

**Использование метаграфового подхода в концептуальном моделировании**

**Using the metagraph approach in conceptual modeling**

1. Гапанюк Ю.Е. (Gapanjuk Yu.E.), доцент кафедры «Системы обработки информации и управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана, garyu@bmstu.ru
2. Ханмурзин Т.И. (Khanmurzin T.I.), студент кафедры «Системы обработки информации и управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана, lhorifoxl@gmail.com
3. Костян А.А. (Kostyan A.A.), студент кафедры «Системы обработки информации и управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана, linasmith69@yahoo.com
4. Фадеев А.А. (Fadeyev A.A.), студент кафедры «Системы обработки информации и управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана, af0706@yandex.ru
5. Брысина Н.Р. (Brysina N.R.), студент кафедры «Системы обработки информации и управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана, brysina.natali@yandex.ru

**1. Введение**

В соответствии с определением [1] «концептуальная модель – это модель предметной области, состоящей из перечня взаимосвязанных понятий (концептов), используемых для описания этой области, вместе со свойствами и характеристиками, классификацией этих понятий по типам, ситуациям, признакам в данной области и законам протекания процессов в ней».

Важнейшей составляющей концептуальной модели является «понятие» или «концепт». Этому термину дается множество определений. В соответствии с определением [1] «понятие – это имя, присваиваемое классу сущностей, объединяемых благодаря общности их призначных структур».

Таким образом, под «понятием» или «концептом» будем понимать объект предметной области, который может быть истолкован через другие понятия или входить в толкования других понятий.

Под «концептуальной моделью» будем понимать описание фрагмента предметной области на основе концептов и связей между ними. Это описание может быть толкованием

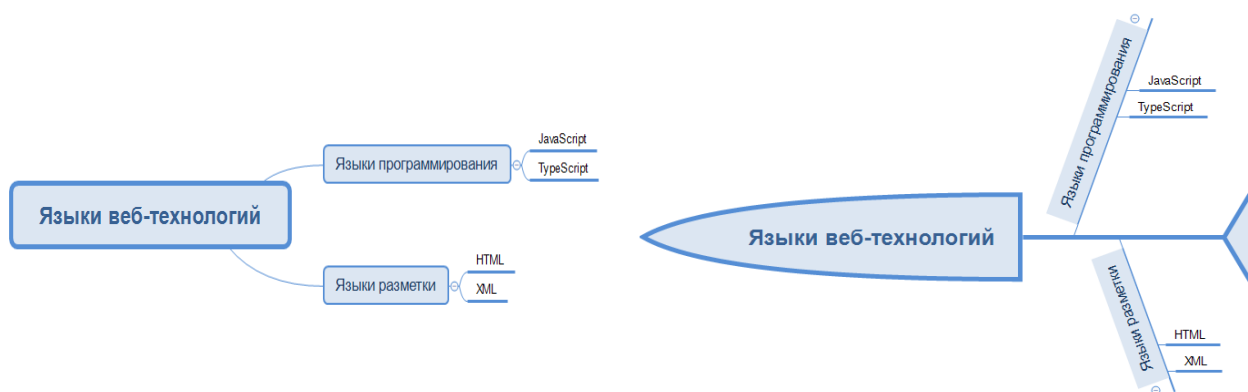
какого-либо концепта или представлением какой-либо ситуации в рамках рассматриваемой предметной области.

Наиболее традиционной графической формой представления концептуальных моделей являются «концептуальные карты». Они позволяют отображать концепты и связи между ними в графическом виде. В следующем разделе рассмотрим существующие формы представления концептуальных карт и их недостатки.

## **2. Существующие подходы к представлению концептуальных карт и их недостатки**

### **2.1. MindMap или «диаграмма связей»**

Наверное, наиболее известным на практике подходом к представлению концептуальных карт является MindMap или «диаграмма связей» [2]. Идея построения такой диаграммы состоит в том, что в центре листа изображается основная тема («topic»), в которую вложены иерархические подтемы. Для визуализации подобной диаграммы могут использоваться различные представления. Иерархически вложенные концепты могут быть отображены в виде дерева, могут располагаться на концентрических окружностях, могут быть представлены в виде диаграммы Исикавы [3] (которая также известна как «причинно-следственная диаграмма»). Наиболее простые программные продукты поддерживает только один вариант представления диаграммы связей (как правило, это «классический» вариант, в котором концепты располагаются на концентрических окружностях). Более развитые программные продукты (например, XMind) поддерживают несколько вариантов представления и осуществляют автоматическое преобразование структуры из одного представления в другое. На рис. 1 показаны примеры диаграммы связей, созданные в XMind.



А. традиционное представление MindMap

Б. диаграмма Исикавы

Рис. 1. Примеры диаграммы связей.

С точки зрения модели данных, диаграмма связей представляет собой плоский граф, вершины которого соответствуют концептам, а ребра соответствуют связям между концептами. Ребра в этой модели рассматриваются как ненаправленные и неаннотируемые (ребру нельзя приписать метку, содержащую вспомогательные данные). Именно свойство неаннотируемости позволяет осуществлять автоматические преобразования между представлениями.

Развитые программные продукты (например, XMind) позволяют также создавать дополнительные аннотируемые ребра (фактически превращая модель диаграммы связей в модель стар), но такие ребра не подлежат автоматическим преобразованиям между представлениями.

## 2.2. Концептуальные карты стар

Подходу стар достаточно трудно подобрать адекватное русское название, потому что стар является сокращением от «концептуальная карта». Таким образом, название конкретного подхода стар совпадает с названием класса подходов концептуальных карт, поэтому мы будем использовать термин стар без перевода.

Подход стар предложен профессором Джозефом Новаком [4]. Система «StarTools» – автоматизированный инструмент, разработанный на основе теории Новака, предназначен для

формализации предметных областей, а также на практике часто используется как инструмент автоматизированного обучения. На рис. 2 показан пример стар, созданный в системе «СmapTools».

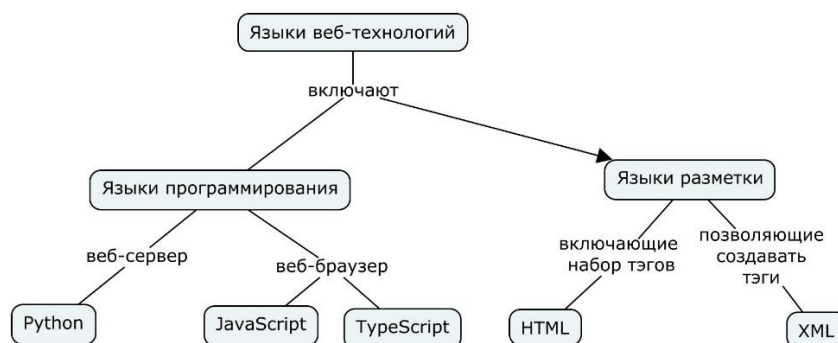


Рис. 2. Пример стар.

С точки зрения модели данных, стар (как и диаграмма связей) представляет собой плоский граф, вершины которого соответствуют концептам, а ребра соответствуют связям между концептами. В отличие от диаграммы связей, ребра в этой модели рассматриваются как направленные и аннотируемые (ребру можно приписать метку, содержащую вспомогательные данные). В отличие от модели диаграммы связей, для модели стар невозможно осуществлять автоматические преобразования между представлениями.

### 2.3. Преимущества и недостатки существующих подходов к представлению концептуальных карт

Основными преимуществами существующих подходов к представлению концептуальных карт являются:

1. Концептуальная карта представляется в графическом виде, что позволяет пользователю сформировать целостное представление предметной области.
2. Такой вариант представления позволяет понять иерархическую зависимость между концептами.

3. В случае использования концептуальной карты как обучающего инструмента возможно постепенное добавление концептов и связей, что позволяет пошагово сформировать у обучающегося целостное представление предметной области.

Основными недостатками существующих подходов к представлению концептуальных карт являются:

1. Диаграмма связей не позволяет аннотировать ребра, что серьезно ограничивает выразительные возможности модели. Эта проблема решена в подходе стар.
2. И диаграмма связей, и стар используют для изображения концептуальных карт плоские графы. Это приводит к тому, что концептуальная карта размером даже в несколько десятков концептов становится практически нечитаемой. В том числе, это происходит в силу нарушения закона Миллера [5], так как одновременно пользователь вынужден работать с количеством концептов, которое превышает число  $7 \pm 2$ .

Для решения второй проблемы в подходе стар используется понятие вложенных узлов (nested nodes). Но вложенные узлы позволяют объединять обычные узлы лишь однократно – иерархическое вложение вложенных узлов друг в друга в подходе стар невозможно.

Таким образом, проанализировав существующие подходы к представлению концептуальных карт, можно сделать вывод, что основной проблемой существующих подходов является использование плоского графа в качестве модели представления концептуальной карты. Далее рассмотрим возможность использования сложных графов (сетей) в качестве модели для концептуальных карт.

### **3. Сложные графы и сложные сети**

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. основополагающими русскоязычными статьями являются работы И.А. Евина [6],

О.П. Кузнецова и Л.Ю. Жиликовой [7]. Профессор К.В. Анохин [8] предлагает рассматривать сложные сети как основу для построения комплексных биологических моделей.

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. В работе [9, стр. 14] отмечается, что 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. Как правило, термин «сложный» трактуется в двух вариантах:

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. Но такая трактовка сложного графа мало полезна при построении концептуальных карт.

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. Именно подобные модели могут быть наиболее полезны при построении сложных концептуальных карт. На сегодняшний день известны три подобных модели:

гиперграф, гиперсеть и метаграф. В качестве модели концептуальных карт мы будем использовать метаграфовую модель.

#### 4. Метаграфовая модель и ее применение для описания концептуальных карт

Основополагающими работами по теории метаграфов являются работы А. Базу и Р. Блэннинга, которые в 2007 году были обобщены в виде монографии [10]. Модель, предложенная в [10], была адаптирована нами для описания интеллектуальных информационных систем и представлена в [11, 12]. В данном разделе кратко рассмотрим формализованную модель метаграфа в соответствии с [11, 12].

Под метаграфом будем понимать  $MG = \langle V, MV, E, ME \rangle$ , где  $MG$  – метаграф;  $V$  – множество вершин метаграфа;  $MV$  – множество метавершин метаграфа;  $E$  – множество ребер метаграфа;  $ME$  – множество метаребер метаграфа. Метаребро является вспомогательным элементом модели и в настоящее время не используется для моделирования концептуальных карт.

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 и признаком направленности:  $e_i = \langle v_s, v_e, eo, \{atr_k\} \rangle, e_i \in E, eo = true \mid false$ , где  $e_i$  – ребро метаграфа;  $v_s$  – исходная вершина (метавершина) ребра;  $v_e$  – конечная вершина (метавершина) ребра;  $eo$  – признак направленности ребра ( $eo=true$  – направленное ребро,  $eo=false$  – ненаправленное ребро);  $atr_k$  – атрибут.

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.

Метавершина метаграфа:  $mv_i = \langle \{atr_k\}, MG_j \rangle, mv_i \in MV$ , где  $mv_i$  – метавершина метаграфа;  $atr_k$  – атрибут,  $MG_j$  – фрагмент метаграфа.

Таким образом, метавершина в дополнение к свойствам вершины включает вложенный фрагмент метаграфа.

Определение метавершины является рекурсивным. 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. Фактически, 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. Таким образом, метаграф можно охарактеризовать как «сеть с эмерджентностью», то есть фрагмент сети, состоящий из вершин и связей, может выступать как отдельное целое.

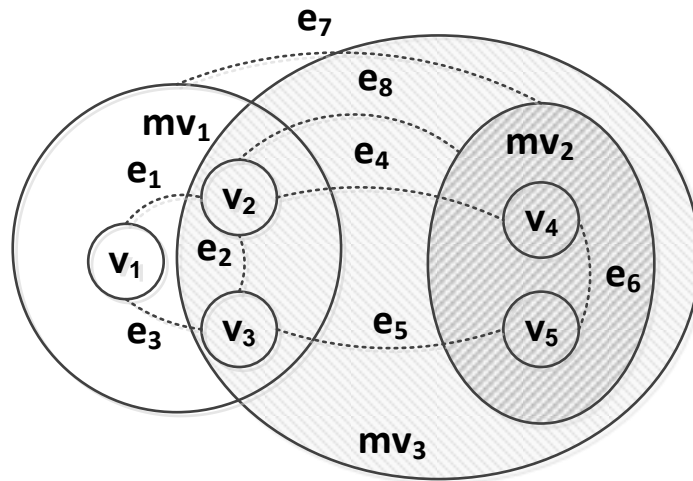


Рис. 3. Пример описания метаграфа.

Пример описания метаграфа показан на рис. 3. Данный метаграф содержит вершины, метавершины и ребра. На рис. 3 показаны три метавершины:  $mv_1$ ,  $mv_2$  и  $mv_3$ . Метавершина  $mv_1$  включает вершины  $v_1$ ,  $v_2$ ,  $v_3$  и связывающие их ребра  $e_1$ ,  $e_2$ ,  $e_3$ . Метавершина  $mv_2$  включает вершины  $v_4$ ,  $v_5$  и связывающее их ребро  $e_6$ . Ребра  $e_4$ ,  $e_5$  являются примерами ребер,



соединяющих вершины  $v_2$ - $v_4$  и  $v_3$ - $v_5$ , включенные в различные метавершины  $mv_1$  и  $mv_2$ . Ребро  $e_7$  является примером ребра, соединяющего метавершины  $mv_1$  и  $mv_2$ . Ребро  $e_8$  является примером ребра, соединяющего вершину  $v_2$  и метавершину  $mv_2$ . Метавершина  $mv_3$  включает метавершину  $mv_2$ , вершины  $v_2$ ,  $v_3$  и ребро  $e_2$  из метавершины  $mv_1$ , а также ребра  $e_4$ ,  $e_5$ ,  $e_8$ , что показывает холоническую структуру метаграфа.

Метаграфовая модель может быть полезна для описания концептуальных карт. В этом случае можно рассматривать «простые» и «сложные» концепты. При этом «простые» концепты моделируются с помощью обычных вершин, а «сложные» с помощью метавершин.

Использование метавершин для описания концептуальных карт позволяет отказаться от представления концептуальной карты в виде плоского графа и перейти к холоническому пространственному описанию концептуальной карты в виде метаграфа.

Следует также обратить внимание на интересную особенность метаграфовой модели, связанную с тем, что метавершина может быть представлена в виде «сложного» или «составного» ребра. Пример показан на рис. 4, метавершину образуют толстые цилиндры, имеющие одну общую точку и соединяющие вложенные вершины (в соответствии с моделью метаграфа вложенными элементами также могут быть метавершины и ребра). Метавершины  $mv_1$  и  $mv_1'$  являются изоморфными. Подход на основе составных ребер применяется при визуализации концептуальных карт на основе метаграфовой модели.

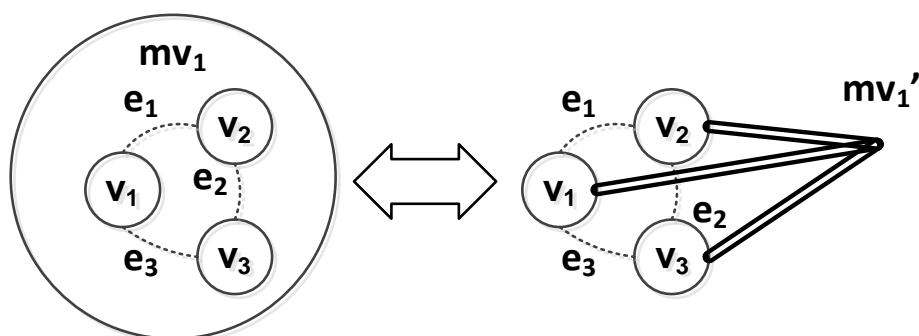


Рис. 4. Представление метавершины в виде составного ребра.

## **5. Программное средство визуализации концептуальных карт на основе метаграфовой модели**

Для визуализации концептуальных карт на основе метаграфовой модели на кафедре «Системы обработки информации и управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана разработан макет программного средства «Metagraph Editor».

Для реализации была выбрана среда разработки Unity, т.к. данная среда предоставляет удобные инструменты для реализации конечного программного продукта с графической оболочкой. Среда использует встроенный язык программирования C#. Задачи визуализации графических примитивов берет на себя сама среда Unity, дальнейшее создание, обработка, отображение окон и реализация функций остается за разработчиками программного продукта.

Для отображения графовой модели используется сферическая поверхность. Поверх отображения трехмерной сферы наложено название в виде текста, которое все время обращено к точке наблюдателя. Для отображения связи был взят длинный тонкий цилиндр, соединяющий две сферы (два графа). При наведении на этот цилиндр можно увидеть информацию о связи. Для отображения метавершин было решено использовать толстые цилиндры, имеющие одну общую точку и соединяющие сферы, входящие в состав метавершины.

Пример визуализации концептуальной карты в виде метаграфа представлен на рис. 5.

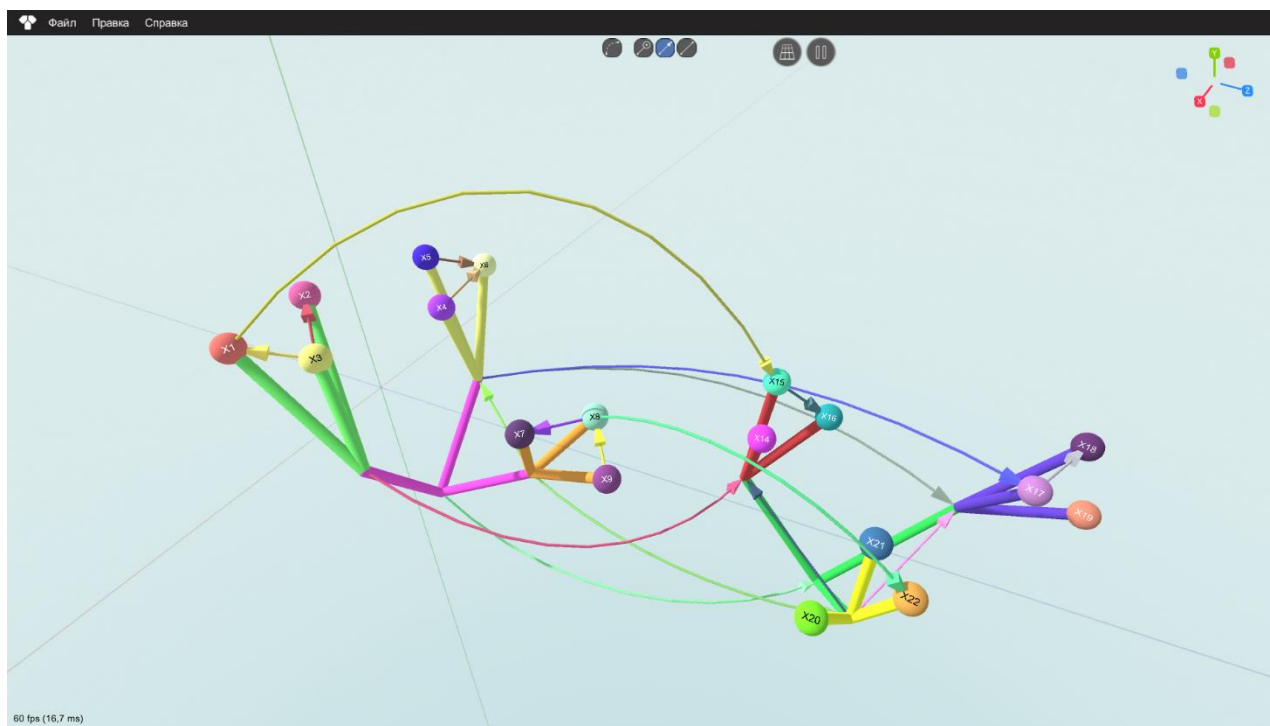
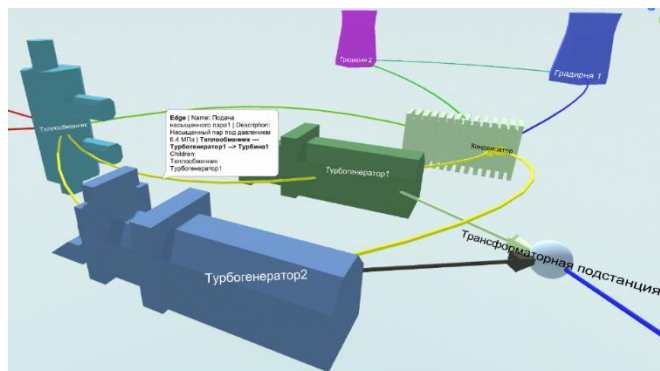
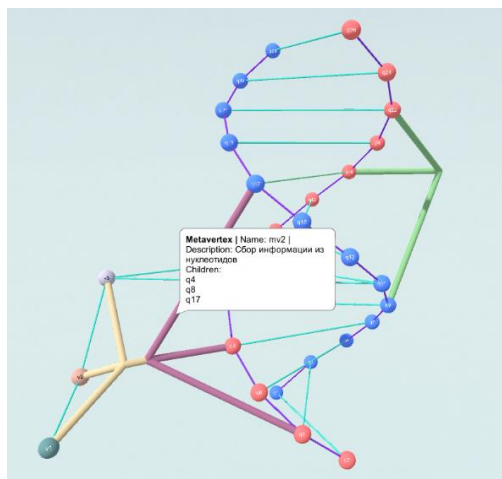


Рис. 5. Пример визуализации концептуальной карты в виде метаграфа (экранная форма программного средства «Metagraph Editor»).

Использование трехмерного расположения концептов позволяет сделать концептуальные модели более наглядными, а также моделировать аспекты, которые невозможно моделировать с использованием двухмерных концептуальных карт.

На рис. 6А показан трехмерный фрагмент модели ДНК, отдельные элементы модели аннотированы с использованием метавершин. Ни трехмерное моделирование, ни комплексные аннотации с применением метавершин невозможны с использованием традиционных двухмерных концептуальных карт.

На рис. 6Б показан трехмерный упрощенный фрагмент модели АЭС. В качестве концептов используются трехмерные модели отдельных сооружений АЭС. Аналогом данного подхода в двухмерных моделях является добавление к концептам плоских изображений, что менее наглядно.



А. трехмерный фрагмент модели ДНК    Б. трехмерный упрощенный фрагмент модели АЭС

Рис. 6. Примеры визуализации трехмерных концептуальных карт в виде метаграфа (экранные формы программного средства «Metagraph Editor»).

Недостатком данного программного средства является необходимость ручного ввода при создании моделей. Для преодоления данного недостатка предлагается использовать автоматизированную систему, которая полностью или частично сможет формировать концептуальные карты без необходимости ручного ввода.

## 6. Архитектура программной системы концептуального моделирования на основе метаграфового подхода

На рис. 7 представлена укрупненная структура программной системы концептуального моделирования на основе метаграфового подхода.

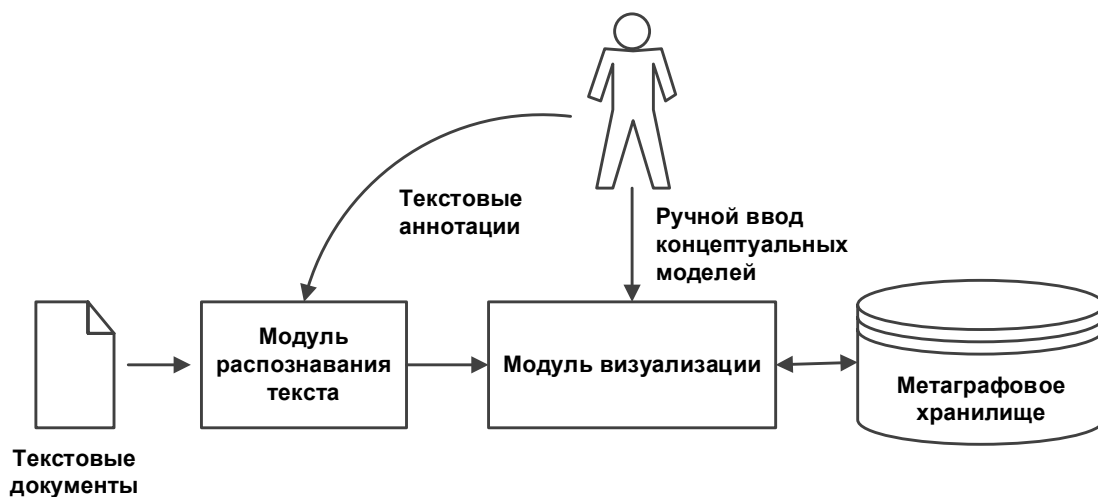


Рис. 7. Укрупненная структура программной системы концептуального моделирования на основе метаграфового подхода.

Основным модулем системы является модуль трехмерной визуализации концептуальных карт на основе «Metagraph Editor» («модуль визуализации»). Для хранения моделей используется метаграфовое хранилище.

Для автоматизации процесса ручного ввода метаграфовой модели используется «модуль распознавания текста», который осуществляет распознавание текста на естественном языке и преобразование текста в метаграфовую модель. Для создания служебных элементов (связей, надписей), а также концептов в виде трехмерных моделей используются специализированные текстовые аннотации.

Предлагаемая программная система позволяет осуществлять концептуальное моделирование на основе метаграфового подхода. При этом исключается необходимость ручного ввода концептуальных моделей, так как они распознаются из текстового описания на естественном языке.

## 7. Выводы

В соответствии с определением [1] «концептуальная модель – это модель предметной области, состоящей из перечня взаимосвязанных понятий (концептов), используемых для описания этой области, вместе со свойствами и характеристиками, классификацией этих

понятий по типам, ситуациям, признакам в данной области и законов протекания процессов в ней». Важнейшей составляющей концептуальной модели является «понятие» или «концепт».

Наиболее традиционной графической формой представления концептуальных моделей являются разновидности «концептуальных карт». Первым значительным недостатком существующих подходов к представлению «концептуальных карт» является то, что и диаграмма связей, и стар используют для изображения концептуальных карт плоские графы. Вторым значительным недостатком диаграммы связей является то, что она не позволяет аннотировать ребра, что серьезно ограничивает выразительные возможности данной модели.

Для преодоления недостатков используется подход на основе сложных графов, а именно, метаграфовая модель. Для визуализации концептуальных карт на основе метаграфовой модели на кафедре «Системы обработки информации и управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана разработан макет программного средства «Metagraph Editor».

Предлагаемая программная система (в состав которой входит «Metagraph Editor») позволяет осуществлять концептуальное моделирование на основе метаграфового подхода. При этом исключается необходимость ручного ввода концептуальных моделей, так как они распознаются из текстового описания на естественном языке.

### **Литература**

1. Аверкин Н.Н., Гаазе-Рапопорт М.Г., Поспелов Д.А. Толковый словарь по искусственному интеллекту. М.: Радио и связь, 1992. – 256 с.
2. Buzan T. Mind Map Mastery. London, Watkins Publishing, 2018. – 224 p.
3. Ishikawa K. Guide to Quality Control. Tokyo, Asian Productivity Organization, 1976. – 244 p.
4. Novak J.D., Cañas A.J. The Origins of the Concept Mapping Tool and the Continuing Evolution of the Tool. Information Visualization Journal 5(3), 2006: 175-184.
5. Talvitie V. The Foundations of Psychoanalytic Theories: Project for a Scientific Enough Psychoanalysis. Karnac Books, 2018. 125 p.

6. Евин И.А. Введение с теорию сложных сетей // Компьютерные исследования и моделирование. 2010, Том 2, №2, С. 121-141.
7. Кузнецов О.П., Жиликова Л.Ю. Сложные сети и когнитивные науки // Нейроинформатика-2015. XVII Всероссийская научно-техническая конференция. Сборник научных трудов. Ч. 1. М.: МИФИ. 2015. С. 18.
8. Анохин К.В. Когнитом: гиперсетевая модель мозга // Нейроинформатика-2015. XVII Всероссийская научно-техническая конференция. Сборник научных трудов. Ч. 1. М.: НИЯУ МИФИ. 2015. С. 14-15.
9. Chapela V., Criado R., Moral S., Romance M. Intentional risk management through complex networks analysis. Springer, 2015: SpringerBriefs in optimization. – 126 p.
10. Basu A., Blanning R. Metagraphs and Their Applications. New York, Springer, 2007. – 172 p.
11. Черненький В.М., Терехов В.И., Гапанюк Ю.Е. Структура гибридной интеллектуальной информационной системы на основе метаграфов. Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2016. Выпуск №9. С. 3-14.
12. Черненький В.М., Гапанюк Ю.Е., Ревунков Г.И., Терехов В.И., Каганов Ю.Т. Метаграфовый подход для описания гибридных интеллектуальных информационных систем. Прикладная информатика. 2017. Т. 12. № 3 (69). С. 57-79.