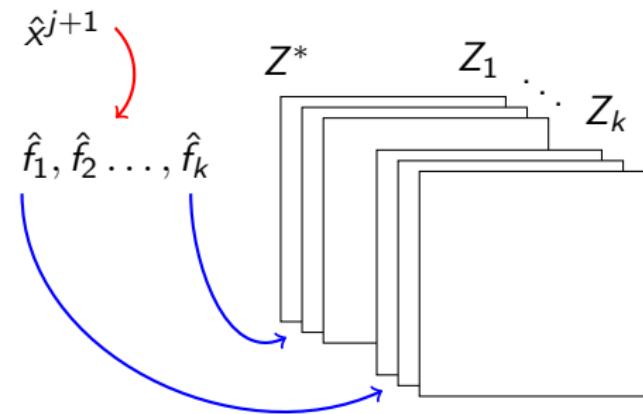
$\hat{f}_1, \hat{f}_2 \dots, \hat{f}_k$

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

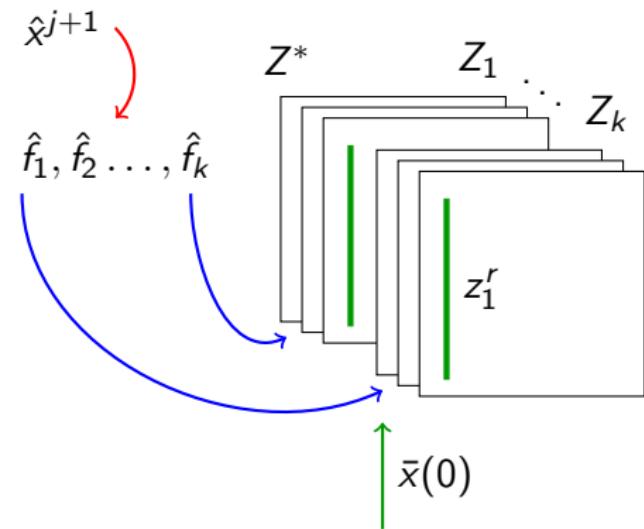
$$\hat{x}^{j+1}$$

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

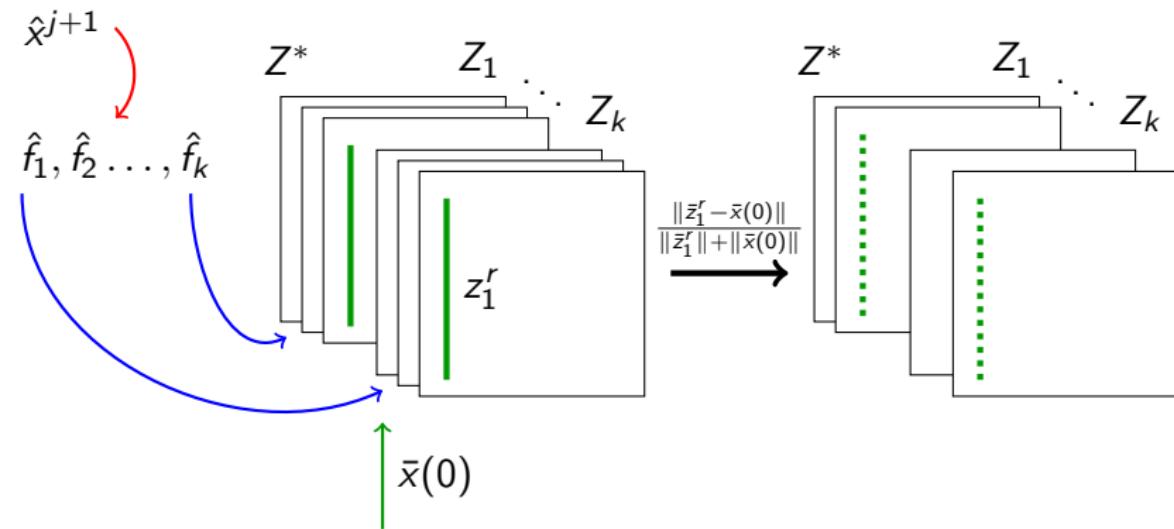
# Алгоритм $\mathfrak{A}_{th}$ актуализации знака



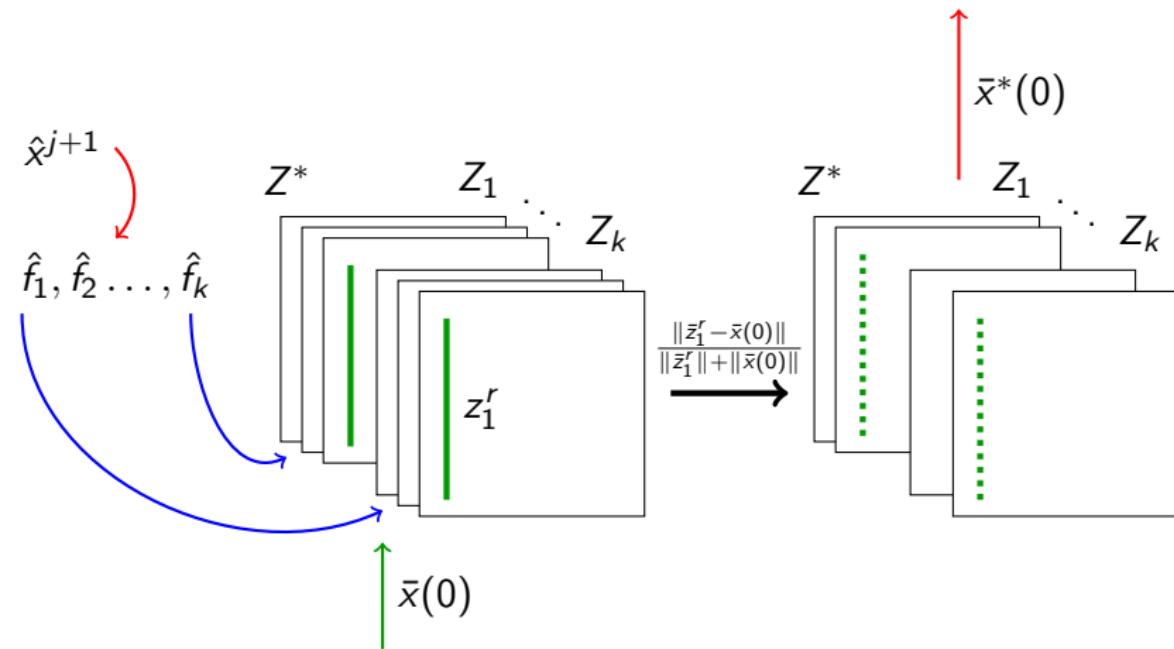
# Алгоритм $\mathfrak{A}_{th}$ актуализации знака



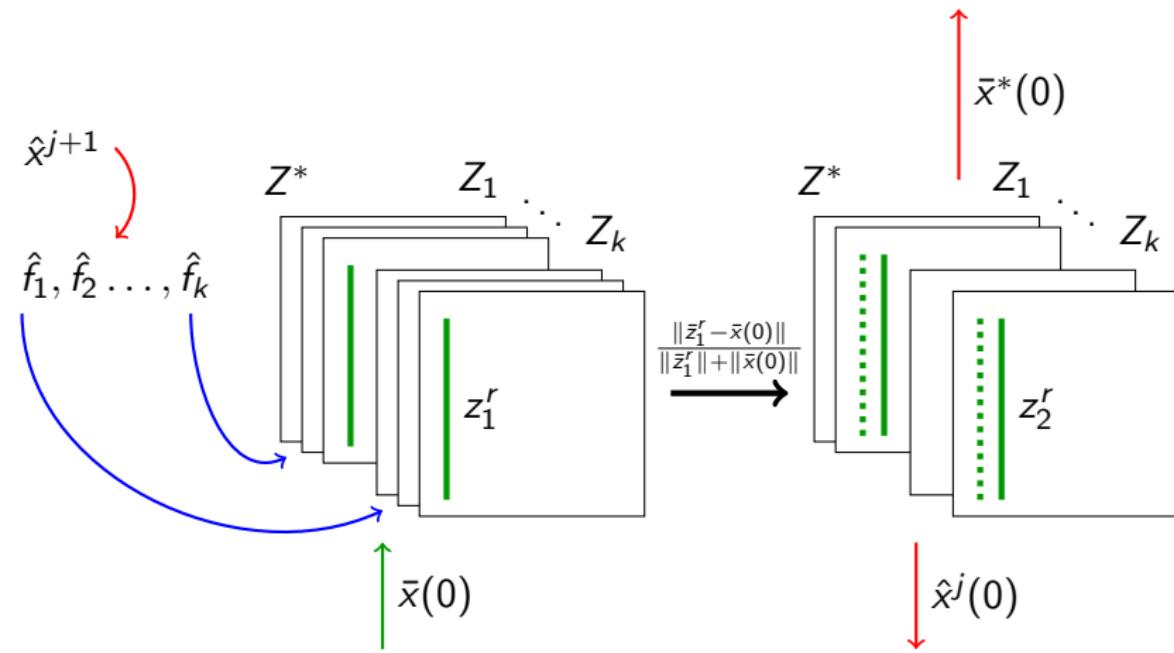
# Алгоритм $\mathfrak{A}_{th}$ актуализации знака



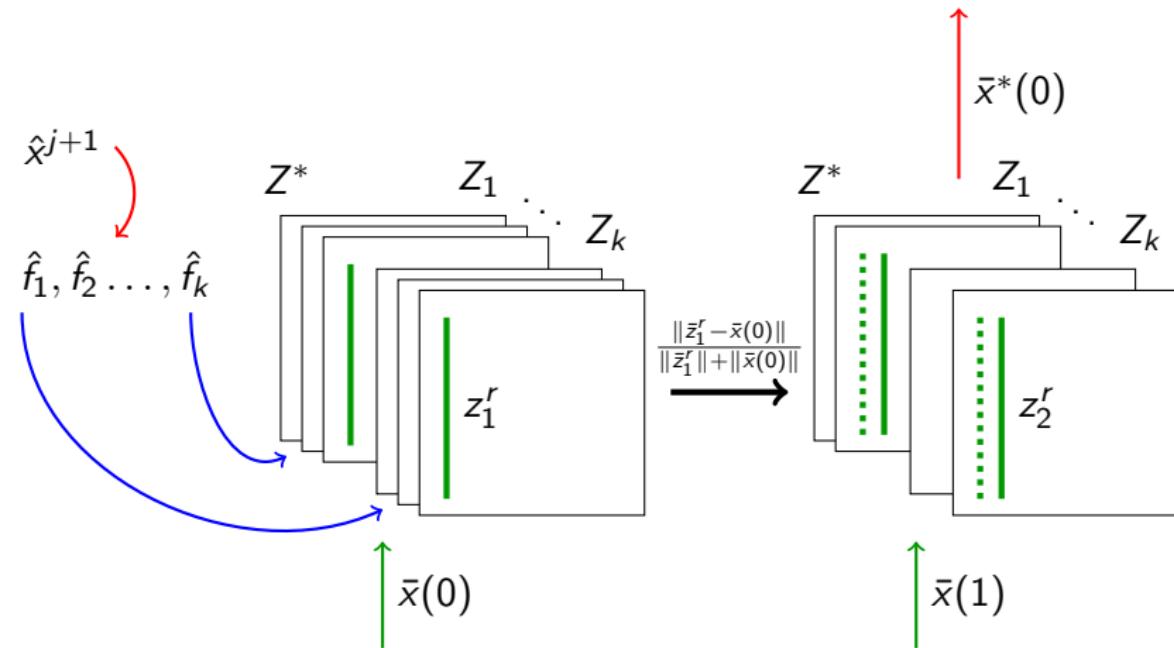
# Алгоритм $\mathfrak{A}_{th}$ актуализации знака



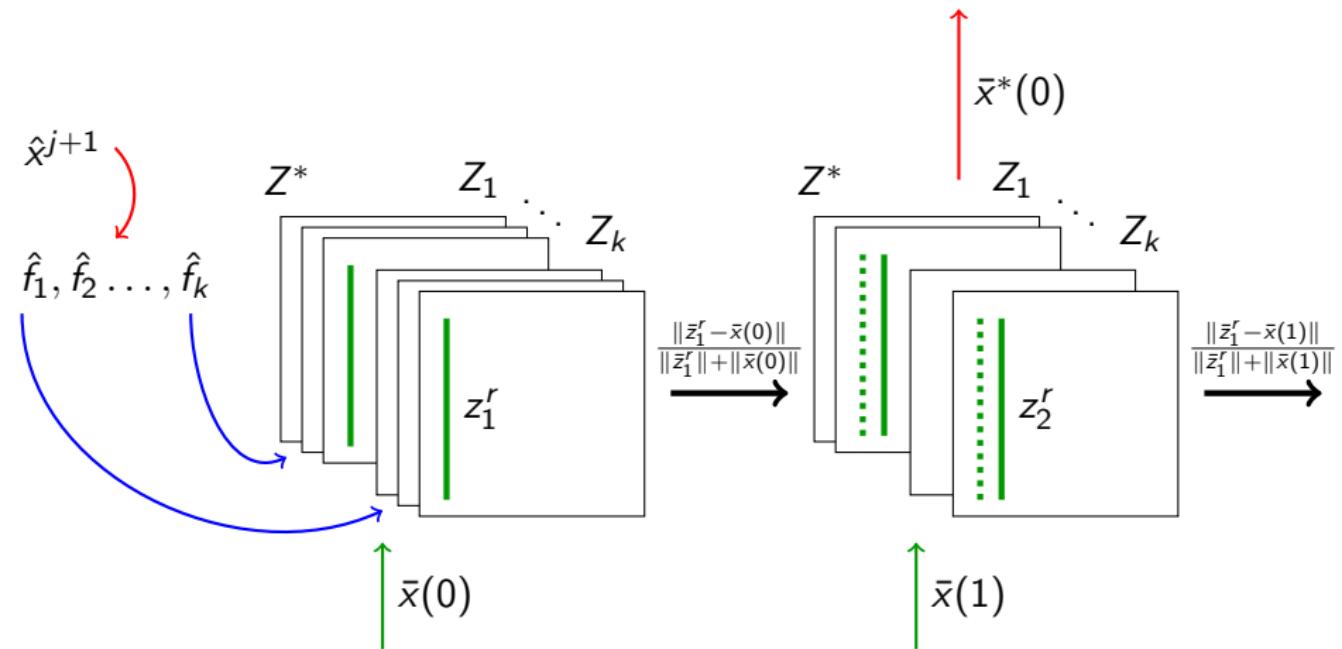
# Алгоритм $\mathfrak{A}_{th}$ актуализации знака



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



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

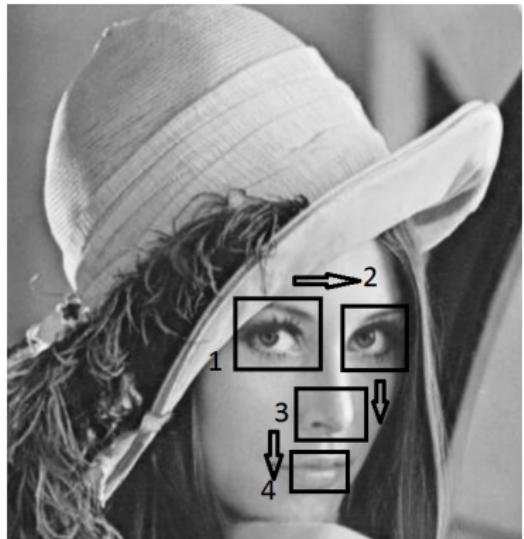
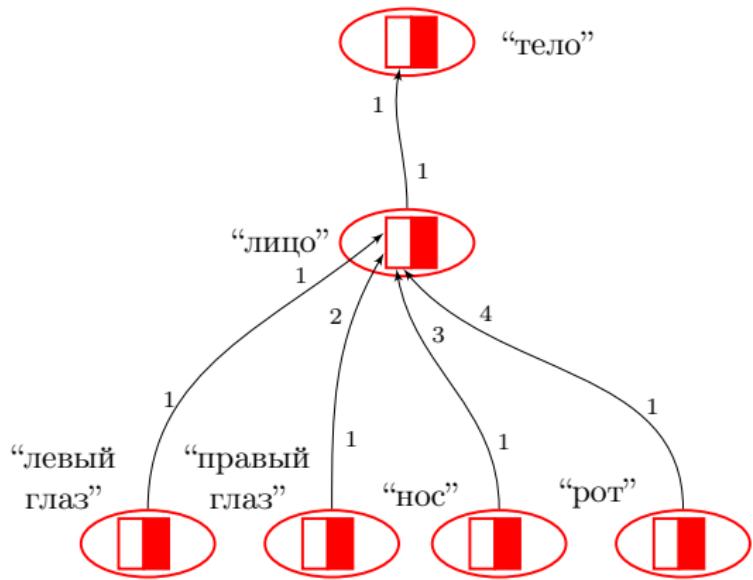


## Каузальная сеть на образах

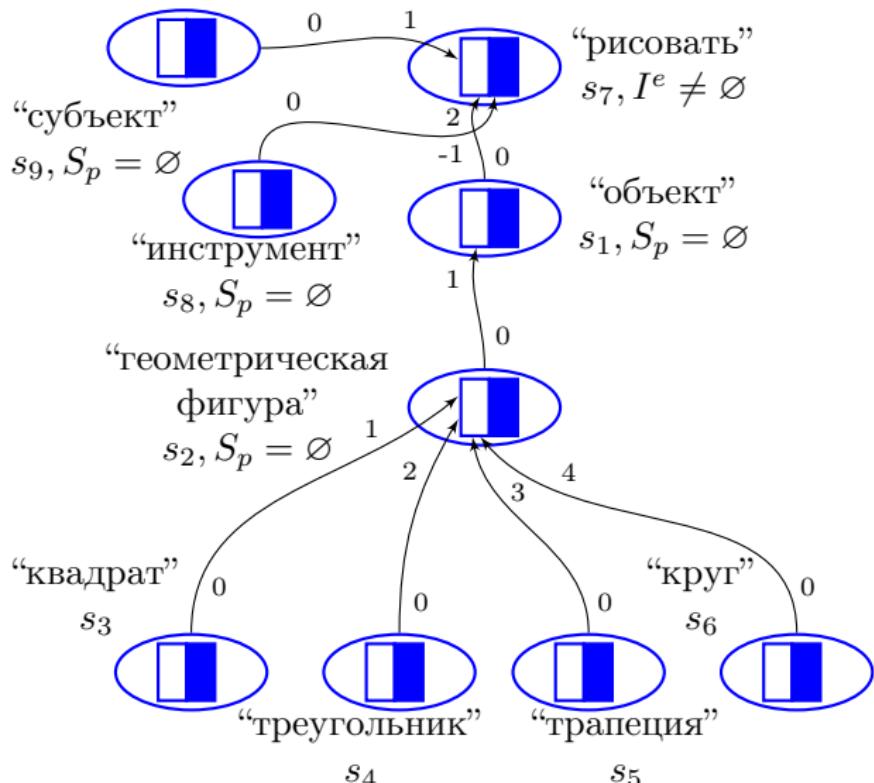
**Каузальная сеть** на множестве образов знаков  $W_p = \langle V_p, E_p \rangle$  - помеченный ориентированный граф, в котором

- 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*).

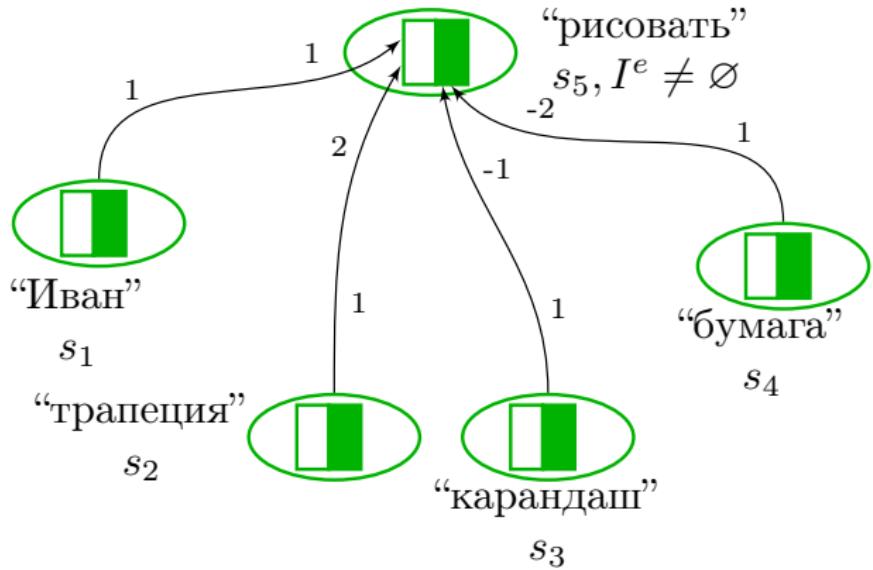
# Каузальная сеть на образах: пример



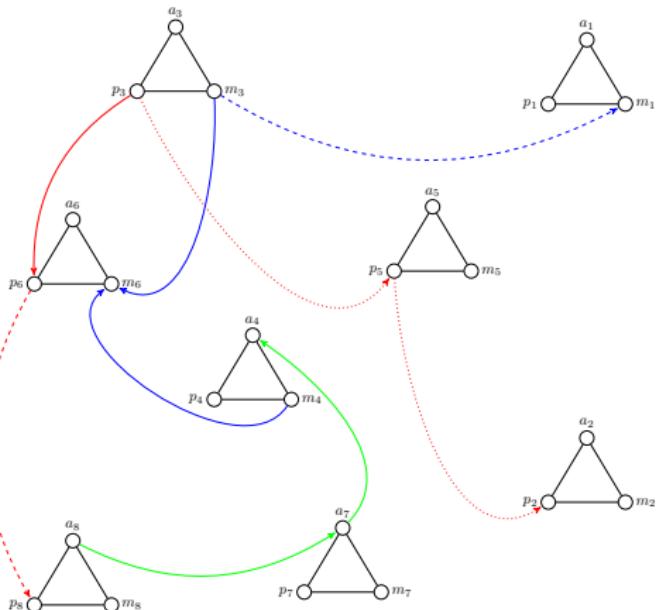
# Каузальная сеть на значениях: пример



# Каузальная сеть на личностных смыслах: пример



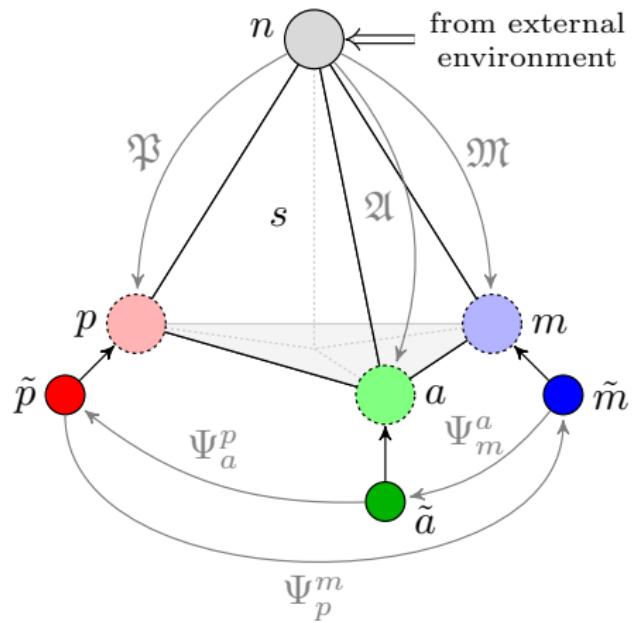
# Картина мира субъекта деятельности



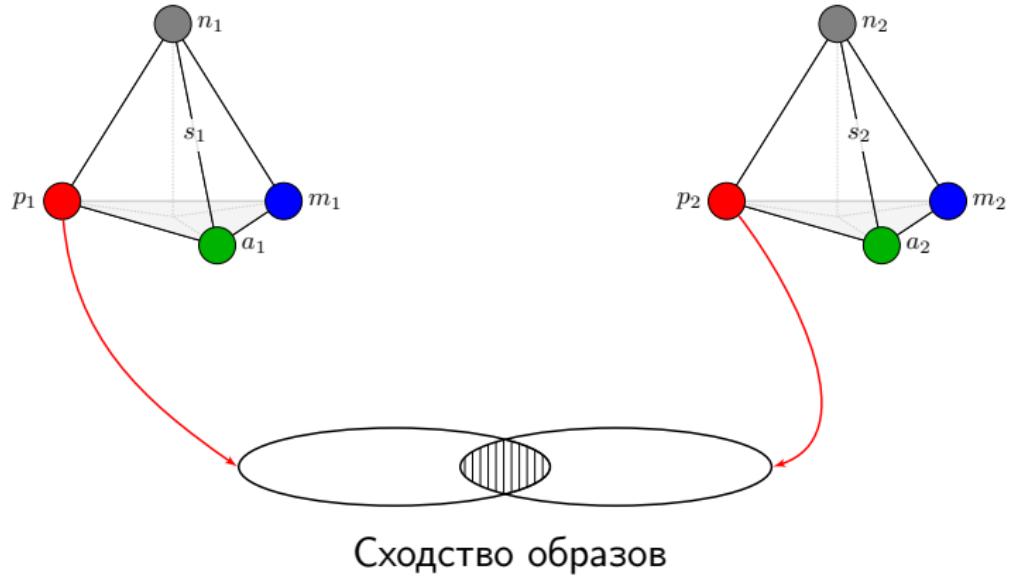
**Семиотическая сеть - пятерка**  
 $\Omega = \langle W_p, W_m, W_a, R_n, \Theta \rangle$ , где

- $W_p, W_m, W_a$  - 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.

# Образование нового знака

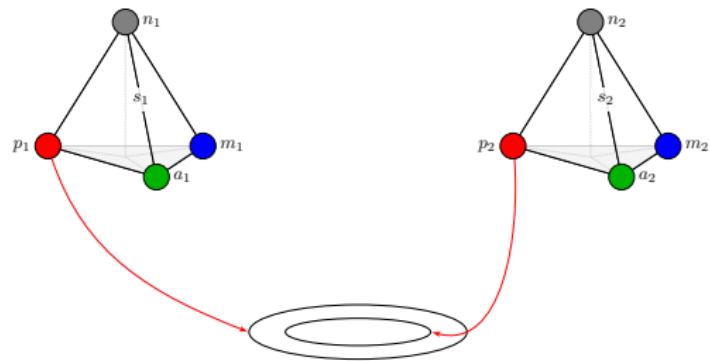


# Отношения на множестве компонент знака

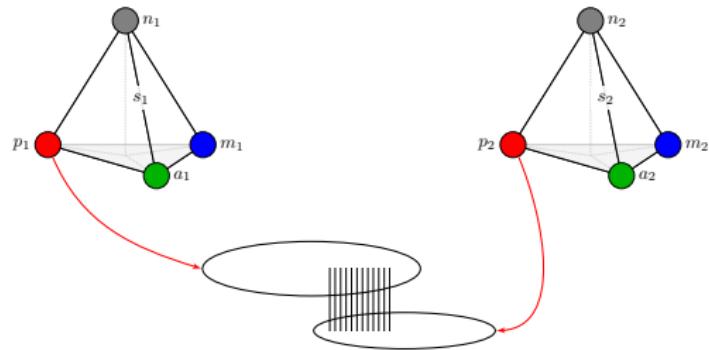


# Отношения на множестве компонент знака

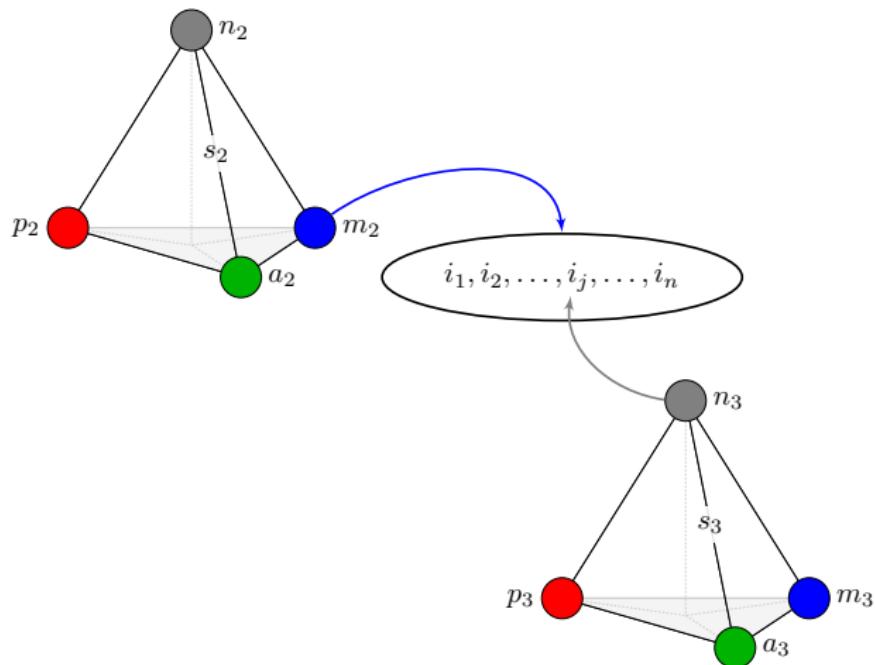
Включение образов



Противопоставление  
образов



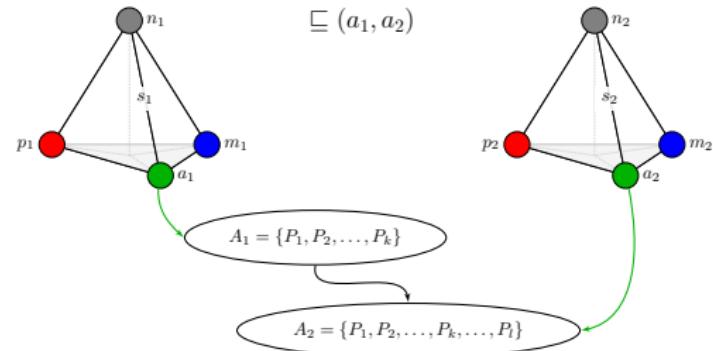
# Отношения на множестве компонент знака



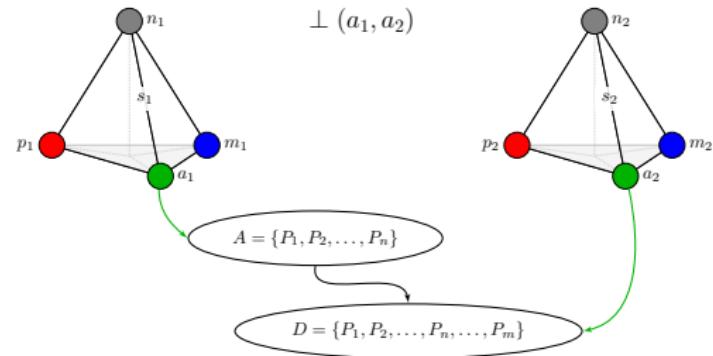
Сценарий на значениях

# Отношения на множестве компонент знака

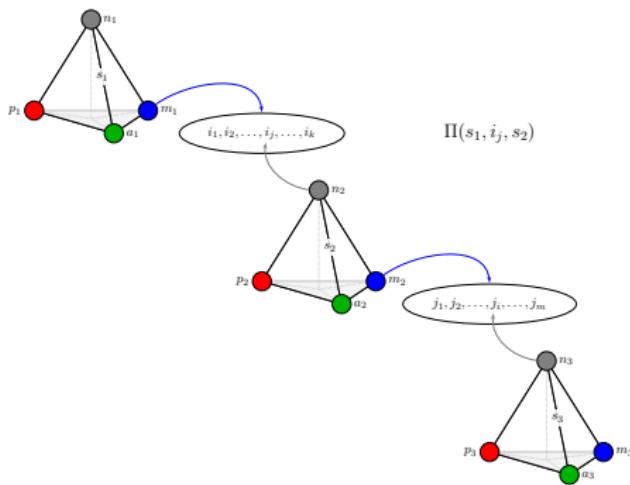
**Поглощение  
личностных смыслов**



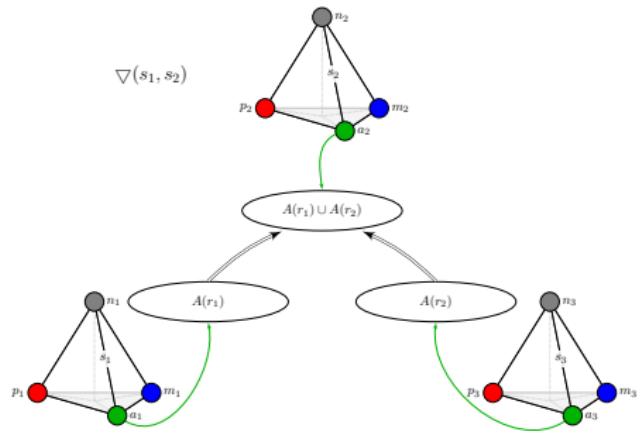
**Противопоставление  
личностных смыслов**



# Операции на множестве компонент знака



$$\Pi(s_1, i_j, s_2)$$

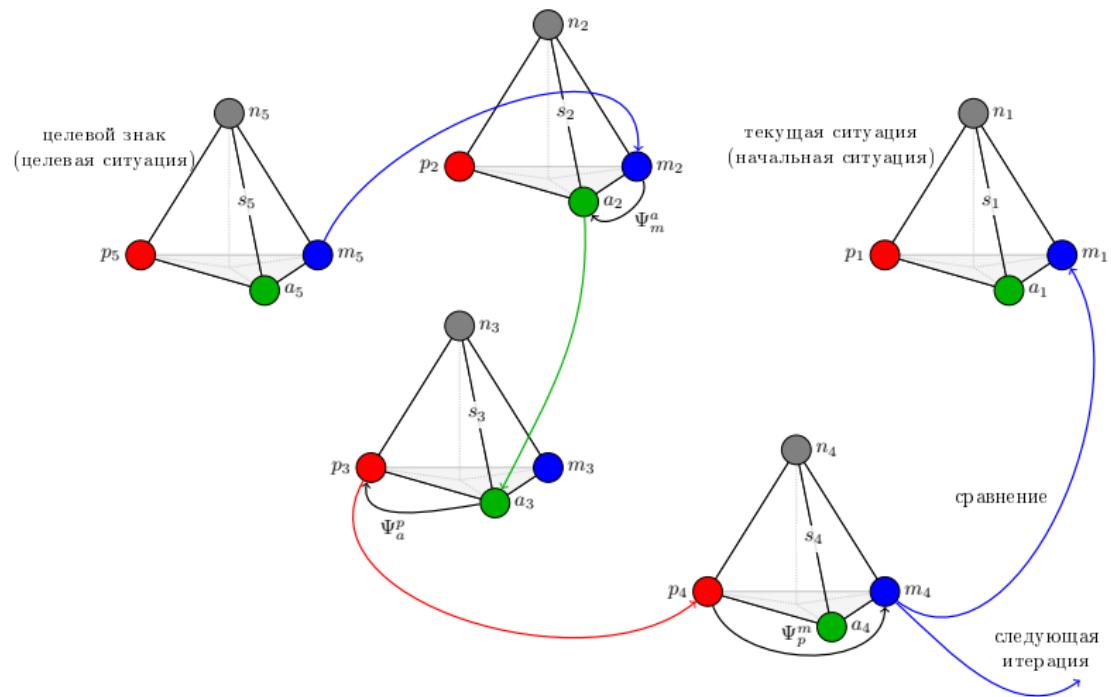


$$\nabla(s_1, s_2)$$

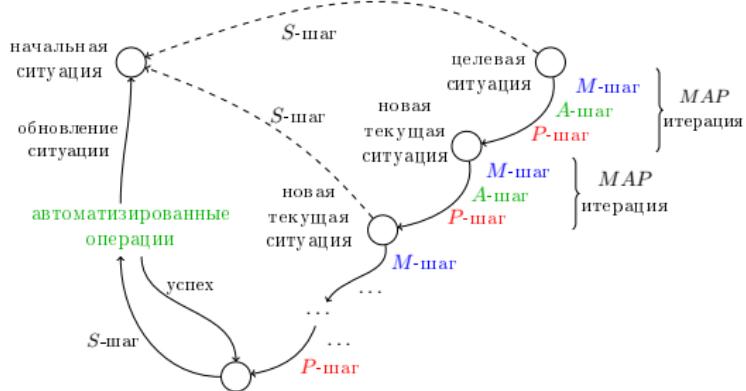
Замыкание по значениям

Агглютинация личностных  
смыслов

# Модель функции планирование поведения



# Алгоритм планирования поведения

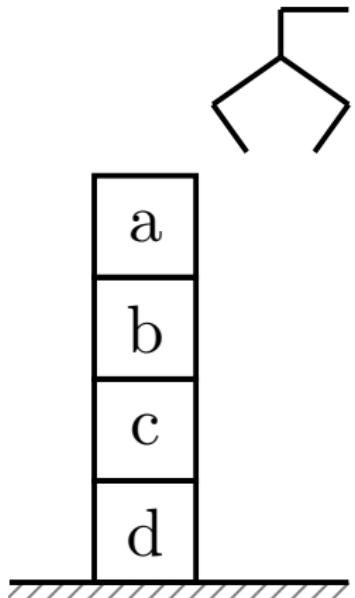
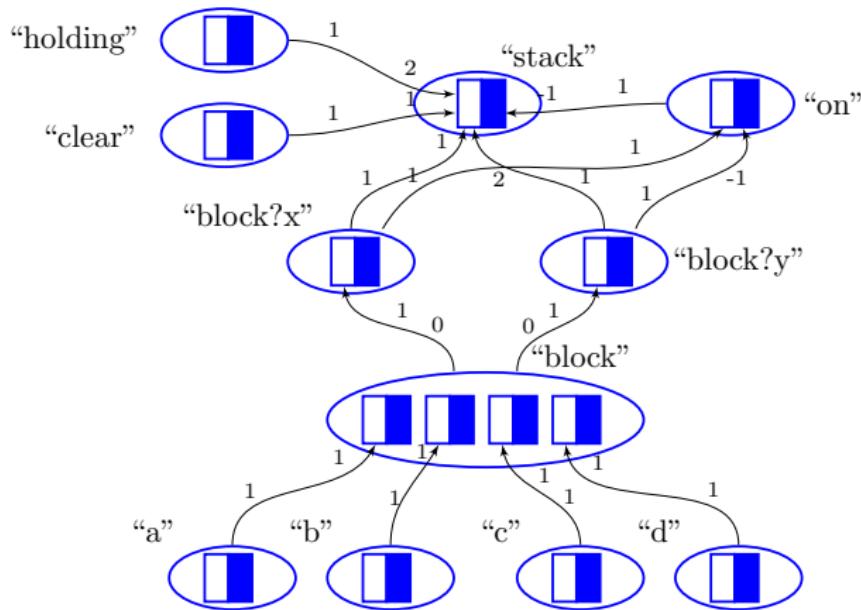


Иерархический процесс планирования начинается с конченой ситуации и стремится достичь начальной ситуации.

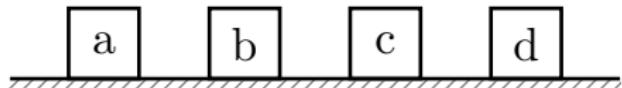
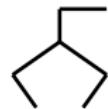
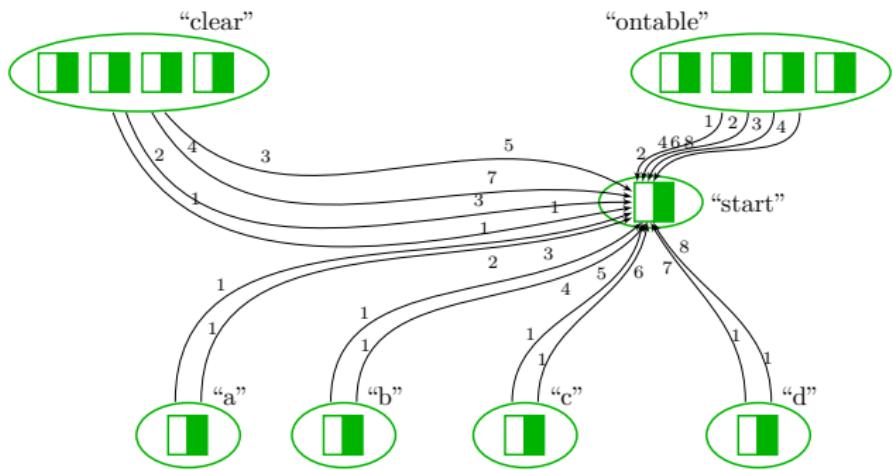
## MAP-итерация:

- *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.

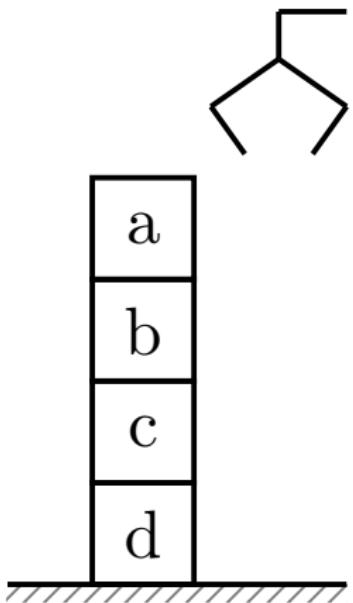
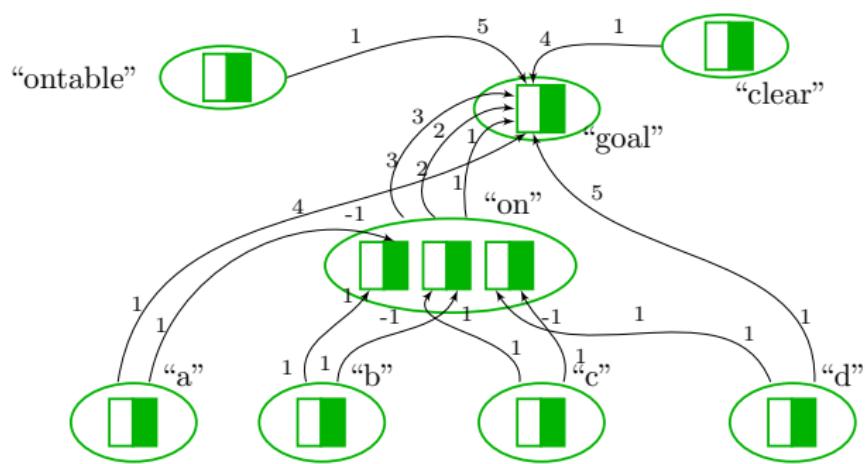
# Пример: фрагмент сети на значениях



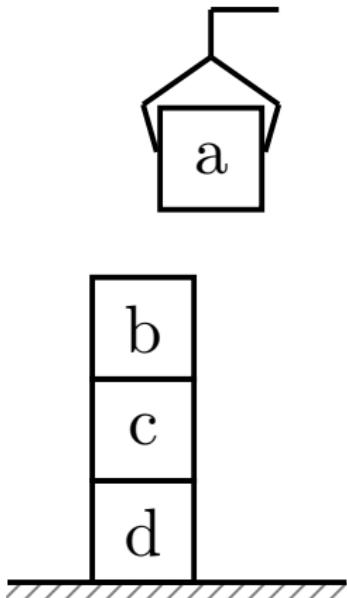
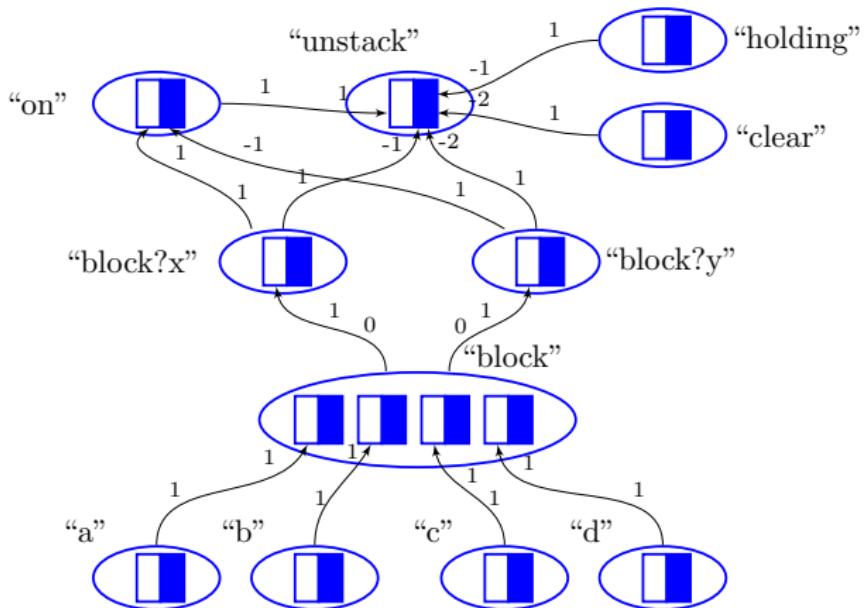
# Пример: сеть на смыслах - начальная ситуация



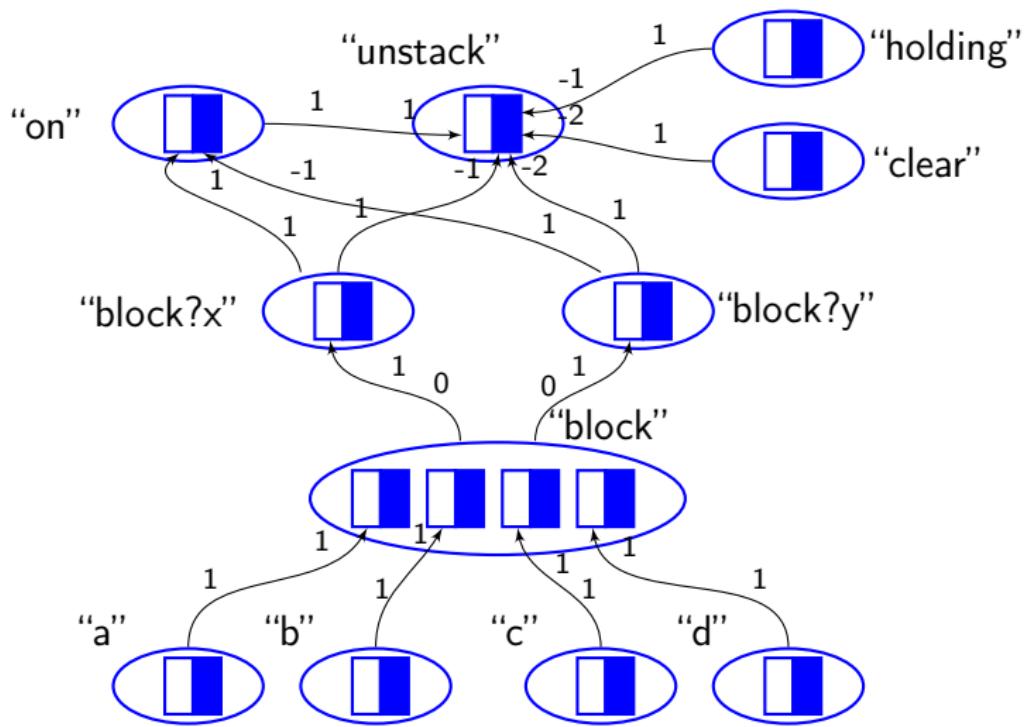
# Пример: сеть на смыслах - целевая ситуация



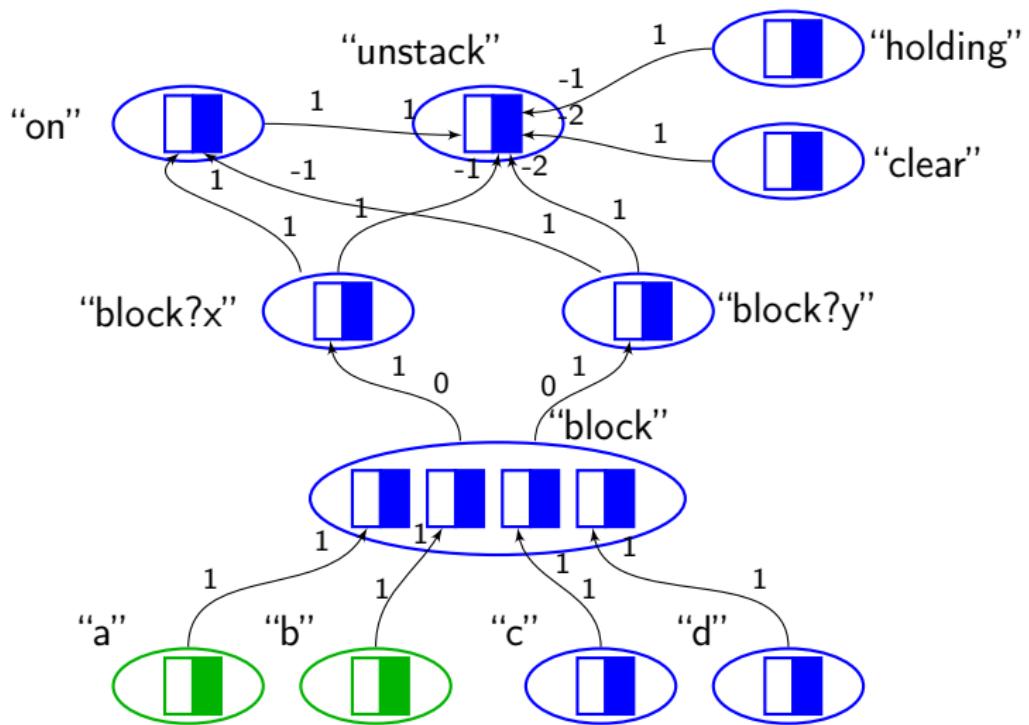
# Пример: фрагмент сети на значениях



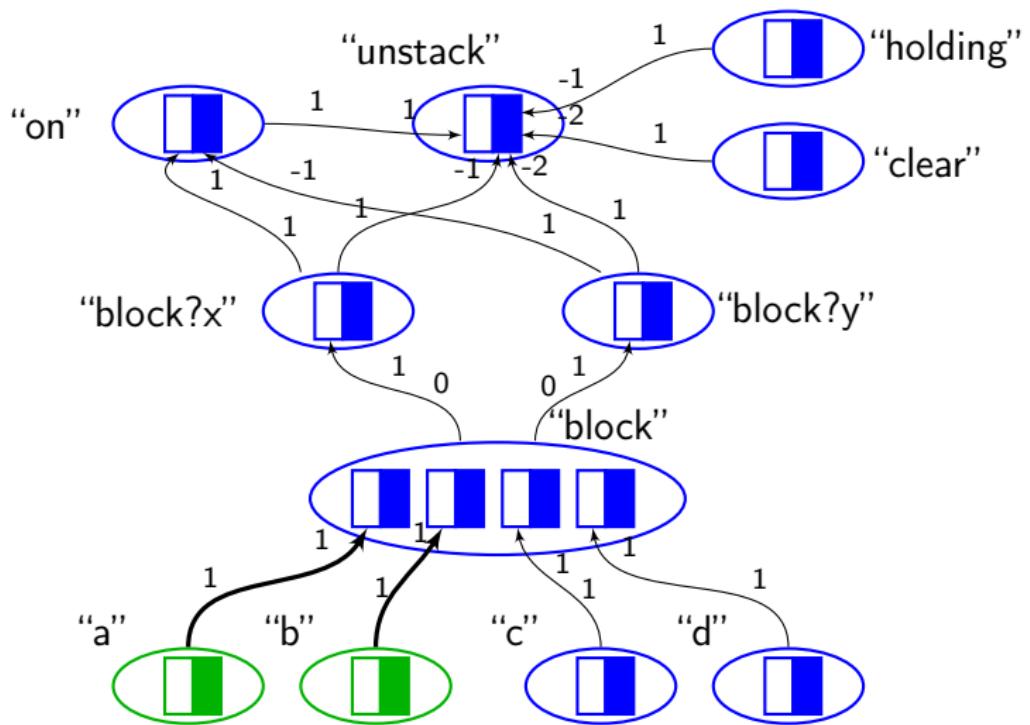
# Пример: генерация личностного смысла



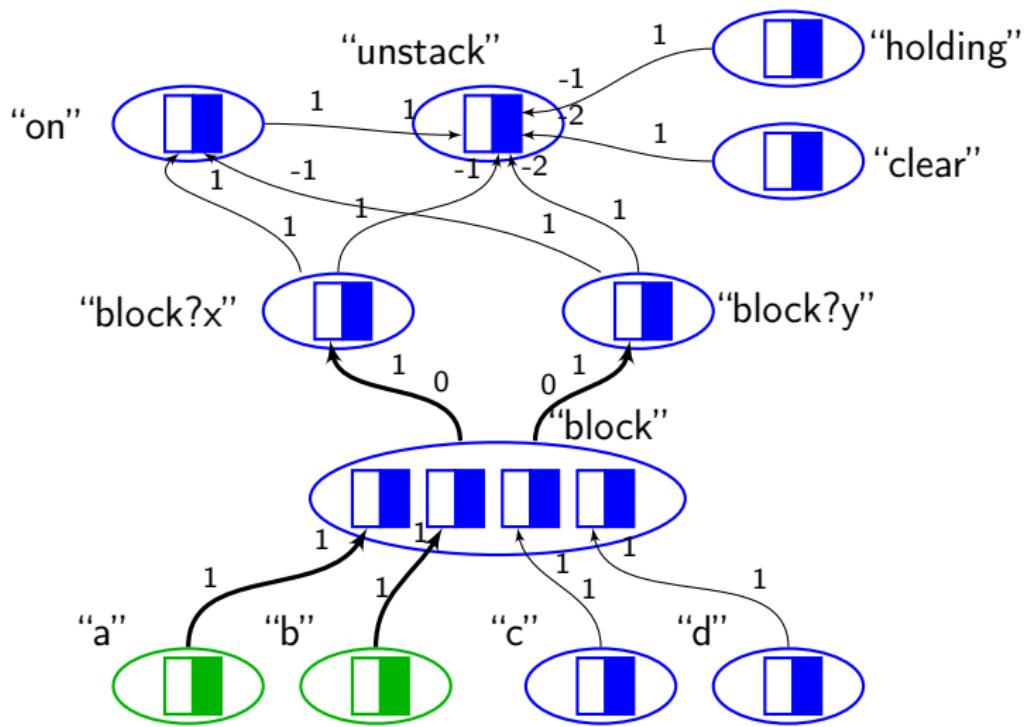
# Пример: генерация личностного смысла



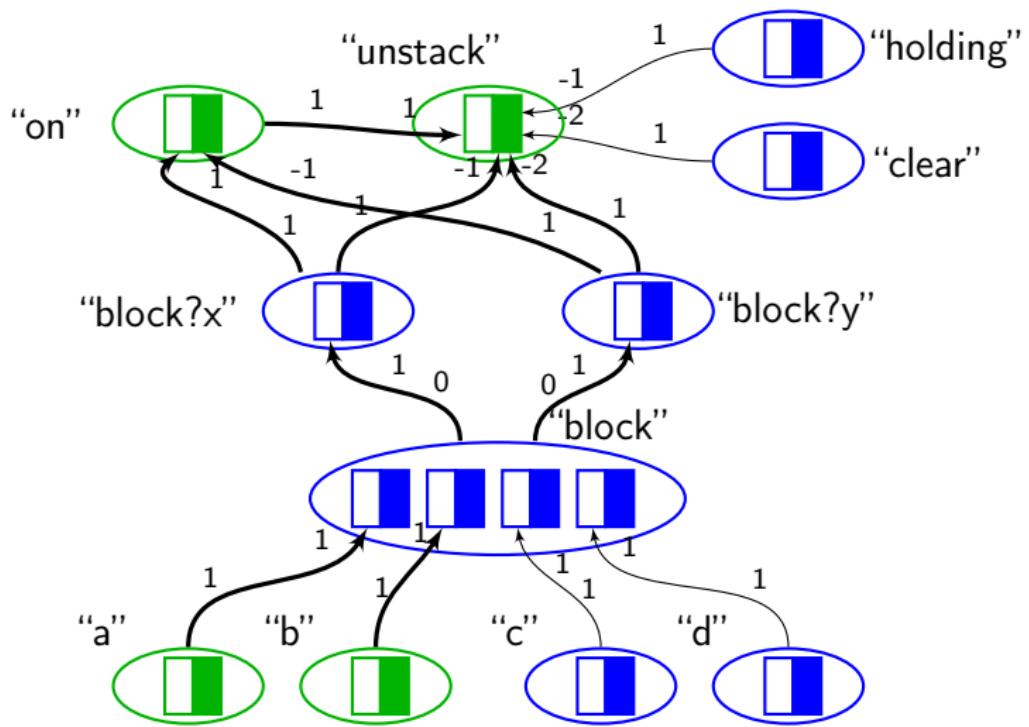
# Пример: генерация личностного смысла



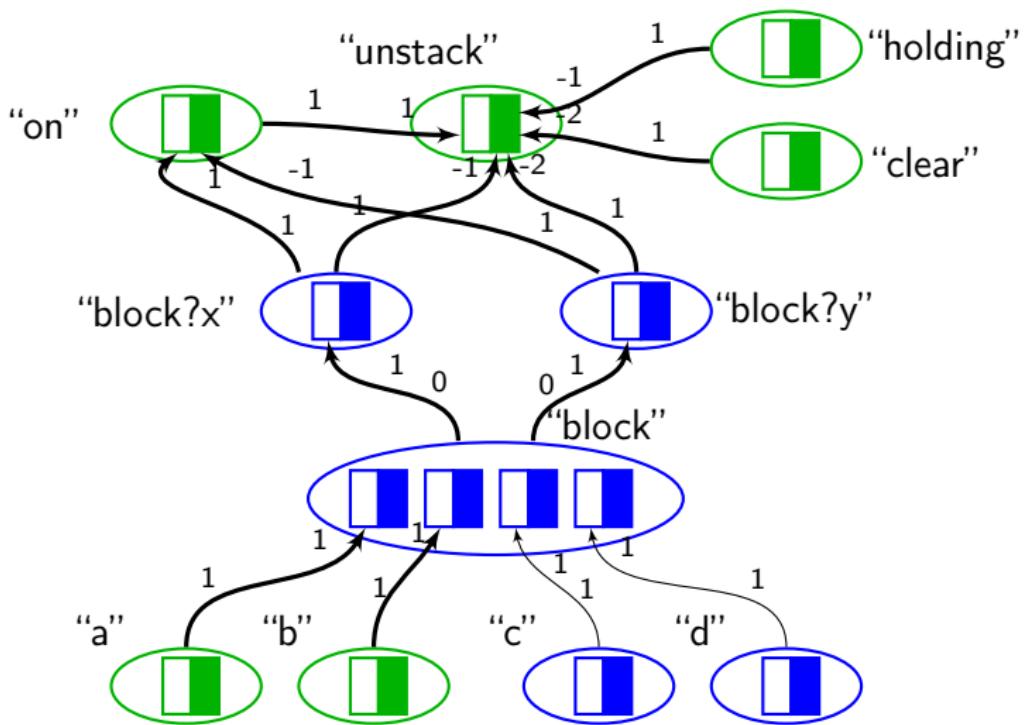
# Пример: генерация личностного смысла



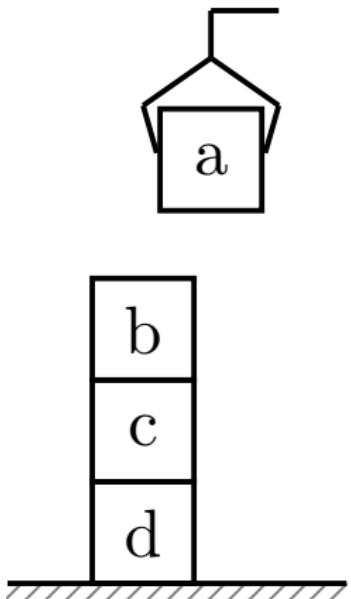
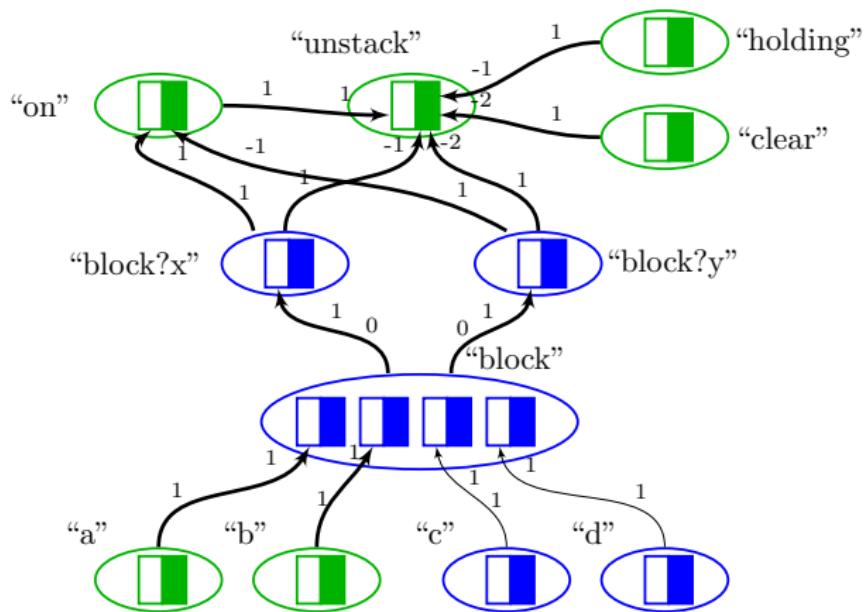
# Пример: генерация личностного смысла



# Пример: генерация личностного смысла

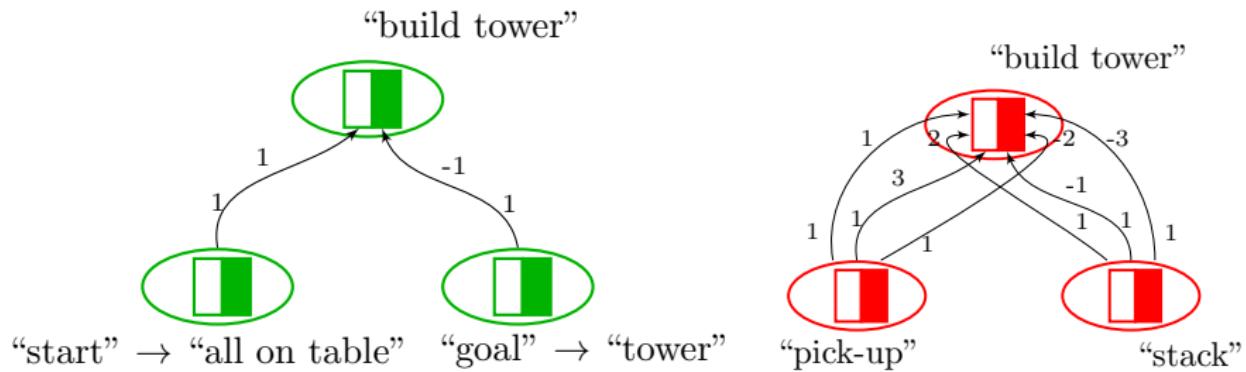


# Пример: текущая ситуация

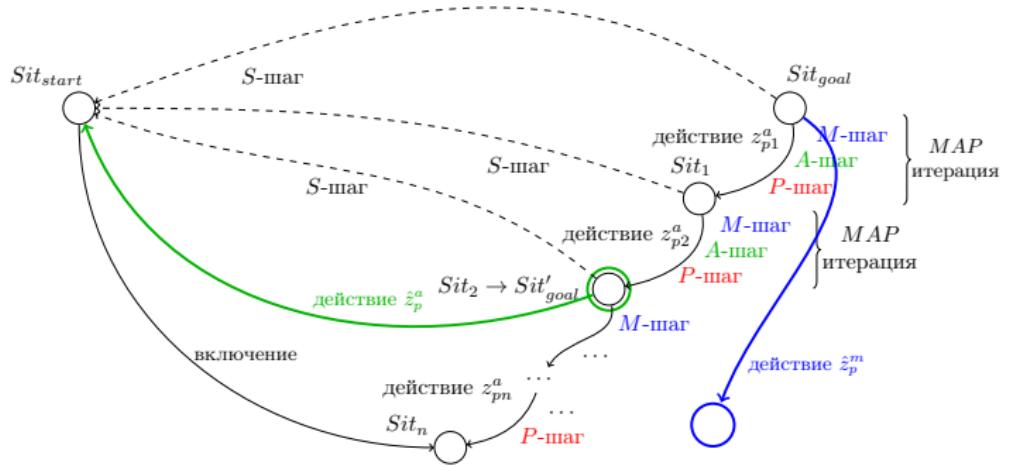


# Обучение в процессе планирования

Образование нового правила и сохранение ситуаций - образование новых каузальных матриц



# Этап целеполагания



## Особенности постановки задачи

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

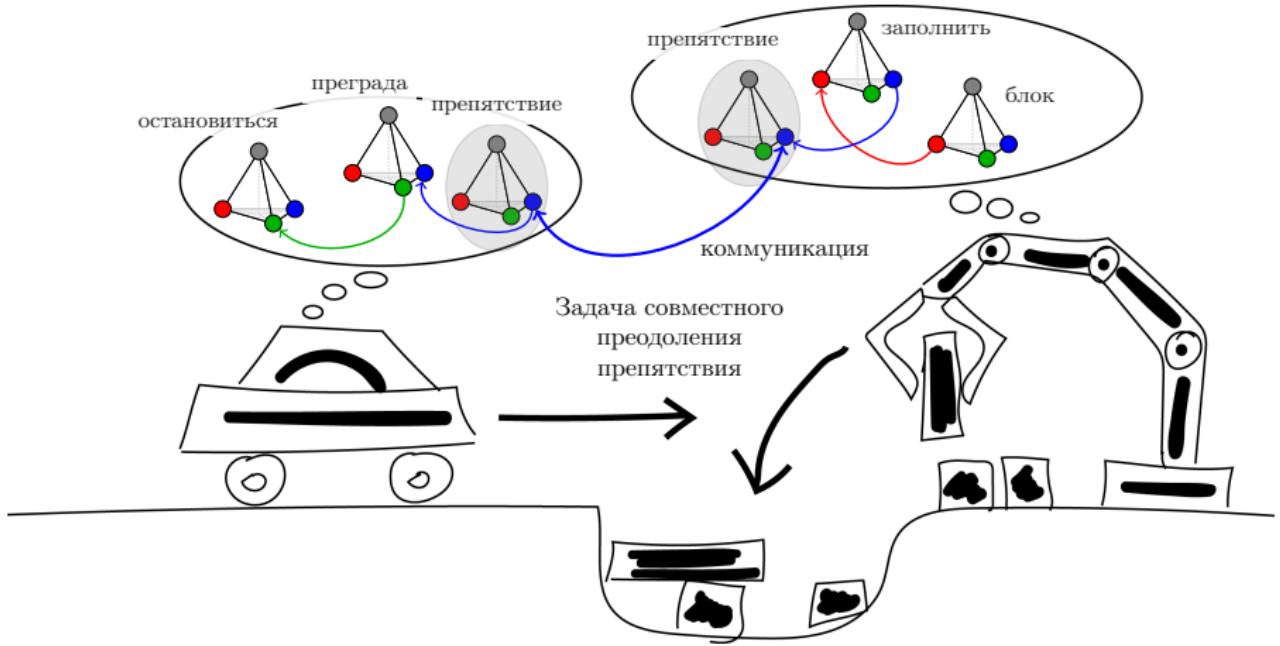
- агенты решают общую задачу (имеют общую цель высшего уровня),
- агенты действуют независимо друг от друга (децентрализованное управление), в т.ч. могут ставить индивидуальные подцели и достигать их,
- агенты обладают различными характеристиками, как техническими, так и когнитивными, т.е. разными стратегиями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

# Требования к представлению знаний

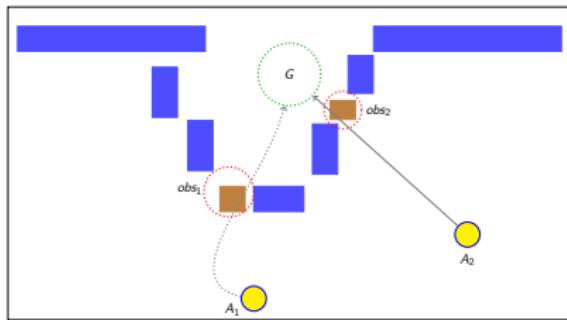
На представление пространственных и временных знаний в задаче согласованного перемещения с такими особенностями налагается ряд ограничений:

- 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).

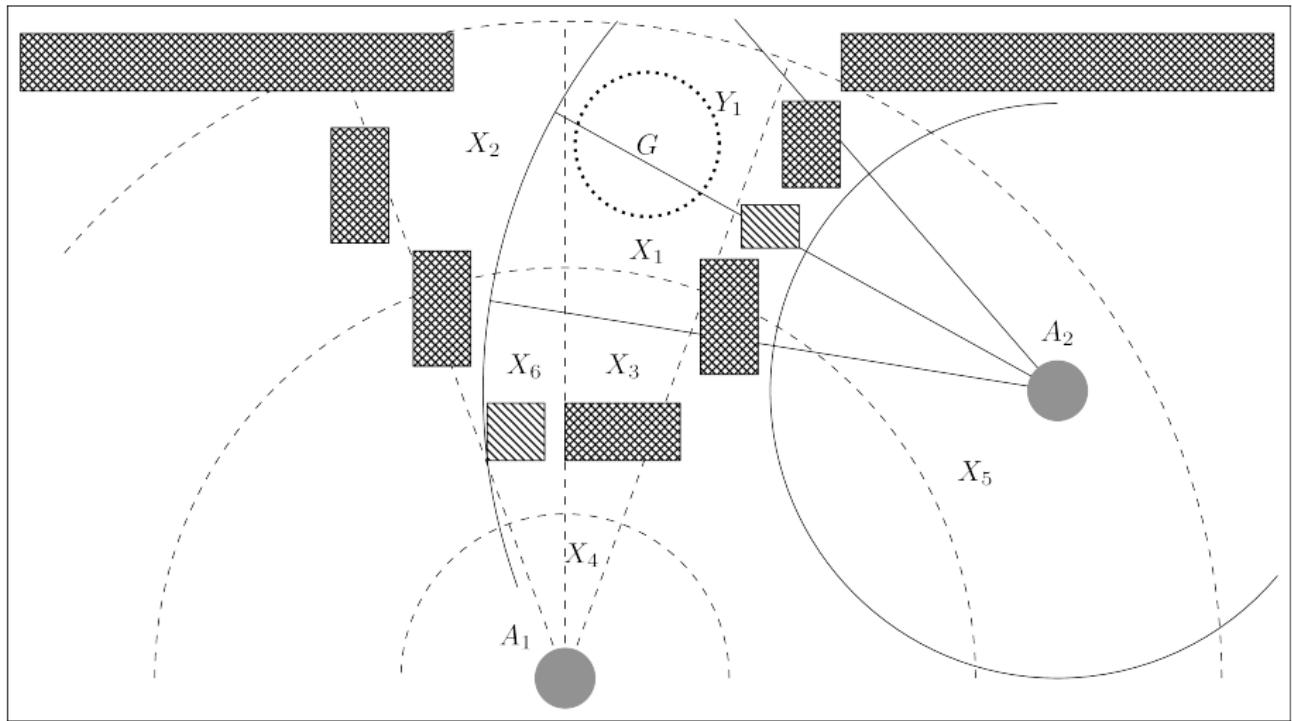
## Решение

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

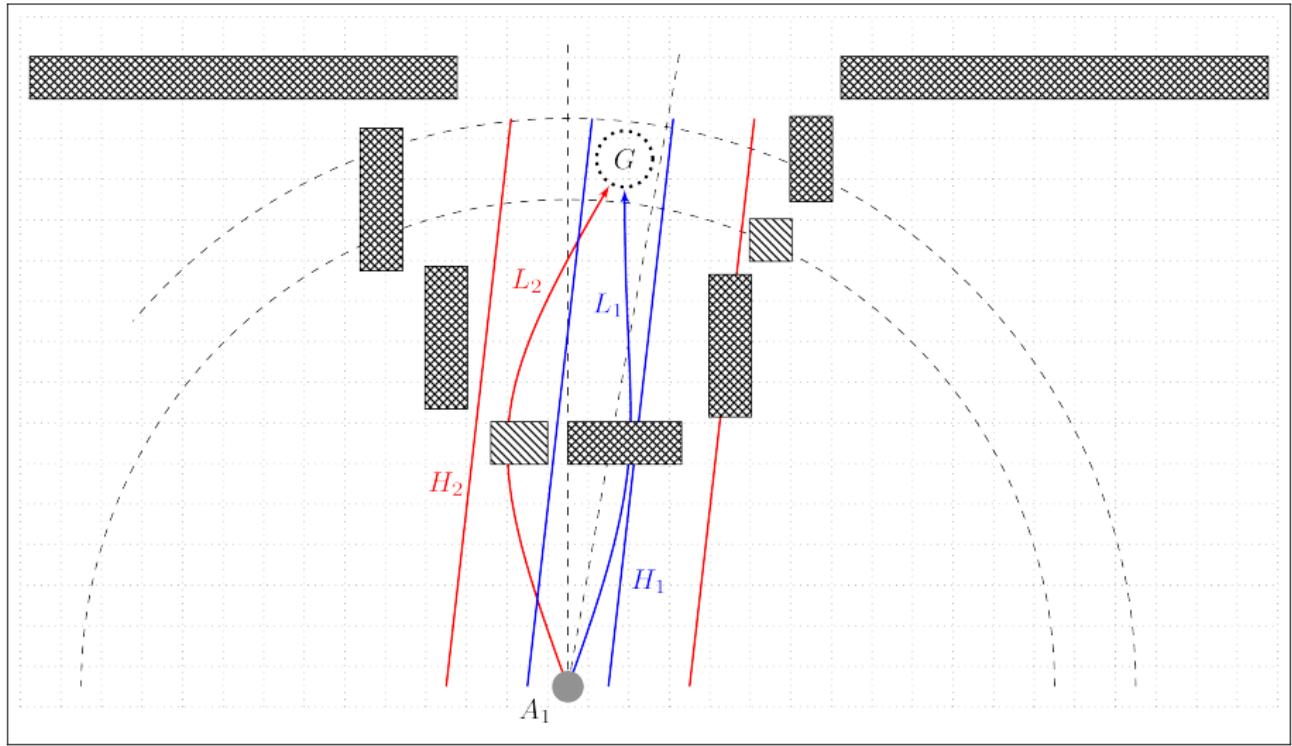
## Особенности:

- 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



# Представление пространственных знаний



## 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

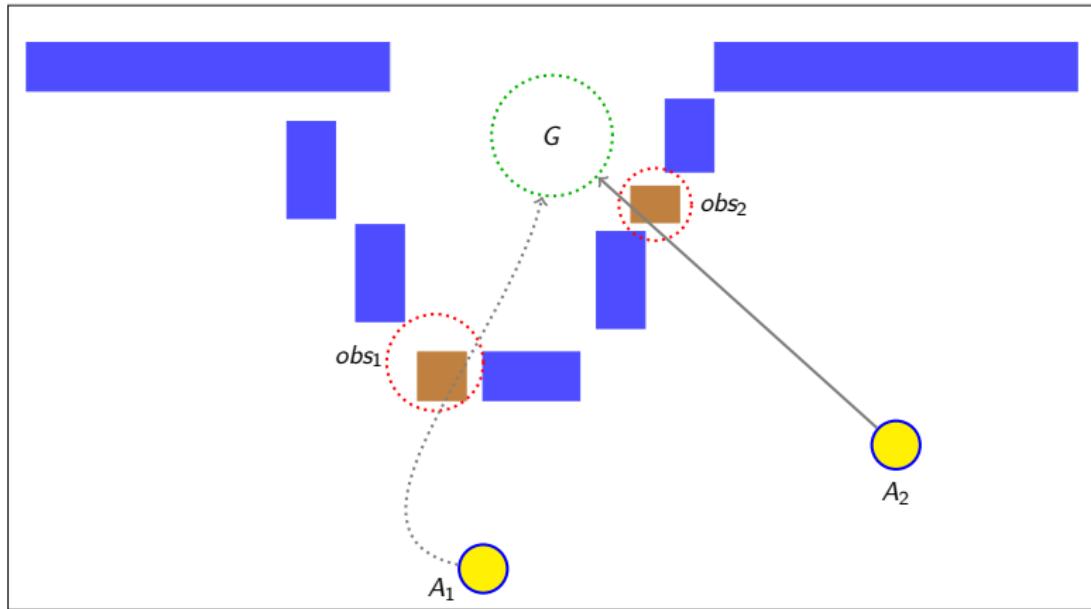
$$z_1 = (I_x, I), z_2 = (I_y, d_u, E), z_3 = (I_y, I, t_v),$$

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.

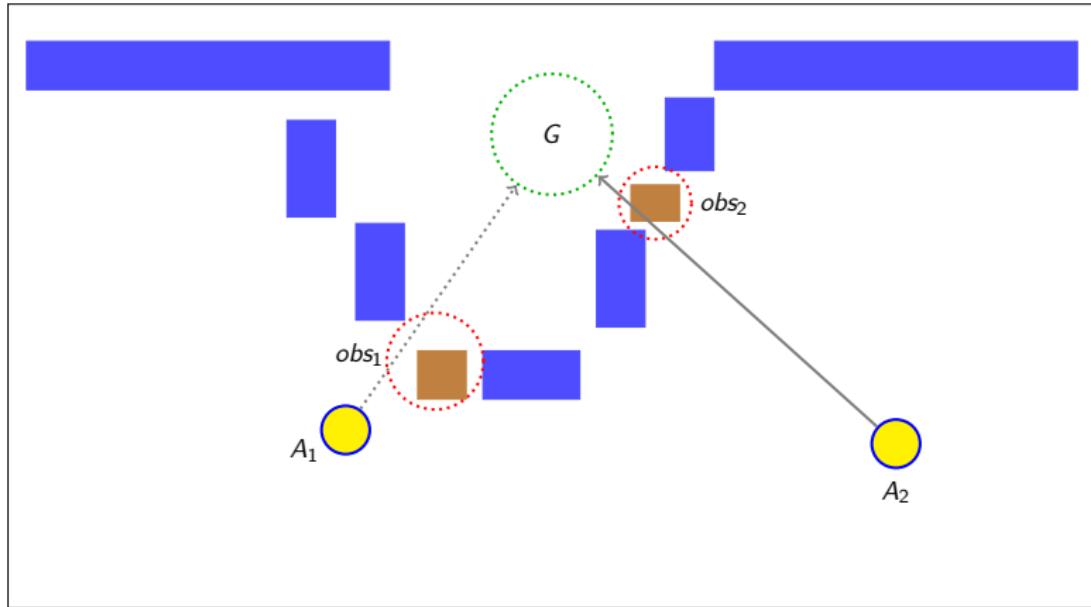
# Распределение ролей при решении задачи

## Пример по перемещению



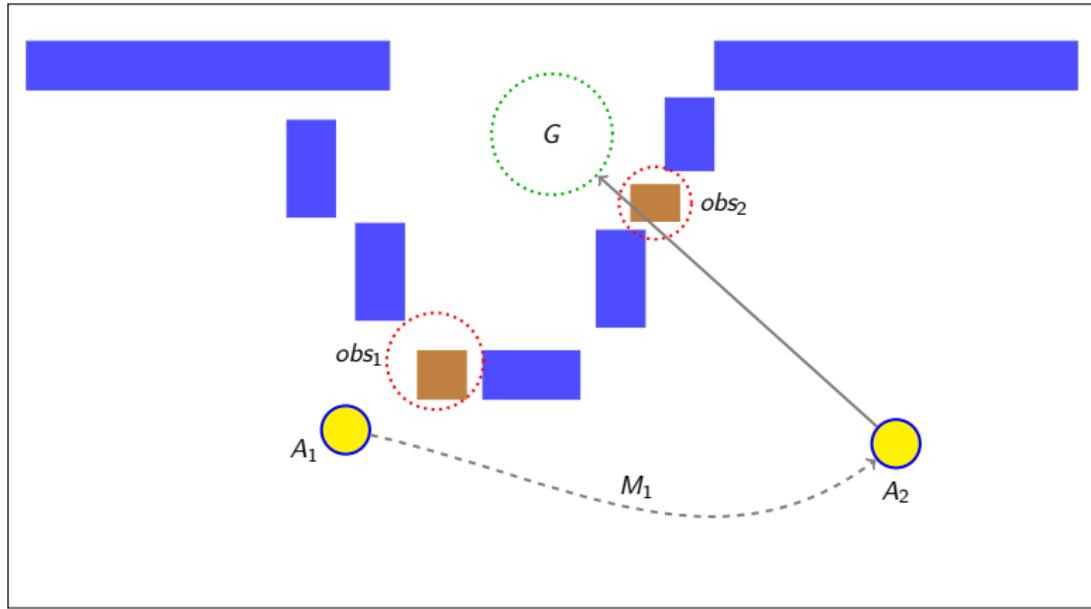
Актуализированные знаки агента  $A_1$ : “область  $X_6$ ”, “далеко”,  
“перемещение 1” → **операции планирования траектории.**

## Пример по перемещению



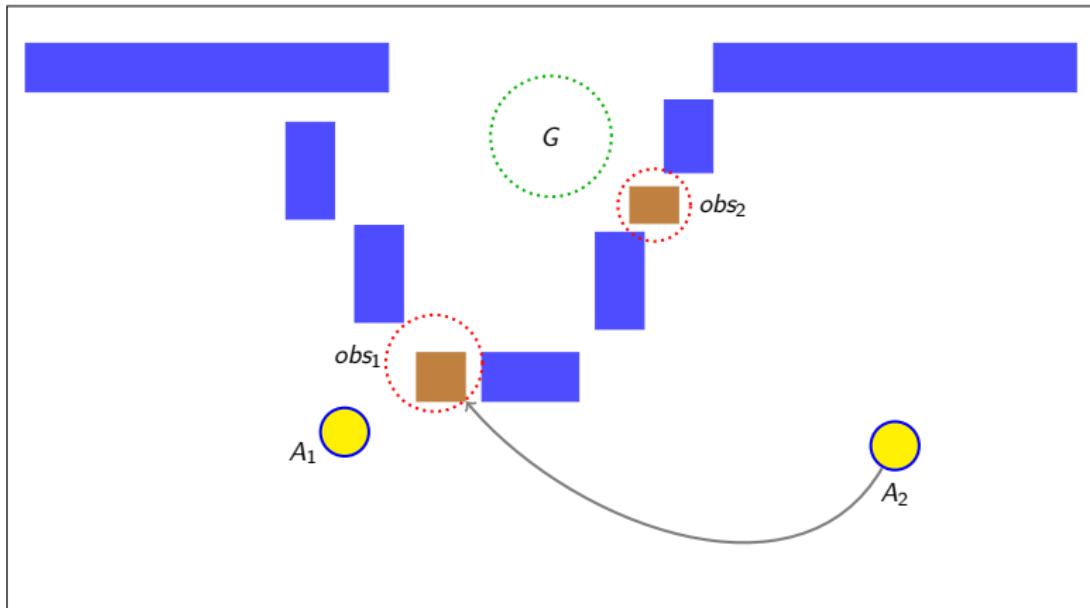
Актуализированные знаки агента  $A_1$ : “препятствие 1”, “рядом”, “область  $X_6$ ”.

## Пример по перемещению



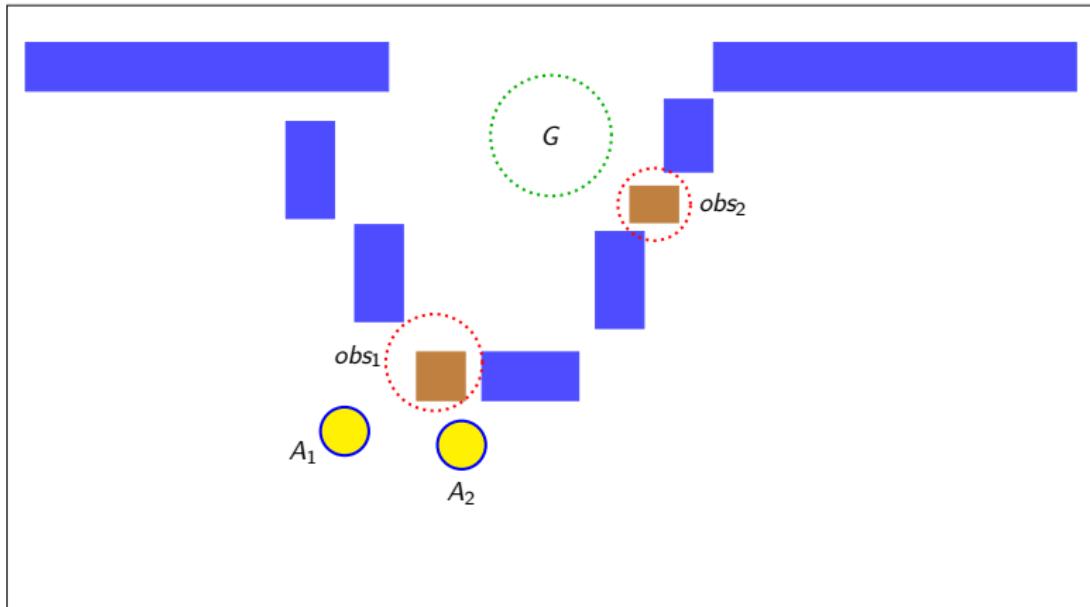
Актуализированные знаки агента  $A_1$ : “отправить сообщение”, “агент  $A_2$ ”.

## Пример по перемещению



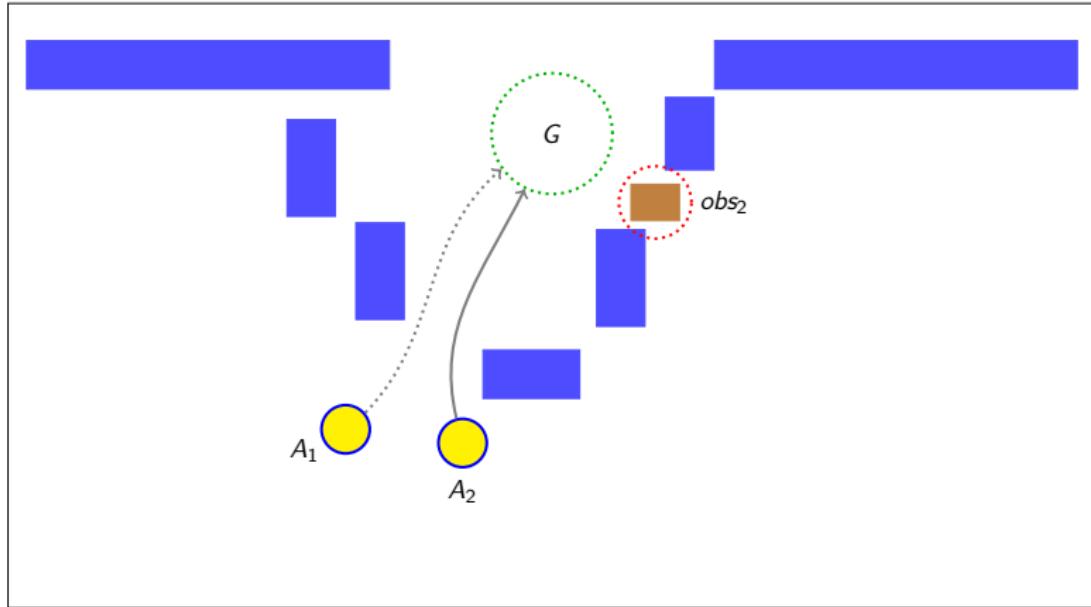
Актуализированные знаки агента  $A_2$ : “область  $Y_3$ ”, “далеко”,  
“перемещение 2” → **операции планирования траектории.**

## Пример по перемещению



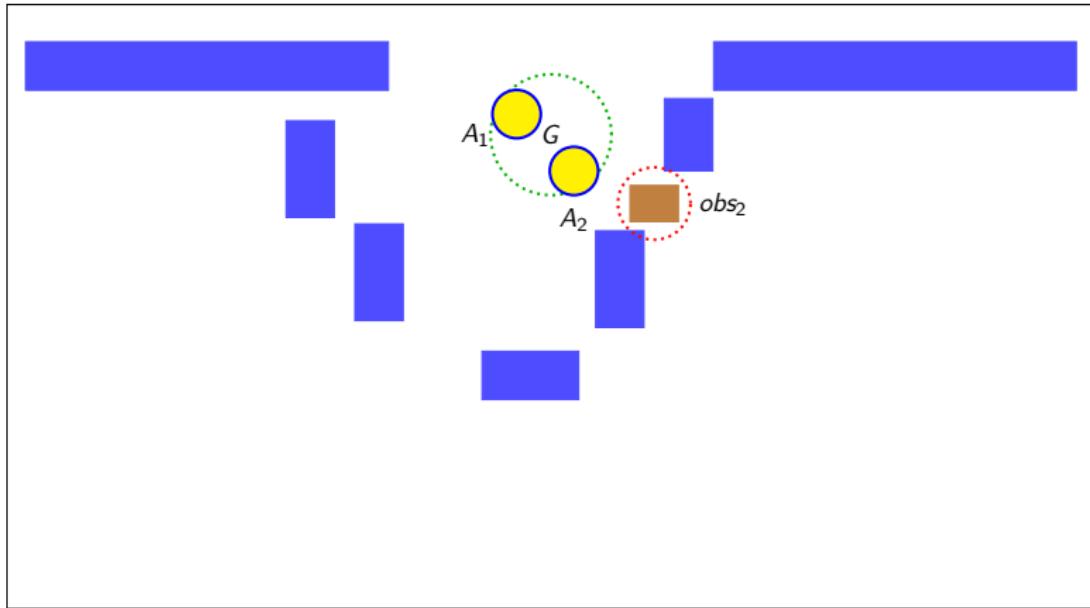
Актуализированные знаки агента  $A_2$ : “область  $Y_1$ ”, “рядом”,  
“препятствие 1”, “разрушить”.

## Пример по перемещению



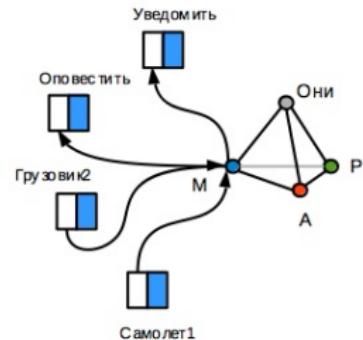
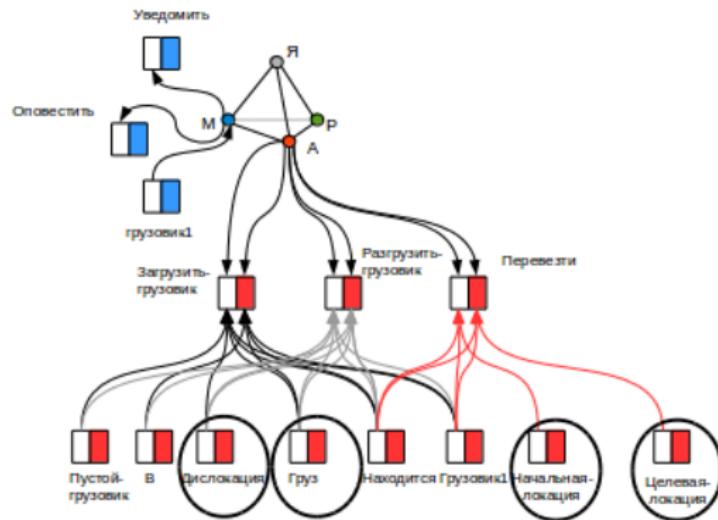
Актуализированные знаки агента  $A_1$  and  $A_2$ : “далеко”, “перемещение 3”  
→ операции планирования траектории.

## Пример по перемещению



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

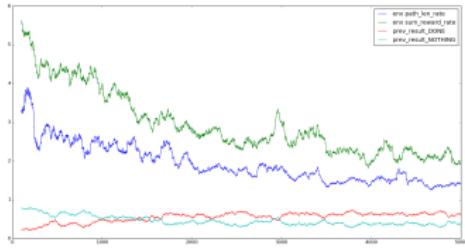
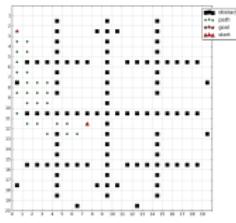
# Знаки Я и Они в алгоритме планирования МАР



# Эксперименты по обучению с подкреплением

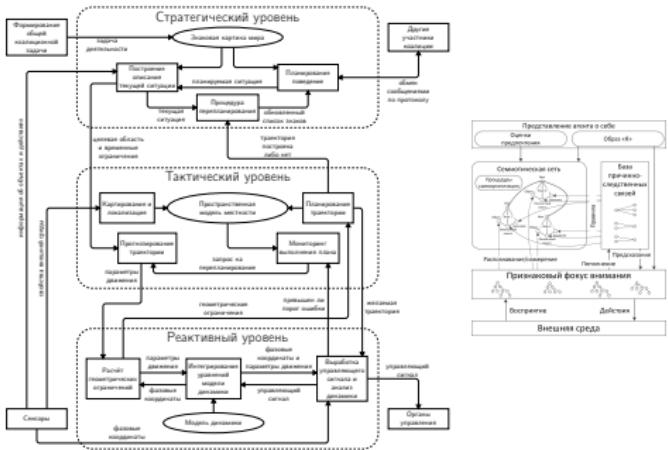


- Начальное и конечное положения агента фиксированы. Между агентом и конечным положением расположена преграда.
- За каждое действие агент получает награду, если он идет кратчайшим путем к конечному положению, то он получит большую награду.
- HCN на простой карте:  $\sim 700$  итераций (1 клетка в колонке),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



# 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.



# Направления исследований и будущие работы

- Совершенствование НТМ-подобного алгоритма обучения.
- Разработка иерархических методов обучения с подкреплением и интеграция их в алгоритмы семейства MAP.
- Добавление этапа выбора эвристики при планирования поведения (reflectiveMAP).
- Исследование мотивационно-потребностного аспекта личного смысла для более тонкого регулирования поведения.
- Подробная разработка алгоритмов коммуникации и согласования знаний.

# Список публикаций

# Спасибо за внимание!

apanov@hse.ru

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