



Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

# Кафедра «Системы обработки информации и управления» ИУ-5

## Методы анализа данных

Гапанюк Юрий Евгеньевич, к.т.н., доцент кафедры ИУ-5

Весенний семестр 2020 года

# ЛЕКЦИЯ №1

## Введение в гибридные интеллектуальные информационные системы (ГИИС)

8 апреля 2020 года

# План

1. Разнородность моделей. Отсутствие гибридизации
2. ГИС и ГИИС. Обобщенная структура ГИИС.
3. Частные случаи структуры ГИИС.
4. Реализация ГИИС на основе холонической МАС.
5. Метаграф как разновидность сложной сети с эмерджентностью.

# Разнородность моделей. Отсутствие гибридизации

- В классической Computer Science используются разнородные модели данных, знаний и процессов. Эта ситуация сложилась исторически, потому что раньше мощность вычислительных систем была невысока и во главу угла ставилась производительность обработки данных. Вопросы интеграции информационных систем и унификации информационных моделей оставались на втором плане.
- В настоящее время ситуация изменилась. Появление и активное развитие технологий обработки больших данных, расширение круга информационно-аналитических задач привело к тому, что в качестве обрабатываемых данных вполне могут выступать знания, ситуации, процессы. Это требует новых подходов к интеграции информационных систем, новых моделей данных.

# Разнородность моделей. Отсутствие гибридизации

- Сервис-ориентированный подход (в том числе в его современном микросервисном варианте) до определенной степени решает задачу интеграции информационных систем, но при этом каждая система функционирует как черный ящик. Интеграция возможна только на уровне элементов, которые вынесены в интерфейс сервиса.
- Для объединения (оркестровки) сервисов используется технология workflow.
- Доработка SOA-системы состоит в доработке отдельных сервисов и в улучшении их оркестровки. Как правило, отдельные сервисы разрабатываются отдельными командами. То что сервисы могут использовать подобные или одинаковые алгоритмы никак не учитывается.
- Методы искусственного интеллекта рассматриваются как отдельное «нишевое» решение, которое может использоваться внутри отдельного сервиса. Например, использование ИНС для решения задачи распознавания.

# ГИС и ГИИС

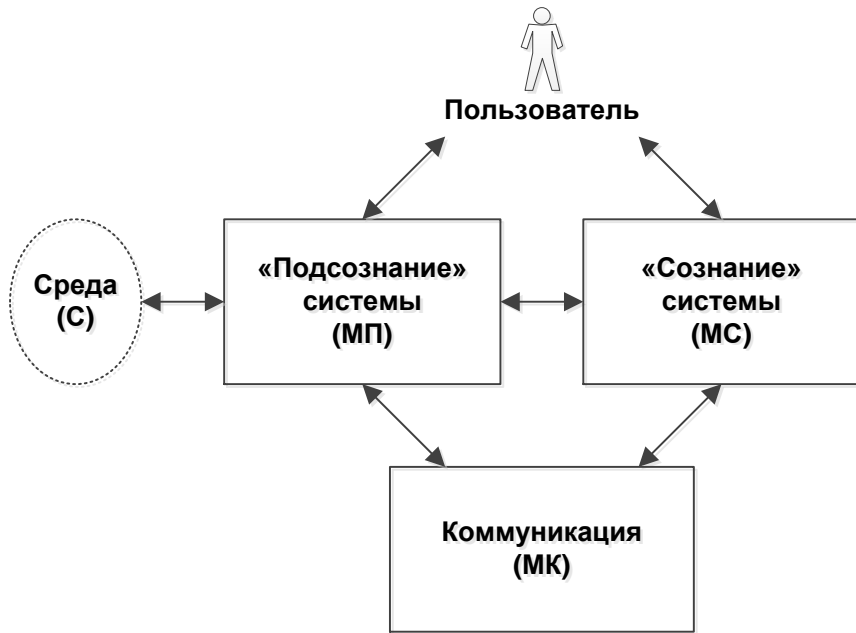
- В настоящее время можно отметить явную тенденцию к совместному использованию различных интеллектуальных методов для решения различных классов задач. Это привело к появлению такого направления как **«гибридные интеллектуальные системы» (ГИС)**. Основополагающими работами в области ГИС можно считать работы Александра Васильевича Колесникова.
- В настоящее время интеллектуальные системы, как правило, не разрабатываются отдельно, но встраиваются в виде модулей в традиционные информационные системы для решения задач, связанных с интеллектуальной обработкой данных и знаний. Такую комбинированную систему назовем **гибридной интеллектуальной информационной системой (ГИИС)**.
- ГИИС обладает следующими особенностями:
  - сочетает различные методы, используемые для построения интеллектуальных систем, и в этом смысле является ГИС;
  - сочетает интеллектуальные методы с традиционными методами, используемыми для разработки данных в информационных системах, и в этом смысле является комбинацией ГИС и информационной системы, предназначенной для обработки данных.



# Принцип гибридности

- Ключевым вопросом является вопрос о реализации принципа гибридности.
- В работах Надежды Глебовны Ярушкиной сформулирован следующий принцип гибридности: «В литературе встречаются схемы гибридизации нейроинформатики и ИИ, построенные по следующему принципу: **правое полушарие – нейрокомпьютер; левое полушарие – основанная на знаниях система**, а вопрос лишь в их взаимодействии или балансе право- и лево-полушарности. **В реальном поведении человека невозможно разделить восприятие и логическую обработку, поэтому более успешной представляется схема глубинной интеграции**».
- Таким образом, ГИИС должна сочетать элементы системы, построенной на основе мягких вычислений, и системы построенной на обработке данных и знаний.
- Метафора право- и лево-полушарности возможно не совсем точна, скорее стоит говорить о «подсознании» и «сознании» гибридной ИС. «Подсознание» строится на основе мягких вычислений, а «сознание» на основе логической обработки данных и знаний.

# Обобщенная структура ГИИС



- Основой системы являются «подсознание» системы (модуль подсознания, МП) и «сознание» системы (модуль сознания, МС). «Подсознание» связано со средой, в которой функционирует ГИИС.
- Основной задачей МП является обеспечение взаимодействия ГИИС со «средой», или «выживание» ГИИС в среде.
- Поскольку среда может быть представлена в виде набора непрерывных сигналов, то в качестве методов обработки данных «подсознания» хорошо подходят методы, основанные на нейронных сетях и нечеткой логике, в том числе и комбинированные нейронечеткие методы.
- Модель данных «подсознания» максимально приближена к «понятийной системе» среды, представляет собой набор данных, который позволяет максимально эффективно взаимодействовать со средой. Часть этих данных может не иметь «физического смысла» с точки зрения МС, однако позволяет МП взаимодействовать со средой с нужной производительностью.



# «Сознание» ГИИС - обработка

- «Сознание» ГИИС строится на принципах обработки данных и знаний. Обработка данных в МС может вестись на основе традиционных языков программирования или технологии workflow. Однако, в последнее время, все большую популярность приобретает подход на основе продукционных правил (rule-based programming).
- В настоящее время появляются гибридные продукты, в частности система Drools, которая позволяет проводить обработку как с использованием workflow-подхода, так и с использованием rule-based-подхода.
- Отметим, что в зависимости от особенностей предметной области правила могут быть нечеткими или вероятностными, что вносит в МС элементы МП. Это одно из проявлений принципа холоничности.
- К достоинствам подхода на основе правил можно отнести гибкость, так как в этом случае программа не кодируется жестко, а «выводится» из правил на основе данных. К недостаткам можно отнести возможность зацикливания правил, а также сложность обработки большого объема правил. В настоящее время для обработки большого объема правил используется алгоритм RETE (разработанный Ч. Форджи) и его модификации.

# «Сознание» ГИИС – модель данных

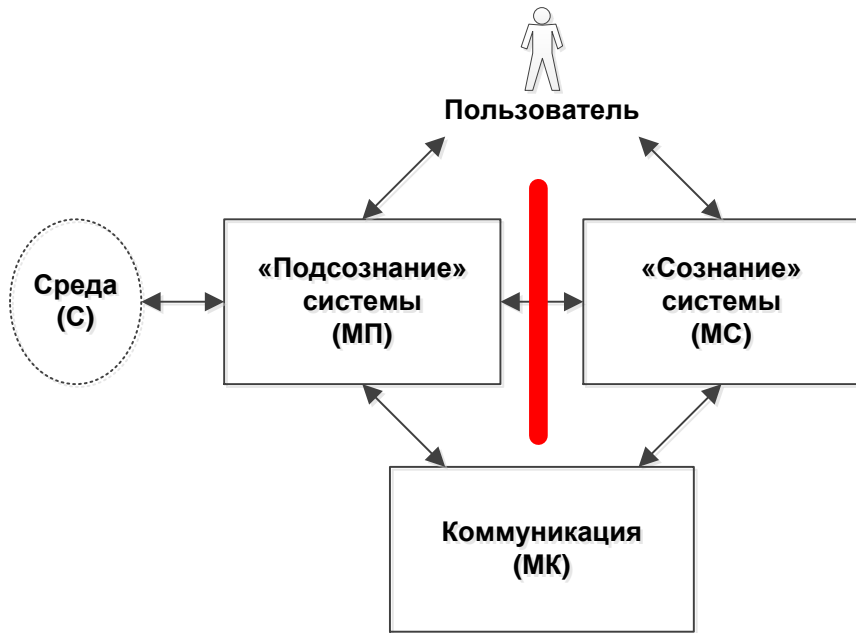
- В качестве модели данных МС используются модели «онтологического» класса. Это могут быть классические онтологии, разработанные в рамках технологии Semantic Web (стандарты RDF, RDFa, OWL, OWL2).
- Также к моделям этого класса можно отнести (возможно, с некоторыми ограничениями) и классическую объектно-ориентированную модель. Классическая модель ООП обладает рядом ограничений по сравнению с онтологиями Semantic Web, но на практике именно она используется для моделирования предметных областей в большинстве современных информационных систем. С использованием средств объектно-реляционного отображения (Object-Relational Mapping, ORM) обеспечивается хранение элементов этой модели в реляционных СУБД.
- Как правило, большинство моделей «онтологического» класса обладает следующими свойствами:
  - явное выделение «абстрактных» понятий (классов) и «конкретных» понятий (объектов, экземпляров);
  - возможность работы как с абстрактными понятиями (например, наследование классов) так и с конкретными понятиями (например, создание объекта класса);
  - возможность работы как с непрерывными типами данных (целые, действительные числа), так и возможность перечисления объектов, относящихся к классу (перечисляемый тип в ООП).

# «Сознание» ГИИС - функции

МС, базируясь на моделях «онтологического» класса, выполняет следующие функции:

- обработка данных и знаний на основе модели данных «онтологического» типа;
- логический контроль и проверка непротиворечивости данных, поступающих от МП;
- реализация функций ввода и вывода для среды (посредством МП), для модуля коммуникации и для взаимодействия с пользователем.
- реализация функции поддержки принятия решений (в этом случае МС выполняет функцию СППР);
- реализация функции планирование действий системы (автоматизированное планирование).

# Граница между сознанием и подсознанием



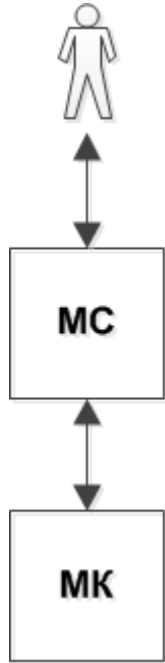
- Границей между сознанием и подсознанием является понятийная система ГИИС («онтология понятий»).
- Модуль сознания воспринимает понятийную систему как целостную модель «онтологического» класса и может «осознанно» обрабатывать элементы данной модели на основе правил.
- Модуль подсознания воспринимает понятийную систему в виде отдельных (возможно несвязанных) признаков. Требования к «осознанию» целостности модели не предъявляется. Основным критерием является эффективность взаимодействия системы со средой.
- Основными функциями подсознания являются:
  - Выделение из среды сигналов, соответствующих различным аспектам понятийной системы, эффективное распознавание элементов понятийной системы на основе сигналов.
  - Запись изменений в понятийной системе в среду в виде сигналов.

# ГИИС - коммуникация

С точки зрения коммуникации в ГИИС возможны следующие варианты или их комбинации:

- Коммуникация осуществляется через среду. МП читает данные из среды, преобразует и передает в МС. МС осуществляет логическую обработку и возвращает результаты обработки в МП. МП записывает результирующие данные в среду, откуда они могут быть прочитаны другими ГИИС.
- Для коммуникации с другими ГИИС используется модуль коммуникации (МК). В зависимости от решаемых задач с МК может взаимодействовать МС (что характерно для традиционных информационных систем) или МП (что более характерно для систем на основе мягких вычислений).
- Взаимодействие с пользователем также может осуществляться через МС (что характерно для традиционных информационных систем) или через МП (что может быть использовано, например, в автоматизированных тренажерах).

# Частные случаи структуры ГИИС - 1



Классическая информационная система, в которой осуществляется только обработка данных и знаний (которую выполняет МС), реализуется коммуникация с другими системами (которую выполняет МК) и взаимодействие с пользователем.

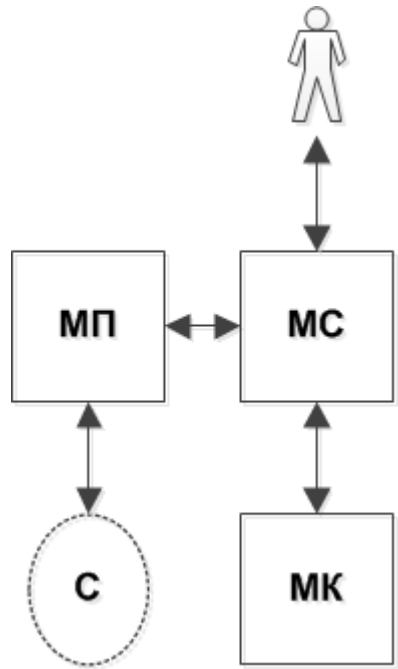
# Частные случаи структуры ГИИС - 2



Простейшая система распознавания сигналов, поступающих из среды, с помощью МП. Сигналы могут иметь различную природу. Это может быть система распознавания музыкальной партитуры по звуковому сигналу, система распознавания элементов в видеопотоке и др. Данная система является простейшей, так как в ней отсутствует МС, который должен осуществлять коррекцию логических ошибок. Здесь эта задача возлагается на МП, что может приводить к сложным правилам при распознавании и обработке сигналов.

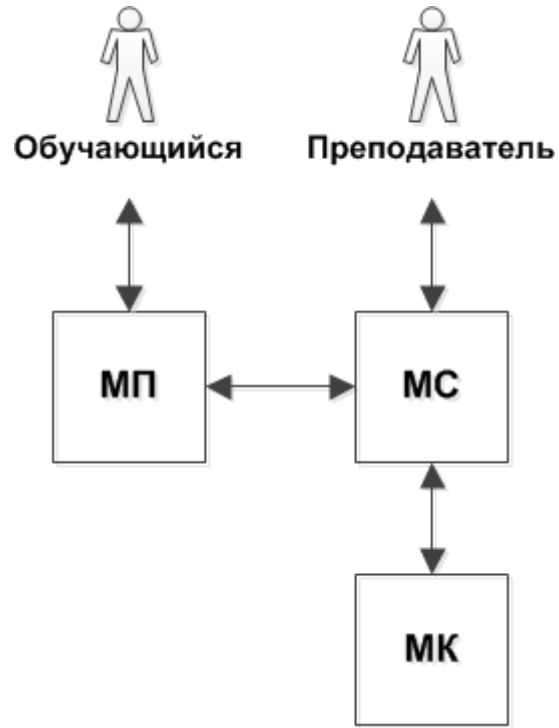


# Частные случаи структуры ГИИС - 3



- Усовершенствованная система распознавания сигналов. Сигналы выделяются из среды с помощью МП и преобразуются в элементы онтологии, которые обрабатывает МС. МС осуществляет дополнительный логический контроль. Например, для системы распознавания музыкальной партитуры, МП выделяет ноты из входного сигнала (здесь ноты являются элементами онтологии), а МС может скорректировать неверно распознанную ноту на основе правил музыкальной гармонии. В этом случае модуль коммуникации может не использоваться.
- Медицинская система функциональной диагностики. В этом случае роль среды выполняют сигналы от медицинских приборов. МП преобразует сигналы в элементы онтологии, МС на основе продукционных правил может осуществлять поддержку принятия решений. Пользователем является врач, модуль коммуникации может осуществлять коммуникацию с другими информационными системами.
- АСУТП (автоматизированная система управления технологическими процессами), использующая методы мягких вычислений. В этом случае роль среды выполняют наблюдаемые параметры технологического процесса. МП преобразует сигналы в элементы онтологии, МС на основе продукционных правил может осуществлять логический контроль поступающей информации и поддержку принятия решений. Пользователем является оператор АСУТП, модуль коммуникации может осуществлять коммуникацию с другими информационными системами.

# Частные случаи структуры ГИИС - 4



Автоматизированная система виртуального тренажера. В этом случае действия обучающегося по управлению тренажером поступают на МП. МП преобразует сигналы в элементы онтологии, МС на основе продукционных правил может осуществлять логический контроль поступающей информации, поддержку принятия решений и выдачу информации преподавателю. Модуль коммуникации может быть использован в случае группы тренажеров.

# Реализация на основе холонической МАС - 1

- Под программным агентом будем понимать программный модуль, который выполняется в виде автономной задачи (не зависит от других агентов), способен обмениваться информацией со средой и другими агентами. Под МАС будем понимать систему однородных или разнородных агентов, функционирующих в среде.
- Для реализации ГИИС наиболее интересным представляется подход на основе холонической многоагентной системы (холонической МАС). Такой класс систем рассмотрен в работах Валерия Борисовича Тарасова. В соответствии с определением холон – это «целое, рассматриваемое в то же время как часть целого».
- С точки зрения данного подхода, рассмотренные компоненты, такие как МП, МС, МК являются агентами. В тоже время они являются частями системы, которая в свою очередь является агентом.
- При этом МП является сложной структурой, которая включает агенты нижнего уровня, каждый из которых может в свою очередь включать МП, МС, МК, предназначенные для решения конкретных задач данного агента. Не смотря на то, что агент нижнего уровня находится в составе МП, он может включать в свою структуру МС, предназначенный для решения задач МП более высокого уровня. Поэтому с точки зрения данного подхода нет ничего удивительного в том, что в МС могут использоваться нечеткие продукционные правила, а в МП входят «классические» модули обработки данных.

# Реализация на основе холонической МАС - 2

- Хотя для решения задач МС могут быть использованы методы обработки правил, а для решения задач МП нейронечеткие методы, все эти методы являются статическими. То есть предполагается, что логические правила, структура нейросети и т.д. задаются на этапе проектирования ГИИС и не изменяются в процессе работы.
- Однако, подобный статический подход является недостаточным по следующим причинам:
  - нет возможности использования эволюционных методов (генетические алгоритмы, генетическое программирование и др.);
  - в настоящее время для разработки ГИС начинают активно использоваться самоорганизующиеся нейронные сети (в частности такие топологии как SOINN, hyperNEAT), их использование предполагает динамическое изменение топологии нейронной сети во время работы;
  - нет возможности использования других подходов, связанных с изменением порядка действий, таких как динамические workflow, алгоритмы автоматизированного планирования.

# Реализация на основе холонической МАС - 3

- Сформулируем основные требования к холонической МАС, предназначенной для реализации ГИИС:
- **Требование 1.** Агент должен реализовывать правила работы для МП или для МС.
- Агент может быть аналогом программной процедуры, которая вычисляет функцию активации нейрона. Может быть реактивным агентом, который реализует поведение на основе заданных правил. Может быть проактивным агентом, который реализует интеллектуальные алгоритмы планирования действий и взаимодействия с другими агентами.
- **Требование 2.** Агенты должны поддерживать принцип холонической организации. То есть агент может быть построен как структура из агентов нижнего уровня, которые агент считает «элементарными», но которые в свою очередь могут состоять из агентов более низкого уровня.
- **Требование 3.** Для реализации свойства динамичности должна существовать возможность перестройки как структуры связей между агентами, так и внутренней структуры самого агента.
- Для реализации требований используется подход на основе сложных сетей.

# Сложные сети и сложные графы - 1

- В настоящее время модели на основе сложных сетей находят все более широкое применение в различных областях науки от математики и информатики до биологии и социологии.
- Модели на основе сложных сетей применяются как в области ИИ, так и в традиционных информационных системах.
- В настоящее время термины «сложная сеть» или «комплексная сеть» (которые являются различными переводами англоязычного термина «complex network») и термин «сложный граф» (англ. «complex graph») часто употребляются как синонимы.
- При этом термин «сложная сеть», как правило, употребляется для обозначения реальной исследуемой системы, в то время как термин «сложный граф» обычно используют для обозначения математической модели такой системы.
- Наибольшие разночтения вызывает термин «сложный» применительно к графовым моделям.

# Сложные сети и сложные графы - 2

- Как правило, термин «сложный» трактуется в двух вариантах:
- **Трактовка I)** Плоские графы (сети) очень большой размерности. Такие сети могут включать миллионы и более вершин. Ребра, соединяющие вершины, могут быть ненаправленными или направленными. Иногда используется модель мультиграфа, в этом случае две вершины могут соединяться не одним, а несколькими ребрами.
- Именно такую модель в литературе чаще всего называют «сложной сетью». Исследования данной модели проводятся в основном специалистами в области математики. Исследователи рассматривают такие параметры как распределение количества связей между вершинами, выделение сильно связанных подграфов. Часто для связей вводится количественная метрика, которая обычно трактуется как расстояние между вершинами. Активно исследуются динамические модели, в которых к существующей сложной сети случайным образом добавляются вершины и ребра. Такие модели представляют интерес при изучении социальных сетей, глобальных компьютерных сетей, различных социологических и биологических моделей. Но трактовка I ограничена плоской топологией графа.
- **Трактовка II)** Сложные графы, в которых используется сложное (комплексное) описание вершин, ребер и/или их расположения. Часто в таких моделях отказываются от плоского расположения вершин и ребер и используют пространственное расположение элементов. Трактовка II позволяет описывать более сложные модели данных и знаний чем трактовка I, потому что позволяет выйти за рамки плоской топологии.



# Сложные сети (графы) с эмерджентностью

- На сегодняшний день известны три модели, относящиеся к трактовке II: гиперграф, гиперсеть и метаграф. В настоящее время в литературе еще не появился единый «собирательный термин» для моделей такого класса. Но для гиперсетевой и метаграфовой моделей может быть использован термин «сложные сети (графы) с эмерджентностью», так как данные модели реализуют принцип эмерджентности, хорошо известный в общей теории систем.
- Эмерджентность (по определению) - наличие у какой-либо системы особых свойств, не присущих ее элементам или комбинации несвязанных элементов; несводимость свойств системы к сумме свойств ее компонентов.
- Под «сетью с эмерджентностью» будем понимать такую сеть, в которой отдельный фрагмент, состоящий из вершин и связей, может выступать как отдельное целое.
- В качестве основной модели рассмотрим метаграфовую модель и ее преимущества перед гиперграфами и гиперсетями.

# Формализованная модель метаграфа - 1

Метагараф – холонически организованный граф.

Основной теоретической работой является монография А.Базу и Р. Блэннинга – «*Basu A., Blanning R. Metagraphs and Their Applications, 2007*».

$$MG = \langle V, MV, E \rangle,$$

где  $MG$  – метаграф;  $V$  – множество вершин метаграфа;  $MV$  – множество метавершин метаграфа;  $E$  – множество ребер метаграфа.

Вершина метаграфа характеризуется множеством атрибутов:

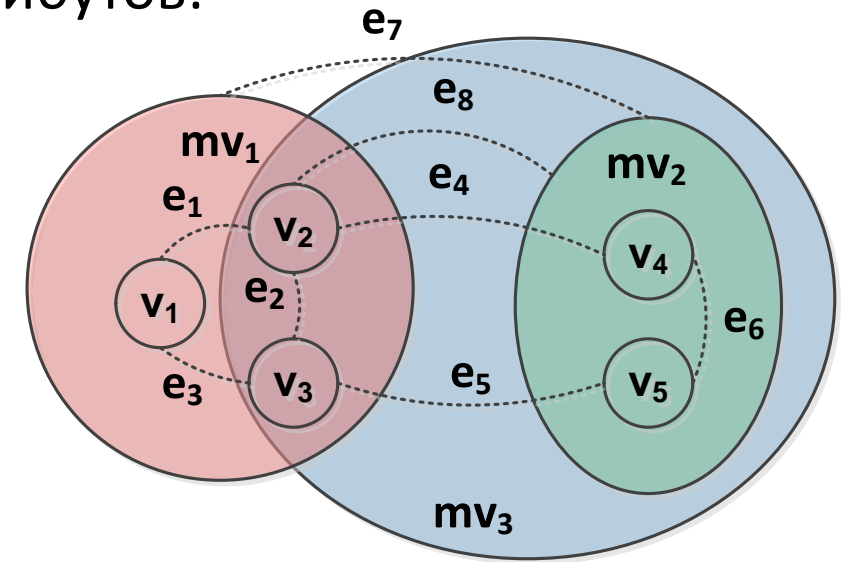
$$v_i = \{atr_k\}, v_i \in V,$$

где  $v_i$  – вершина метаграфа;  $atr_k$  – атрибут.

Ребро метаграфа характеризуется множеством атрибутов, исходной и конечной вершиной:

$$e_i = \langle v_S, v_E, \{atr_k\} \rangle, e_i \in E,$$

где  $e_i$  – ребро метаграфа;  $v_S$  – исходная вершина (метавершина) ребра;  $v_E$  – конечная вершина (метавершина) ребра;  $atr_k$  – атрибут.



# Формализованная модель метаграфа - 2

Фрагмент метаграфа:

$$MG_i = \{ev_j\}, ev_j \in (V \cup E \cup MV),$$

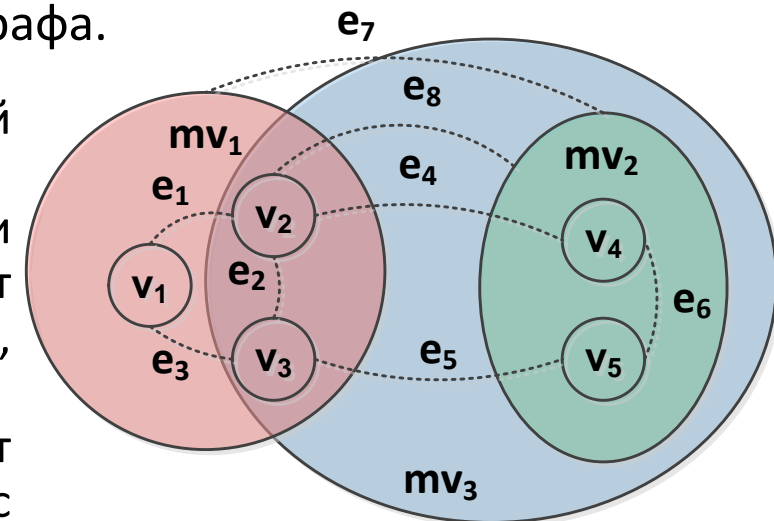
где  $MG_i$  – фрагмент метаграфа;  $ev_j$  – элемент, принадлежащий объединению множеств вершин, метавершин и ребер метаграфа.

Фрагмент метаграфа в общем виде может содержать произвольные вершины (метавершины) и ребра.

Метавершина метаграфа:  $mv_i = \langle \{atr_k\}, MG_i \rangle, mv_i \in MV,$

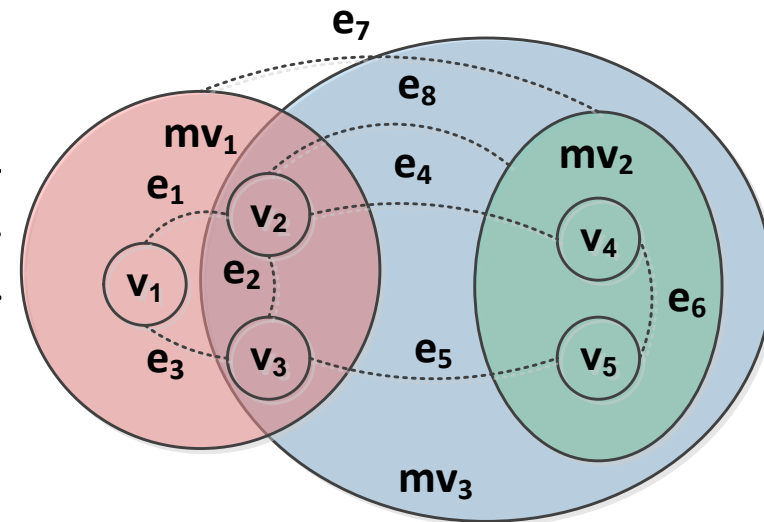
где  $mv_i$  – метавершина метаграфа;  $atr_k$  – атрибут,  $MG_i$  – фрагмент метаграфа.

- Метавершина в дополнение к свойствам вершины включает вложенный фрагмент метаграфа.
- Наличие у метавершин собственных атрибутов и связей с другими вершинами является важной особенностью метаграфов. Это соответствует принципу эмерджентности, то есть приданию понятию нового качества, несводимости понятия к сумме его составных частей.
- Как только вводится новое понятие в виде метавершины, оно «получает право» на собственные свойства, связи и т.д., так как в соответствии с принципом эмерджентности новое понятие обладает новым качеством и не может быть сведено к подграфу базовых понятий.



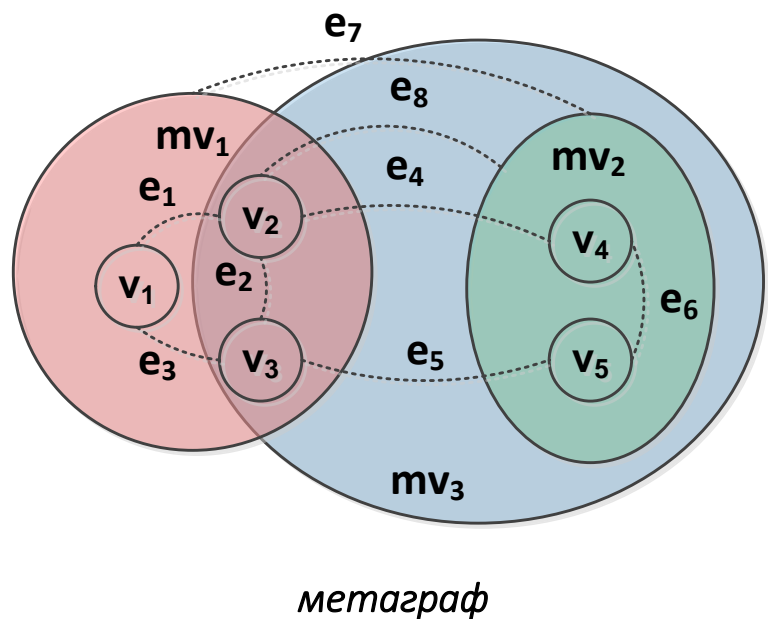
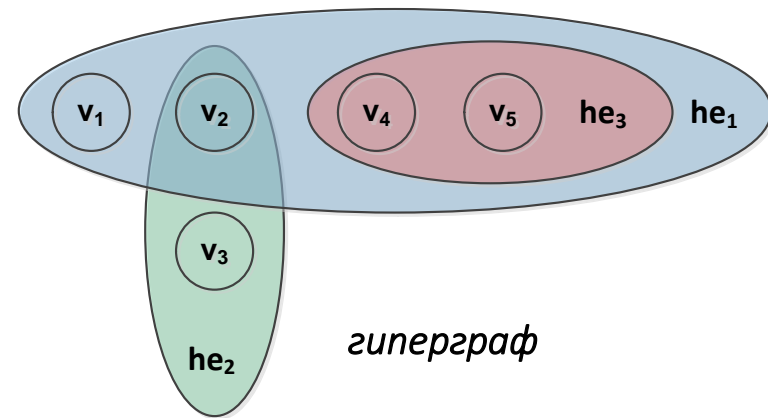
# Пример описания метаграфа

- Метаграф позволяет естественным образом моделировать сложные иерархические зависимости и является «сетью с эмерджентностью».
- Метаграф содержит вершины, метавершины и ребра. На рисунке показаны три метавершины:  $mv_1$  (которая включает вершины  $v_1, v_2, v_3$  и ребра  $e_1, e_2, e_3$ ),  $mv_2$  (которая включает вершины  $v_4, v_5$  и ребро  $e_6$ ) и  $mv_3$  (которая включает метавершину  $mv_2$ , вершины  $v_1$  и  $v_2$  и ряд ребер).
- Ребро метаграфа может соединять вершины внутри одной метавершины ( $e_1, e_2, e_3, e_6$ ), вершины между различными метавершинами ( $e_4, e_5$ ), метавершины ( $e_7$ ), вершины и метавершины ( $e_8$ ).
- Метавершина позволяет выделять фрагмент графа (метаграфа), аннотировать его дополнительными свойствами, проводить к нему (как к целому) ребра.



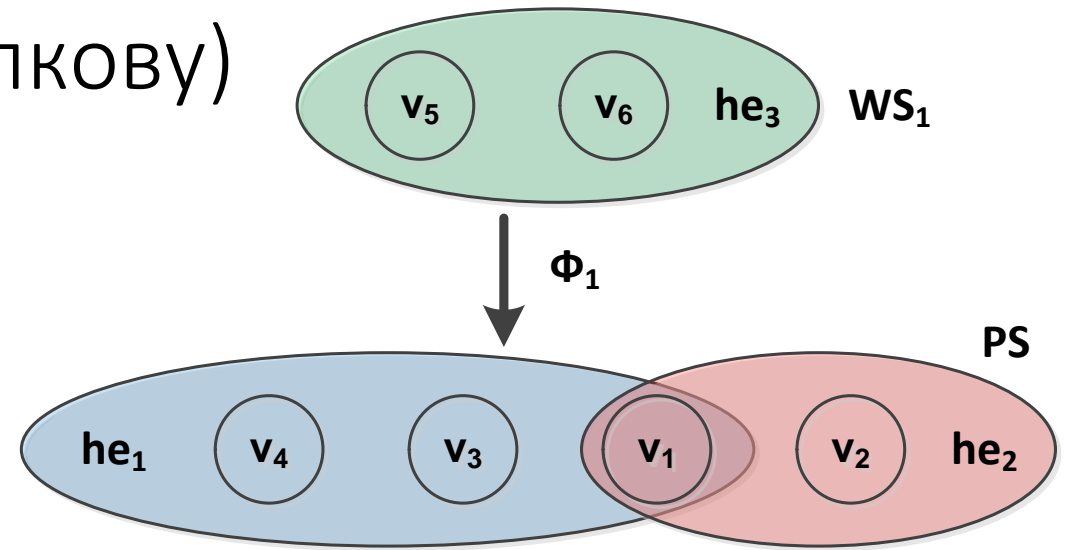
# Метаграфы и гиперграфы

- Гиперграф  $HG = \langle V, HE \rangle$ ,  $v_i \in V$ ,  $he_j \in H$ ,  $V$  – множество вершин гиперграфа;  $HE$  – множество непустых подмножеств  $V$ , называемых гиперребрами;  $v_i$  – вершина гиперграфа;  $he_j$  – гиперребро гиперграфа. Гиперребро ненаправленного гиперграфа включает множество вершин, а ребро направленного гиперграфа задает последовательность обхода вершин.
- Гиперребро  $he_1$  включает вершины  $v_1, v_2, v_4, v_5$ ; гиперребро  $he_2$  включает вершины  $v_2$  и  $v_3$ ; гиперребро  $he_3$  включает вершины  $v_4$  и  $v_5$ . Гиперребра  $he_1$  и  $he_2$  имеют общую вершину  $v_2$ . Все вершины гиперребра  $he_3$  также являются вершинами гиперребра  $he_1$ . Но «вложенность» гиперребра  $he_3$  в гиперребро  $he_1$  является скорее «визуальным эффектом», потому что операция вложенности для гиперребер формально не определена. Поэтому, хотя гиперграф и содержит гиперребра, но не позволяет моделировать сложные иерархические зависимости и не является полноценной «сетью с эмерджентностью».
- Если гиперребро гиперграфа может включать только вершины, то метавершина метаграфа может включать как вершины (или метавершины), так и ребра.
- В отличие от гиперграфа, метаграф позволяет естественным образом моделировать сложные иерархические зависимости и является «сетью с эмерджентностью».



# Гиперсетевая модель (по В.К. Попкову)

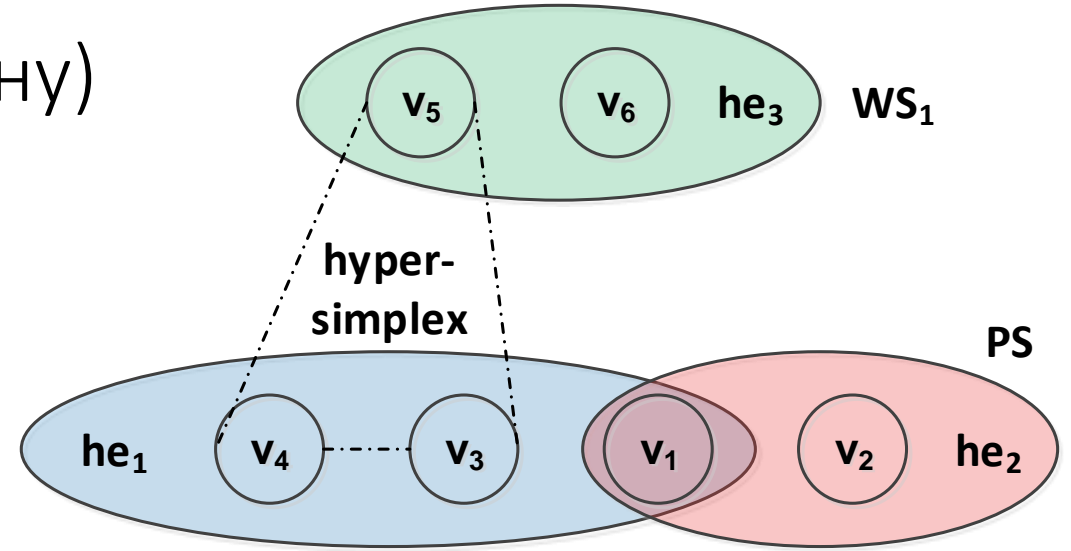
- Удивительным является факт, что гиперсетевая модель была открыта дважды.
- В первый раз гиперсетевая модель предложена д.ф.м.н. профессором Владимиром Константиновичем Попковым в 1980-х годах.
- Фактически это первая модель «сети с эмерджентностью».
- Пусть даны гиперграфы  $PS \equiv WS_0, WS_1, WS_2, \dots, WS_K$
- Гиперграф  $PS$  или  $WS_0$  называется первичной сетью. Гиперграф  $WS_i$  называется вторичной сетью  $i$ -го порядка.
- Последовательность отображений между сетями различных уровней:
$$\{\Phi_i\}: WS_K \xrightarrow{\Phi_K} WS_{K-1} \xrightarrow{\Phi_{K-1}} \dots WS_1 \xrightarrow{\Phi_1} PS$$
- Тогда иерархическая абстрактная гиперсеть порядка  $K$ :  $AS^K = \langle PS, WS_1, \dots, WS_K; \Phi_1, \dots, \Phi_K \rangle$
- Эмерджентность в гиперсети возникает при переходе между уровнями за счет использования отображений между «слоями» гиперребер.





# Гиперсетевая модель (по Дж. Джонсону)

- Во второй раз гиперсетевая модель была предложена профессором Джеффри Джонсоном в его монографии 2013 года.
- Эмерджентность в такой гиперсети возникает при переходе между уровнями за счет возникновения гиперсимплексов. Основание гиперсимплекса содержит множество элементов одного уровня, а его вершина образуется описанием их отношений и приобретает интегральные свойства, делающие ее элементом сети более высокого уровня.
- Профессор Константин Владимирович Анохин считает гиперсетевую модель (в интерпретации Дж. Джонсона) основой своей модели когнитома «Анохин К.В. Когнитом: гиперсетевая модель мозга // Нейроинформатика-2015».
- Отметим, что гиперсимплекс, как совокупность элементов различных уровней, в теории метаграфов может быть представлен в виде метавершины (в соответствии с определением метавершины).



Series on Complexity Science - Vol. 3

Hypernetworks in the Science  
of Complex Systems



Imperial College Press



# Метаграфы и гиперсети

- В соответствии с определением гиперсеть является «послойным» описанием графов. Предполагается, что слои-гиперграфы идут последовательно и имеют регулярную структуру. Метаграф позволяет с помощью метавершин группировать произвольные элементы, наличие регулярных уровней не обязательно, что делает подход метаграфов более гибким. Фактически, каждый гиперсимплекс может быть представлен отдельной метавершиной.
- Гиперсеть состоит из разнородных элементов (гиперграфов, отображений, гиперсимплексов). Метаграф позволяет с помощью метавершин обеспечивать связь как между элементами одного уровня, так и между элементами различных уровней (при этом, не обязательно соседних). Это делает метаграфовый подход более унифицированным и удобным в описании, так как для описания используются не разнородные структуры (гиперграфы и отображения), а только метавершины (и связи как элементы метавершин). Метаграфовый подход позволяет рассматривать сеть не только в виде «горизонтальных» слоев, но и в виде «вертикальных» колонок.
- Эмерджентность в гиперсети обеспечивается за счет гиперсимплексов и фактически возникает только при переходе между соседними уровнями. Эмерджентность в метаграфах обеспечивается за счет использования метавершин и может применяться на одном уровне или между уровнями (не обязательно соседними), что делает реализацию эмерджентности в метаграфах более гибкой.
- Необходимо подчеркнуть, что метаграфы и гиперсети являются лишь различными формальными описаниями одних и тех же процессов, которые происходят в «сетях с эмерджентностью». Также необходимо отметить, что настоящее время теория гиперсетей является намного более зрелой по сравнению с теорией метаграфов и именно благодаря теории гиперсетей исследователям удалось понять многие аспекты «сетей с эмерджентностью».