

Визуализация графовых моделей: подход к построению метафор представления

Р.А. Исаев¹, А.Г. Подвесовский²

Брянский государственный технический университет

¹ ORCID: 0000-0003-3263-4051, ruslan-isaev-32@yandex.ru

² ORCID: 0000-0002-1118-3266, apodv@tu-bryansk.ru

Аннотация

В статье представлено развитие авторского подхода к визуализации графовых моделей различных типов, основанного на применении метафор визуализации и направленного на повышение когнитивной ясности данных моделей. Исследуется одна из ключевых для данного подхода задач – формализация процесса построения метафор представления графовых моделей. Рассмотрены особенности графовых моделей, позволяющие формализовать процесс их визуализации, введена необходимая терминология. Сформулирован ряд принципов, которые требуется учитывать при формировании метафор представления графовых моделей. На основе введенных принципов предложен общий подход к построению метафор представления для визуализации произвольных графовых моделей. Основные идеи применения предложенного подхода продемонстрированы на примерах построения метафор представления для двух типов графовых моделей: нечеткой когнитивной карты и сети Байеса. В порядке обсуждения результатов сформулировано противоречие между объемом метафоры представления и ее когнитивной ясностью, а также высказана гипотеза о взаимосвязи данного противоречия с законом Хика. Отмечена целесообразность экспериментального исследования данной взаимосвязи и уточнения ее параметров, в том числе с целью разработки рекомендаций по построению эффективных метафор представления графовых моделей. В перспективе представленный подход может стать важной составляющей комплексного подхода к построению механизма визуализации произвольной графовой модели, обеспечивающего поддержку эффективного визуального анализа на протяжении всех этапов работы с моделью.

Ключевые слова: графовая модель, визуализация графов, метафора визуализации, когнитивная карта, сеть Байеса.

1. Введение

В настоящее время в инженерии знаний и поддержке принятия решений широко применяются модели, которые могут быть представлены в виде графов. Примерами таких моделей являются:

- Семантические сети, тезаурусы, онтологии [1];
- Сети Байеса, а также основанные на них диаграммы влияния [2, 3];
- Деревья решений [4], вероятностные деревья решений [3];
- Марковские модели принятия решений [2, 5];
- Иерархические и сетевые модели принятия решений [6];
- Модели транспортных задач с промежуточными пунктами [5];
- Когнитивные модели, основанные на различных типах когнитивных карт [7].

Характерно, что именно графовая форма представления как перечисленных, так и других подобных им моделей обычно является наиболее естественной и интуитивной

для восприятия пользователями. Действительно, каждой из таких моделей легко поставить в соответствие граф, вершины которого соответствуют основным элементам рассматриваемого объекта, системы или ситуации (например, это могут быть элементы задачи принятия решения или модели знаний о некоторой предметной области), а ребра между вершинами – отношениям между соответствующими элементами. В зависимости от типа модели, вершины графа могут быть как однородными (т.е. представлять «равноправные» элементы одной природы), так и разнородными (например, в деревьях решений имеются качественно различные типы узлов). Аналогичное утверждение справедливо и для ребер графа. Смысловые интерпретации вершин и ребер определяют характеристики графа – так, он может быть ориентированным или неориентированным, быть или не быть взвешенным, допускать циклы или быть ациклическим и т.д. Также немаловажную роль здесь играет используемый в рамках конкретного типа графовой модели математический аппарат: например, можно выделить вероятностные модели [2, 3], нечеткие модели [7, 8] и др.

Наличие у обсуждаемых моделей графовой формы представления естественным образом приводит к задаче их визуализации, для которой характерно наличие множества возможных способов ее решения, среди которых, как правило, отсутствует какой-либо «единственно верный» способ. Учитывая это, для описания задачи визуализации в общем виде можно использовать подход, основанный на понятии метафоры визуализации [9], под которой понимается совокупность принципов переноса характеристик исследуемого объекта в пространство визуальной модели. Метафора визуализации включает в себя две составляющие, применяемые последовательно:

пространственную метафору, описывающую общие принципы построения визуальной модели (в частности, вид и размерность пространства визуализации, взаимное расположение элементов модели);

метафору представления, отвечающую за уточнение характеристик визуального образа (как правило, с целью визуализации определенных свойств исследуемого объекта, наиболее значимых на текущем этапе его анализа).

Важным аспектом работы с любой графовой моделью, влияющим на эффективность ее применения, является простота восприятия модели исследователем. Для описания этого аспекта часто используется понятие когнитивной ясности [10], означающее простоту интуитивного понимания и интерпретации некоторого объема информации, представленного в определенной форме. Недостаточная когнитивная ясность обычно ассоциируется с затруднением в понимании информации, с упущением значимой ее части из внимания, в неточной или ошибочной интерпретации некоторых ее элементов и т.д. Применительно к графовой модели, обеспечение высокого уровня когнитивной ясности ее представления позволяет исследователю заметить «одним взглядом» большее количество важных свойств модели, обнаружить больше допущенных при ее построении ошибок, а также быстрее интерпретировать результаты ее анализа.

2. Метафоры визуализации как средство повышения когнитивной ясности графовых моделей

В работах [11-14] авторами исследовались аспекты применения метафор визуализации в задачах визуализации нечетких когнитивных карт и графовых моделей в целом. Обобщая полученные результаты, процесс визуализации графовой модели с применением метафоры визуализации можно представить в виде схемы на рис. 1. Так, пространственная метафора определяет принцип расположения вершин и ребер графа в визуальном пространстве, поэтому ее основой могут служить известные алгоритмы укладки графов. Следуя [15], будем говорить, что результатом применения пространственной метафоры является *пространственное размещение* графовой

модели. В свою очередь, метафора представления предназначена для того, чтобы акцентировать внимание исследователя на тех или иных аспектах или результатах моделирования, в зависимости от его потребностей на конкретном этапе работы с моделью. Для этого могут использоваться визуальные признаки вершин и ребер графа, отображающие в когнитивно доступной форме значения атрибутов соответствующих элементов модели. Так формируется **визуальное представление** графовой модели. Пространственное размещение и визуальное представление в совокупности образуют **визуальный образ** графовой модели.

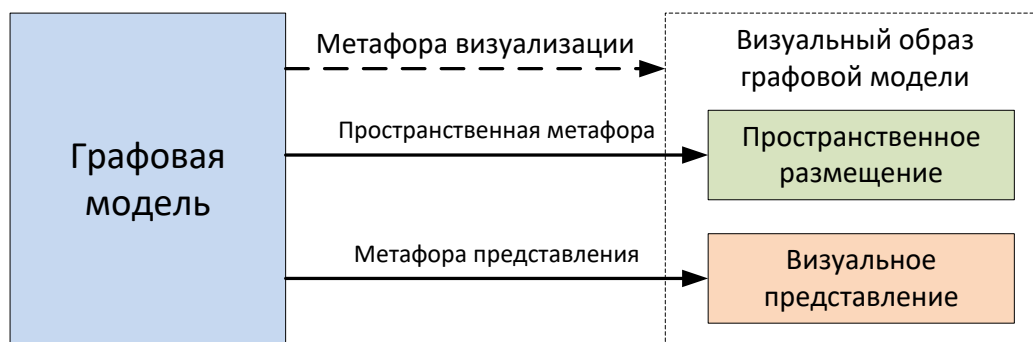


Рис. 1. Визуализация графовой модели с применением метафоры

В работе [14] авторами на примере визуализации нечетких когнитивных карт было показано, что применение метафор визуализации позволяет структурировать и частично формализовать задачу повышения когнитивной ясности визуального представления, а также была выдвинута гипотеза о том, что аналогичный эффект может быть достигнут благодаря применению метафор визуализации для графовых моделей других типов.

Соответственно, каждая из составляющих метафоры визуализации должна вносить вклад в повышение когнитивной ясности графовой модели. При этом пространственная метафора обеспечивает повышение когнитивной ясности в основном за счет оптимизации ряда формальных показателей, характеризующих укладку графа, которые и принимаются в качестве критериев когнитивной ясности на данном этапе. Авторами был предложен [11] и формализован [12] базовый набор критериев, который может приниматься за основу для оценивания когнитивной ясности любого типа графовых моделей. Также в работе [12] был предложен подход, позволяющий автоматизировать сравнение множества сгенерированных укладок заданного графа, для выбора той из них, которая обеспечивает наибольшую когнитивную ясность визуального образа.

Таким образом, задача построения пространственных метафор графовых моделей на данный момент имеет общее решение, которое в дальнейшем подлежит конкретизации и адаптации под различные типы моделей, с учетом их специфических особенностей. Вместе с тем, не меньший интерес представляет формализация и автоматизация процесса построения качественных метафор представления графовых моделей, обеспечивающих высокий уровень когнитивной ясности данных моделей при их визуальном анализе. Далее рассмотрим некоторые пути решения этой задачи.

3. Основания для формализации процесса построения метафор представления графовых моделей

Следует выделить ряд характерных черт, присущих графовым моделям, являющихся значимыми в контексте их визуализации.

Во-первых, каждая конкретная разновидность графовых моделей характеризуется определенной структурой, которая легко поддается формальному описанию. Так, основные элементы модели (т.е. вершины графа) в общем случае могут относиться к

одному из нескольких типов, содержательный смысл и внутреннее устройство которых, как правило, заданы и описаны заранее. Это же касается и отношений между элементами (ребер графа) – допустимые типы таких отношений и соответствующие им содержательные интерпретации обычно заранее известны. Далее для упрощения используемой терминологии будем называть элементами модели как вершины, так и ребра соответствующего графа – иными словами, ее структурные составляющие.

Во-вторых, элементам модели, как правило, приспаны некоторые атрибуты (т.е. свойства, характеристики этих элементов), которые имеют определенные области допустимых значений и интерпретации, а также могут иметь внутреннюю структуру, т.е. содержать в себе ряд более простых атрибутов. Элементарные атрибуты, не имеющие внутренней структуры, с точки зрения областей допустимых значений обычно соответствуют элементарным типам данных: текстовые строки, целые или вещественные числа (зачастую из определенных диапазонов), элементы дискретных множеств, бинарные значения «да/нет» и т.д. По сути, атрибуты составляют параметрическое пространство графовой модели и могут отражать как ее исходные данные (то есть задаваться при построении модели), так и результаты ее анализа.

В-третьих, достаточно очевидным решением является визуализация элементов и атрибутов различных типов различными способами, при этом для каждого конкретного типа можно выделить – как интуитивно, так и на основе опыта – способы визуализации, более предпочтительные с точки зрения обеспечения высокого уровня когнитивной ясности.

Будем говорить, что элемент модели визуализируется посредством создания *визуального образа* данного элемента, а атрибут элемента – посредством назначения некоторого *визуального признака*, соответствующему визуальному образу. Графовая модель в целом визуализируется путем создания *визуального представления*, т.е. совокупности визуальных образов элементов модели, визуальные признаки которых отражают атрибуты этих элементов.

С учетом сказанного, упоминавшийся выше способ визуализации можно более формально понимать как установление соответствия между конкретным типом элемента (атрибута) и конкретным типом визуального образа (визуального признака), а метафору представления в целом – как необходимую совокупность таких способов визуализации.

При выборе способов визуализации атрибутов целесообразно исходить из их характеристик. Так, необходимо учесть тип области допустимых значений атрибута, в частности, является ли он дискретным или непрерывным. Также следует учитывать, является ли важным с точки зрения визуального анализа модели знание точного значения атрибута, или достаточно некоторой «приближенной картины», дающей понимание ситуации на качественном уровне. В остальном выбор способов визуализации носит преимущественно субъективный характер. Кроме того, в отдельных случаях он может быть продиктован уже сложившимися традициями – подобная ситуация часто возникает в случаях широкого распространения программных средств поддержки определенного типа моделей (например, она характерна для Байесовых сетей). В любом случае, возможные способы визуализации различных типов атрибутов можно представить в некотором формализованном виде, сформировав таким образом базу знаний, пригодную для использования при разработке метафор представления любых графовых моделей.

Также при построении метафор представления важно учитывать, что различные атрибуты элементов модели становятся актуальными на разных этапах работы с ней. Например, на этапе построения модели будут неактуальными атрибуты, представляющие результаты ее анализа (поскольку на данном этапе они еще не имеют определенных значений). Кроме того, если процесс анализа модели включает в себя ряд логически отдельных этапов (как, например, в случае с когнитивными картами, где принято выделять структурно-целевой и сценарный этапы анализа), то для такой

модели характерно наличие у элементов нескольких отдельных групп атрибутов. В свою очередь, каждый из этапов может логически разделяться на подэтапы, что приводит к выделению подгрупп атрибутов и т.д. Все это позволяет ввести понятие *представления* графовой модели, под которым будем понимать специальное отношение между элементами и их атрибутами. Представление выделяет из множества всех атрибутов элемента подмножество тех, которые подлежат визуализации. Таким образом, при построении метафор визуализации графовых моделей представление может использоваться в качестве именованного шаблона, упрощающего для аналитика выбор элементов и атрибутов модели для решения конкретной задачи визуального анализа.

Материал, изложенный в данном разделе, создает основу для формализации и частичной автоматизации процесса разработки метафор представления графовых моделей.

4. Принципы формирования метафор представления графовых моделей

Сформулируем ряд принципов, определяющих правила формирования метафор представления графовых моделей. Эти принципы должны учитываться при разработке подходов к построению таких метафор. Смысловое содержание данных принципов схематически проиллюстрировано на рис. 2.

1. *Принцип частичной визуализации.* Как правило, «в один момент времени» визуализируется лишь некоторое подмножество имеющихся в составе модели элементов и их атрибутов (или, опираясь на введенную выше терминологию, визуализируется одно представление). Это связано как с высокой структурной и параметрической сложностью графовых моделей, как правило превышающей когнитивные возможности аналитика, так и с многоэтапным процессом исследования моделей, когда на определенном этапе имеется возможность и потребность в визуализации лишь части связанной с моделью информации.

2. *Принцип инъективной визуализации.* Разные атрибуты элементов модели в рамках одной метафоры представления должны визуализироваться разными способами. Иными словами, не допускается смешение двух и более атрибутов в рамках одного визуального признака, поскольку это повлечет смешение соответствующих свойств модели в восприятии аналитика.

3. *Принцип сюръективной визуализации.* Каждый отдельный визуальный признак должен отражать конкретный атрибут, значимый в контексте решаемой задачи. Иначе говоря, восприятие исследователя модели не должно загромождаться не значимой в контексте задачи информацией, поскольку это может привести к замедлению визуального анализа.

4. *Принцип подчинения.* Каждый подчиненный элемент модели должен быть визуализирован таким образом, чтобы его визуальный образ позволял однозначно установить, какому конкретно из элементов он подчинен. Частным случаем подчинения является логическая вложенность одного элемента модели в другой, что должно отображаться, соответственно, как вложенность визуальных образов.

5. *Принцип переструктурирования.* В ряде случаев является возможным слияние двух дискретных атрибутов в один атрибут на основе декартова произведения их областей допустимых значений. Так, в рассмотренном далее примере (табл. 1) допускается слияние атрибутов «Тип» и «Целевой» (полученный атрибут принимает значения «неуправляемый целевой» и т.д.). Возможен и обратный вариант применения данного принципа: исходный атрибут разбивается на два атрибута различных типов. Например, атрибут «Величина влияния» может быть разделен на «Знак влияния» и «Интенсивность влияния» (табл. 2). В целом, применение данного

принципа позволяет оптимизировать метафору представления за счет более рационального использования пространства доступных визуальных признаков.

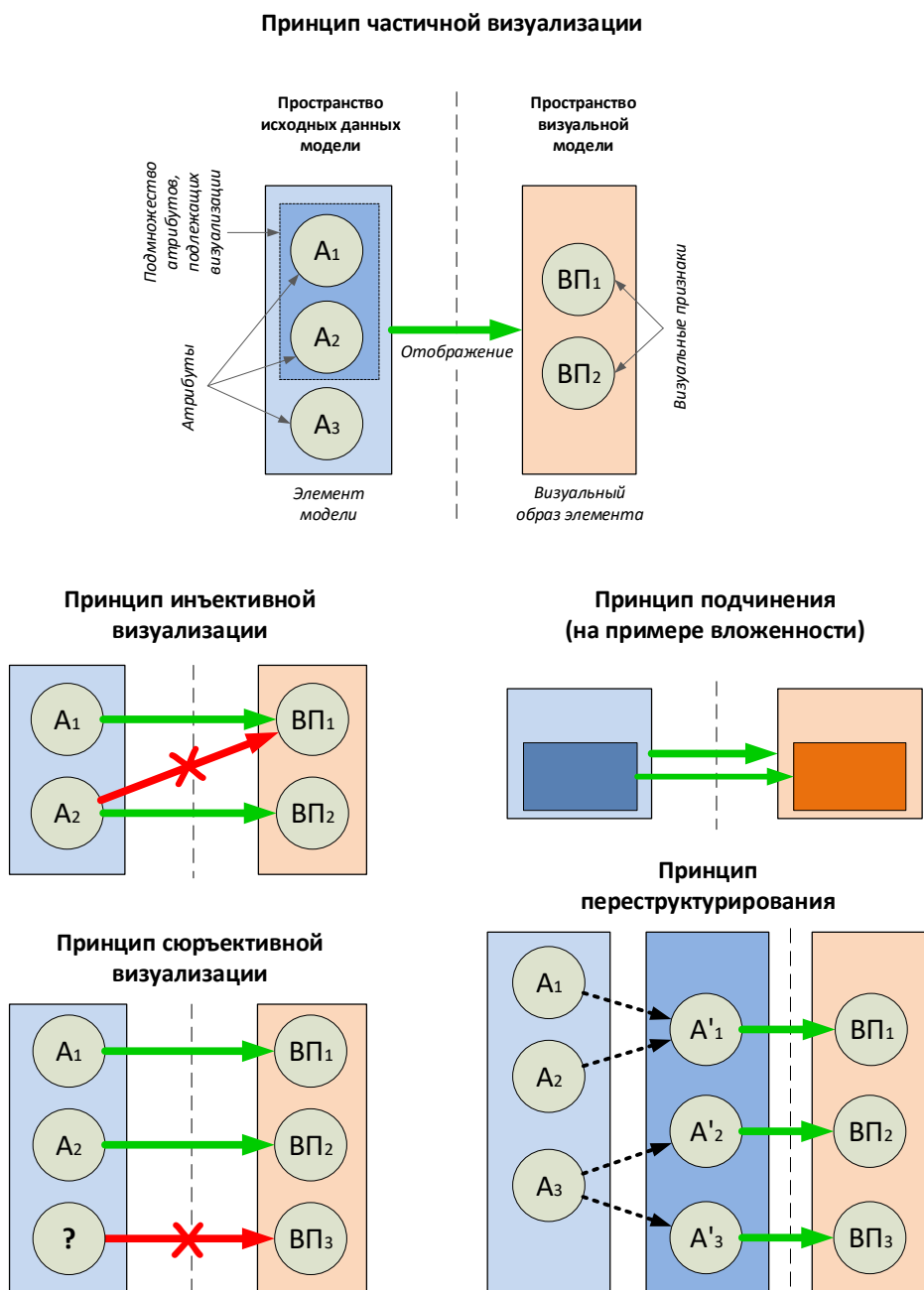


Рис. 2. Иллюстрация принципов формирования метафор представления графовых моделей

5. Общий подход к построению метафор представления графовых моделей

Учитывая сформулированные принципы, можно предложить общий подход к построению метафор представления графовых моделей. Схематически его можно представить в виде обобщенного алгоритма (рис. 3). Опишем кратко основные его этапы.

1. Выбор аналитиком из множества элементов и атрибутов модели подмножества, подлежащего визуализации в рамках одной метафоры представления. Этот этап может осуществляться в ускоренном варианте, путем выбора аналитиком конкретного

представления из множества возможных представлений (при наличии подобного множества, которое может быть сформировано, например, на основе предыдущего опыта работы с графовыми моделями подобного типа).

2. Проверка возможности одновременной визуализации всех атрибутов из выбранного подмножества. По сути, на данном этапе делается попытка установить соответствие между указанными атрибутами и доступными визуальными признаками, с учетом известных способов визуализации атрибутов различных типов. Доступные визуальные признаки формализуются посредством базового шаблона визуального образа – заранее составленной структуры, хранящей иерархию визуальных признаков с указанием их типов. На данном этапе обеспечивается соблюдение принципов инъективной и сюръективной визуализации, а также принципа подчинения. При необходимости возможно задействование принципа переструктурирования, при этом решение о слиянии или разделении атрибутов принимает аналитик.

3. В случае невозможности установления хотя бы одного варианта соответствия можно предложить аналитику сузить подмножество визуализируемых атрибутов – соответственно, исключенные атрибуты в дальнейшем могут быть визуализированы с применением другой метафоры представления. Еще один способ достижения искомого соответствия состоит в расширении пространства доступных визуальных признаков посредством модификации шаблона визуального образа, что также выполняется аналитиком. В каждом из двух способов возможна и целесообразна формулировка рекомендаций для аналитика по выбору оптимального порядка действий для достижения требуемого результата.

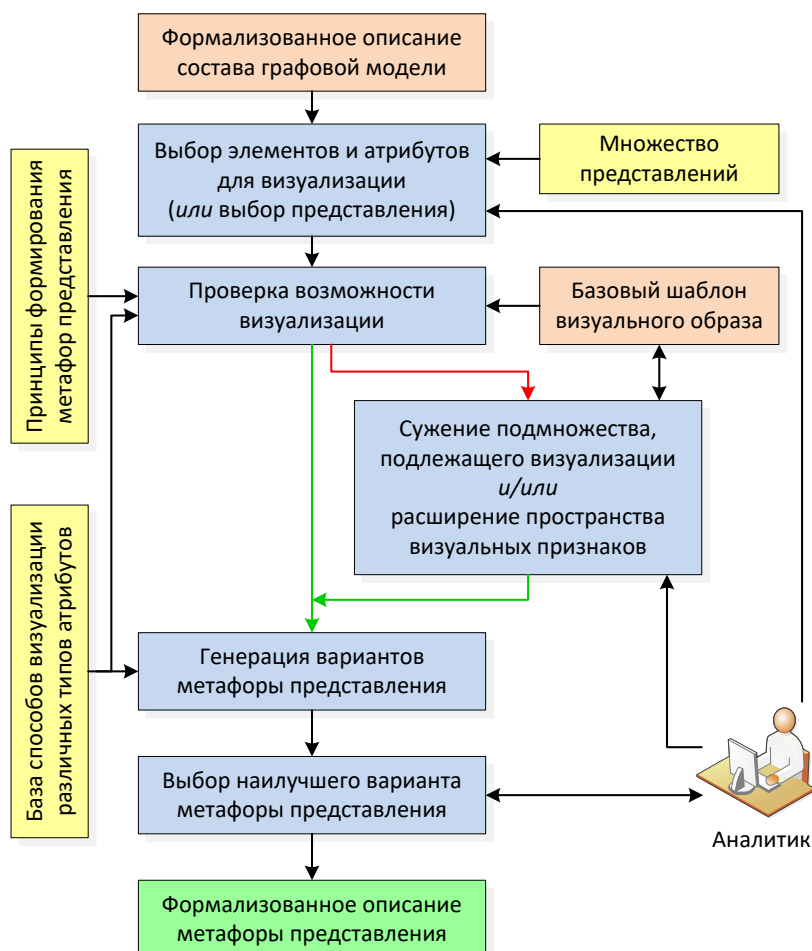


Рис 3. Обобщенный алгоритм построения метафор представления графовых моделей

4. Генерация возможных вариантов реализации метафоры представления, которая осуществляется по принципу перебора способов визуализации (т.е. комбинирования допустимых соответствий между атрибутами и визуальными признаками), с учетом заданной предпочтительности этих способов.

5. Визуальное ознакомление аналитика с полученными вариантами метафоры представления и выбор наиболее предпочтительного из них (осуществляемый уже с учетом субъективных неформализованных предпочтений).

6. Примеры построения метафор представления графовых моделей

6.1. Нечеткие когнитивные карты

Рассмотрим пример применения предложенного подхода для построения метафоры представления нечеткой когнитивной карты (НКК) В.Б. Силова [16] в рамках когнитивной модели анализа и планирования программных проектов [17]. В примере будут опущены подробности, связанные с формализацией представления данных и их обработки – акцент будет сделан на ключевые особенности предлагаемого подхода.

Элементы когнитивной карты представляют собой концепты исследуемой предметной области (управление программными проектами) и обладают едиными наборами атрибутов, являясь таким образом «однородными», т.е. относящимися к одному типу. Все существующие в модели отношения между элементами (связи между концептами) задают причинно-следственные влияния между ними, имеют единые наборы атрибутов и, таким образом, также относятся к одному типу.

В табл. 1 и 2 представлены атрибуты концептов и влияний когнитивной модели (в случае концептов приведена небольшая выборка из множества атрибутов), для которых указаны области допустимых значений и примеры способов их визуализации, обеспечивающих достаточную когнитивную ясность. При перечислении атрибутов авторы опирались на реализацию аппарата НКК Силова в рамках системы поддержки принятия решений «ИГЛА» [18].

Допустим, исследователь выполняет этап структурно-целевого анализа когнитивной модели и собирается визуализировать одновременно следующие атрибуты концепта: название, тип, влияние на систему, а также все имеющиеся атрибуты связей между концептами. При этом предположим, что базовый шаблон визуального образа концепта содержит всего два визуальных признака: отображаемый на нем текст и цвет фона (что соответствует стремлению создавать максимально простые метафоры с высокой когнитивной ясностью).

Табл. 1. Некоторые атрибуты концепта в составе НКК Силова и способы их визуализации

Атрибут	Область допустимых значений атрибута	Примеры способов визуализации
Название	Текстовые строки	Отображение текста (возможно, в сокращенном виде)
Тип	Дискретное множество, например: {неуправляемый; управляемый; наблюдаемый}	- Дискретное цветовое кодирование контрастными цветами - Разная форма вершин
Целевой	Да/Нет	- Бинарное цветовое

		кодирование - Наличие/отсутствие бинарного визуального признака (рамки, значка, ...) - Разная форма вершин
Влияние на систему	Вещественные числа из диапазона $[-1; 1]$	- Непрерывное цветовое кодирование с передачей знака влияния через цвет и силы влияния через интенсивность цвета - Столбчатая диаграмма

Табл. 2. Атрибуты влияния в составе НКК Силова и способы их визуализации

Атрибут	Область допустимых значений атрибута	Примеры способов визуализации
Концепт-причина	Множество концептов	Связь визуально исходит из вершины, соответствующей концепту
Концепт-следствие	Множество концептов	Связь визуально входит в вершину, соответствующую концепту, что обозначается маркером (обычно стрелкой)
Знак влияния	Положительное/ отрицательное	- Бинарное цветовое кодирование - Разные стили линии (сплошная, штриховая и т.д.)
Интенсивность влияния	Вещественные числа из диапазона $(0; 1]$	- Толщина линии - Интенсивность цвета

На втором этапе алгоритма была обнаружена невозможность установления в указанных условиях соответствия между атрибутами и визуальными признаками. Согласно известным способам визуализации (которые могли быть получены путем формализации знаний из табл. 1), отображаемый текст ставится в соответствие названию концепта, однако цвет фона концепта не может одновременно отражать два остальных его атрибута (тип и влияние на систему). Соответственно, произошло нарушение принципа инъективной визуализации.

Метафора представления когнитивной модели, приведенная на рис. 4, может быть сформирована после сужения множества атрибутов, подлежащих визуализации: аналитик соглашается на визуализацию только названия концепта и его влияния на систему. Напротив, метафора на рис. 5 может быть получена в результате добавления в шаблон визуального образа нового графического элемента, обеспечившего недостающий визуальный признак.



Рис. 4. Пример метафоры представления НКК

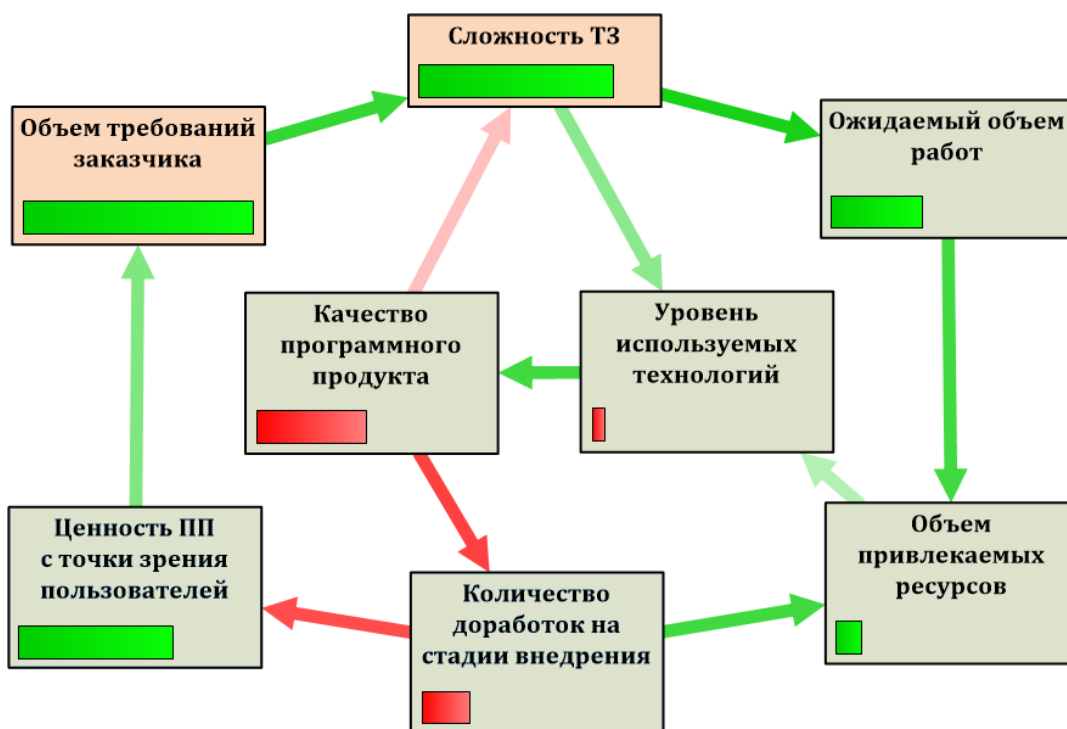


Рис. 5. Пример метафоры представления НКК: альтернативный выбор подмножества атрибутов и способов их визуализации

Ключевым различием данных метафор представления является способ визуализации влияний концептов на систему: в качестве визуальных признаков использованы цвета вершин графа (рис. 4) и элементы столбчатой диаграммы, распределенные на множестве вершин (рис. 5). Это позволило во второй метафоре «освободить» цвет вершины для визуализации типа концепта (так, в данной когнитивной модели концепты «Объем требований заказчика» и «Сложность ТЗ» являются управляемыми, т.е. на соответствующие параметры системы могут оказываться прямые управляющие воздействия, остальные концепты –

неуправляемыми). Таким образом, преимуществом второй метафоры является одновременная визуализация типа концепта и его влияния на систему – за счет этого аналитик может получить больший объем интересующей его информации в ходе одного акта визуального восприятия когнитивной модели. «Платой» за это выступает некоторое замедление самого акта восприятия из-за усложнения визуального образа, которое, впрочем, в приведенном примере является незначительным.

Остальные различия двух метафор (в части визуализации связей между концептами) могут служить демонстрацией гибкости предлагаемого подхода и учета в его рамках субъективной составляющей: за аналитиком остается выбор окончательного варианта метафоры представления из ряда допустимых, а также настройка предпочтительных цветовых схем. Так, в приведенных примерах для визуализации знаков влияний использованы разные цветовые схемы: красный/синий (рис. 4) или зеленый/красный (рис. 5) для передачи положительных и отрицательных влияний соответственно. Интенсивность влияния одного концепта на другой передается через визуальные признаки толщины дуги между ними (рис. 4) или интенсивности ее цвета (рис. 5).

6.2. Сети Байеса

Рассмотрим некоторые аспекты формирования метафор представления на примере другого типа графовых моделей – сетей Байеса.

Сеть Байеса состоит из случайных событий, характеризующих рассматриваемую задачу, каждое из которых описывается дискретной случайной переменной с заданным вероятностным распределением. Связи между случайными событиями являются направленными, каждая связь задает на соответствующей паре событий отношение вероятностной зависимости.

В табл. 3 приведены основные атрибуты случайных событий (важные в контексте рассматриваемого далее примера), их области допустимых значений и возможные способы визуализации. Связи же в данном типе моделей не имеют других атрибутов, кроме ссылок на связываемые события.

Определенного внимания заслуживает реализация метафоры представления в GeNIe – программном средстве поддержки моделирования на основе байесовых сетей и диаграмм влияния [19]. На рис. 6 представлен визуальный образ известной модели «Asia» [20], предназначенной в основном для демонстрации возможностей сетей Байеса в медицинской диагностике.

Табл. 3. Некоторые атрибуты случайного события в составе сети Байеса и способы их визуализации

Атрибут	Область допустимых значений атрибута	Примеры способов визуализации
Название	Текстовые строки	Отображение текста (возможно, в сокращенном виде)
Тип (уровень)	Дискретное множество, например: {фактор риска; гипотеза; наблюдение; вспомогательный}	- Дискретное цветовое кодирование контрастными цветами - Разная форма вершин - Пиктограмма
Наименование конкретного значения случайной переменной	Текстовые строки	Отображение текста (возможно, в сокращенном виде)

Вероятность значения конкретной переменной	конкретного случайной	Вещественные числа из диапазона [0; 1]	- Градиентное цветовое кодирование - Столбчатая диаграмма
Свидетельство переменной (принятие переменной конкретного значения)	(принятие конкретного значения)	Возможные значения случайной переменной	- Визуальное выделение принятого значения

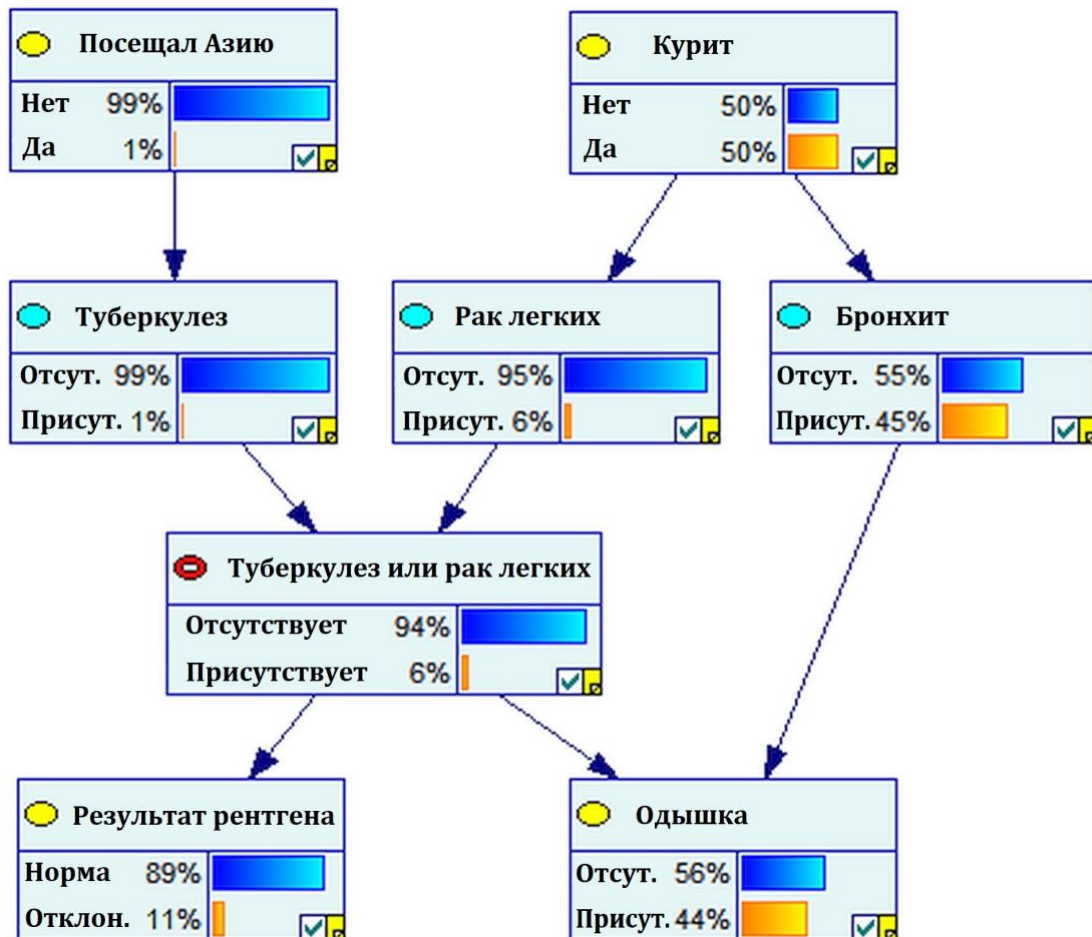


Рис. 6. Пример метафоры представления сети Байеса: реализация в программном средстве GeNIe

Анализируя данный визуальный образ с точки зрения использованной метафоры представления, можно отметить его структурную перегруженность как графическими, так и текстовыми элементами. И, хотя в рассматриваемом примере эффект замедления восприятия является не столь существенным, в случае байесовых сетей больших размеров (применяемых в реальных практических задачах диагностики и включающих десятки случайных событий) перегруженность визуального образа может стать критичной.

В этой связи следует выделить ряд особенностей рассматриваемой сети Байеса, позволяющих получить для нее более простую метафору представления с более высоким уровнем когнитивной ясности.

Во-первых, все имеющиеся в составе данной модели случайные переменные характеризуются лишь двумя допустимыми значениями. При этом, исходя из предназначения модели, одно из значений может быть интерпретировано как благоприятное («нормальное») событие, в то время как другое соответствует неблагоприятному событию (некоторому «отклонению от нормы»).

Во-вторых, наличие лишь двух возможных значений у переменных приводит к тому, что вероятности соответствующих случайных событий связаны очевидным образом: если A и B – случайные события, то $p(B) = 1 - p(A)$.

В-третьих, в рамках предварительного анализа моделируемой ситуации знание точных значений вероятностей событий не является обязательным для аналитика – здесь важнее предоставить ему возможность быстро оценить актуальную картину на качественном уровне и лишь затем, по мере необходимости, получать детальные сведения об интересующих его аспектах модели.

Таким образом, в данном случае можно применить принцип переструктурирования, а именно, объединить два «антагонистических» атрибута, описывающих вероятности взаимоисключающих событий, в единый атрибут, принимающий значения из диапазона $[0; 1]$ (можно условиться, например, что это число соответствует вероятности неблагоприятного события).

Следующим возможным решением является отображение данного атрибута посредством градиентного цветового кодирования на основе двухцветовой схемы. Например, оттенки зеленого цвета могут быть выбраны для отображения приемлемой (т.е. достаточно низкой) вероятности неблагоприятного события, а оттенки красного – для случаев, когда эта вероятность выше некоторого заданного критического значения. При этом важно, что критическое значение должно задаваться индивидуально для каждого случайного события: так, для события, связанного с наличием заболевания, данная величина может быть весьма низкой (даже невысокий процент риска зачастую является основанием для принятия соответствующих мер).

На рис. 7 приведен пример визуального образа рассматриваемой модели, который может быть получен на основе предложенной метафоры представления. Факт добавления в модель некоторого свидетельства здесь отображен визуальным признаком пунктирной рамки для соответствующего случайного события – в данном примере добавлено свидетельство, что у пациента наблюдается одышка.

Следует отметить, что данная сеть, как и многие другие байесовы сети, предназначенные для решения задач диагностики, имеет трехуровневую структуру: случайные события здесь подразделяются на факторы риска (посещение Азии, курение), гипотезы (туберкулез, рак легких, бронхит) и наблюдения (результаты рентгеновского обследования, одышка), а промежуточный уровень содержит дизъюнкцию двух гипотез.

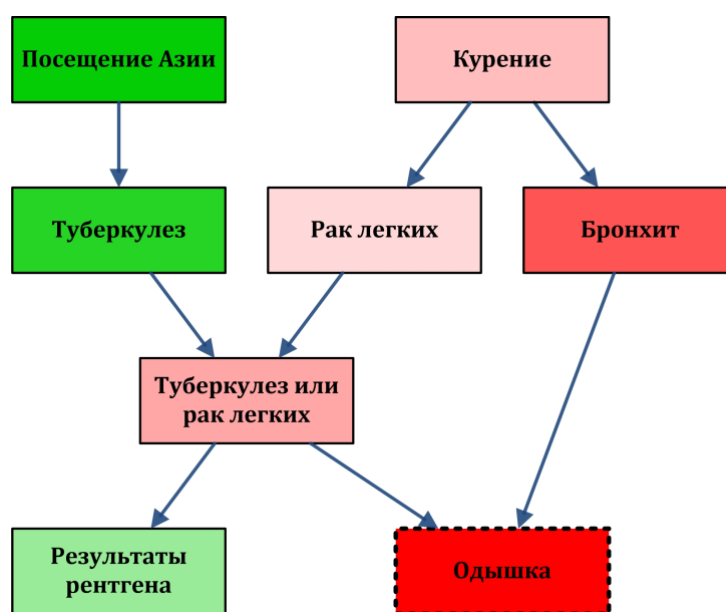


Рис. 7. Пример альтернативной метафоры представления сети Байеса

При этом, как видно из пространственного размещения графа на рис. 6 и 7, данная особенность может быть учтена еще на этапе пространственной метафоры. Так, здесь применен принцип поуровневой укладки графа, что позволило распределить его вершины в соответствии с их принадлежностью к упомянутым выше уровням.

В зависимости от типа графовой модели, данный аспект взаимосвязи пространственной метафоры и метафоры представления может играть более значимую либо менее значимую роль в обеспечении когнитивной ясности графовой модели. В любом случае, ему следует уделять внимание при построении эффективных механизмов визуализации графовых моделей.

7. Обсуждение результатов

Рассмотренные примеры подводят к общей проблеме, которую можно сформулировать как противоречие между объемом метафоры представления и ее когнитивной ясностью. При этом объем метафоры представления можно определить как мощность множества атрибутов, подлежащих визуализации в рамках данной метафоры. Эквивалентным определением может являться мощность множества различных визуальных признаков в получаемом визуальном образе (мощности указанных двух множеств равны, поскольку, в соответствии с введенными в п. 4 принципами, между ними должно иметь место биективное соответствие).

Итак, при попытке визуализировать одновременно большее число атрибутов возникает препятствие в виде исчерпания пространства визуальных признаков: так, если конкретный визуальный признак отображает некоторый атрибут, то он не может быть назначен для отображения другого атрибута. Очевидным способом преодоления этого препятствия является «экстенсивное» расширение пространства визуальных признаков за счет усложнения визуального образа (путем добавления в него новых графических элементов). Однако неизбежным следствием этого является снижение когнитивной ясности визуального образа, что выражается в замедлении процесса его восприятия. Это приводит к необходимости при построении конкретной метафоры представления поддерживать баланс между ее объемом и ее когнитивной ясностью.

Интересно отметить, что здесь обнаруживается взаимосвязь с законом Хика [21], который устанавливает зависимость между количеством элементов, содержащихся в некотором пользовательском интерфейсе, и средним временем, которое пользователь затрачивает на визуальное обнаружение и выбор нужного ему элемента. Подробное исследование данной взаимосвязи и уточнение ее параметров представляет собой весьма актуальную задачу, результатами решения которой, в числе прочих, могут стать эффективные рекомендации по формированию качественных метафор представления графовых моделей.

С этой целью в перспективе предполагается провести серию экспериментов в соответствии с идеями, изложенными в [22]. В ходе экспериментов пользователям будет предложено решить некоторое множество задач визуального анализа графовых моделей различных типов, с применением метафор представления. При этом для каждой из задач будет варьироваться объем используемой метафоры представления, а в качестве основного индикатора успешности визуального анализа будет фиксироваться время достижения пользователем верного ответа на поставленный вопрос.

8. Заключение

Предложенный подход может стать одной из ключевых составляющих комплексного подхода к построению механизма визуализации произвольных графовых моделей. Предполагается, что данный механизм должен быть основан на системе метафор визуализации, обеспечивающих повышение когнитивной ясности графовой модели на протяжении всех этапов ее построения и анализа.

При этом интересной перспективной возможностью является обеспечение интеллектуального переключения между метафорами визуализации, отражающего оптимальный в каждом конкретном случае порядок смены этапов работы с моделью.

Представляется, что определенным «идеалом» и критерием успешности применения механизма визуализации может являться выполнение всех необходимых действий по работе с графовой моделью преимущественно (или даже исключительно) в визуальной форме. Иными словами, механизм визуализации может считаться тем более удачно построенным, чем больший объем работы может быть выполнен с его применением, без привлечения альтернативных средств и форм отображения информации.

Можно также указать ряд конкретных направлений развития предложенного подхода на ближайшую перспективу. Они ориентированы в первую очередь на обеспечение возможности программной реализации алгоритма, лежащего в его основе:

Формализация введенного в рамках подхода терминологического аппарата, в частности, понятий элемента графовой модели, атрибута, представления, визуального образа и визуального признака.

Разработка языка (языков) формального описания состава графовой модели и структуры ее визуального образа, либо адаптация к данной задаче какого-либо из существующих языков разметки (например, XML или JSON).

Обеспечение автоматизированного формирования множества представлений графовой модели на основе формального описания ее состава.

Разработка языка формального описания метафор представления графовых моделей, получаемых в результате применения данного подхода.

Помимо этого, интерес представляет экспериментальное исследование обнаруженного противоречия между объемом метафоры представления и ее когнитивной ясностью, а также предполагаемой взаимосвязи этого противоречия с законом Хика.

В связи с обозначенными направлениями, перспективным прикладным результатом проводимых авторами исследований может стать программное средство поддержки визуального анализа различных графовых моделей представления знаний и принятия решений. Это средство может быть реализовано в форме библиотеки для построения механизмов визуального анализа, которая сможет использоваться при разработке или модернизации систем поддержки принятия решений и других программных систем, работа которых тесно связана с представлением информации в форме графов.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00844.

Список источников

1. Staab, S., Studer R. (Eds.): Handbook on Ontologies. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. doi: 10.1007/978-3-540-92673-3
2. Sucar, L.E.: Probabilistic Graphical Models. Principles and Applications. Springer-Verlag London, 2015. doi: 10.1007/978-1-4471-6699-3
3. Jensen, F.V., Nielsen, T.D.: Bayesian Networks and Decision Graphs, 2nd. ed. Springer Science + Business Media LLC, 2007.
4. Bramer, M.: Principles of Data Mining. Springer-Verlag London Ltd., 2016. doi: 10.1007/978-1-4471-7307-6
5. Таха Х.А. Исследование операций / пер. с англ. А.А. Минько, А.В. Слепцова. – 10-е изд. – М.: Диалектика, 2018. – 1056 с.

6. Саати Т.Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: аналитические сети / пер. с англ. О. Н. Андрейчиковой; науч. ред.: А.В. Андрейчиков, О.Н. Андрейчикова. – Изд. 2-е. – М.: ЛИБРОКОМ: URSS, 2009. – 357 с.
7. Борисов В.В., Круглов В.В., Федулов А.С. Нечеткие модели и сети. – М.: Горячая линия – Телеком, 2012. – 284 с.
8. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление / пер. с англ. А.Г. Подвесовского, Ю.В. Тюменцева; под ред. Ю.В. Тюменцева. – 2-е изд. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 798 с.
9. Захарова А.А., Шкляр А.В. Метафоры визуализации // Научная визуализация. – 2013. – Т. 5. – № 2. – С. 16-24.
10. Huang, W., Hong, S.H., Eades, P.: Predicting Graph Reading Performance: A Cognitive Approach. In: Proc. Asia Pacific Symposium on Information Visualization (APVIS2006), Tokyo, Japan, 2006, pp. 207–216. doi: 10.1145/1151903.1151933
11. Подвесовский А.Г., Исаев Р.А. Метафоры визуализации нечетких когнитивных карт // Научная визуализация. – 2018. – Т. 10. – № 4. – С. 13-29. – doi: 10.26583/sv.10.4.02
12. Подвесовский А.Г., Исаев Р.А. Построение оптимальной метафоры визуализации нечетких когнитивных карт на основе формализованных критериев когнитивной ясности // Научная визуализация. – 2019. – Т. 11. – № 4. – С. 115-129. – doi: 10.26583/sv.11.4.10
13. Исаев Р.А., Подвесовский А.Г. Верификация причинно-следственных связей в когнитивных моделях на основе применения метафор визуализации нечетких когнитивных карт // Научная визуализация. – 2020. – Т. 12. – № 4. – С. 1-8. – doi: 10.26583/sv.12.4.01
14. Исаев Р.А., Подвесовский А.Г. Повышение когнитивной ясности графовых моделей представления знаний и принятия решений с применением визуализации // Эргодизайн. – 2021. – № 1 (11). – С. 27–35. – doi: 10.30987/2658-4026-2021-1-27-35
15. Касьянов В, Касьянова Е. Визуализация информации на основе графовых моделей // Научная визуализация. – 2014. – № 6 (1). – С. 31–50.
16. Силов, В.Б. Принятие стратегических решений в нечеткой обстановке. – М.: ИНПРО-РЕС, 1995. – 228 с.
17. Подвесовский А.Г., Титарев Д.В., Исаев Р.А. Нечеткие когнитивные модели в задачах анализа и планирования программных проектов // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2019. – № 8. – С. 22-31. – doi: 10.14489/vkit.2019.08.pp.022-031.
18. Захарова А.А., Подвесовский А.Г., Исаев Р.А. Математическое и программное обеспечение поддержки когнитивного моделирования слабоструктурированных организационно-технических систем // Междунар. конф. СРТ2019. – Нижний Новгород: Изд-во ННГАСУ и НИЦФТИ, 2019. – С. 131-141.
19. GeNIe Modeler – BayesFusion. URL: <https://www.bayesfusion.com/genie/>
20. Asia Bayesian network | Live demo. URL: <https://www.bayesserver.com/examples/networks/asia>
21. Proctor, R.W., Schneider, D.W.: Hick's law for choice reaction time: A review. Quarterly Journal of Experimental Psychology 10 (4), 145–153 (2018). doi: 10.1080/17470218.2017.1322622
22. Захарова А.А., Вехтер Е.В., Шкляр А.В., Крысько А.В., Салтыкова О.А. Количественная оценка когнитивной интерпретируемости визуализации // Научная визуализация. – 2018. – Т. 10. – № 4. – С. 145-153. – doi: 10.26583/sv.10.4.11

Visualization of Graph Models: An Approach to Construction of Representation Metaphors

R.A. Isaev¹, A.G. Podvesovskii²

Bryansk State Technical University

¹ ORCID: 0000-0003-3263-4051, ruslan-isaev-32@yandex.ru

² ORCID: 0000-0002-1118-3266, apodv@tu-bryansk.ru

Abstract

The paper presents development of the authors' approach to visualization of graph models of various types based on the use of visualization metaphors and aimed at increasing cognitive clarity of these models. One of the key problems of this approach is investigated – namely, formalization of the process of constructing representation metaphors for graph models. Features of graph models that allow formalizing the process of their visualization are considered, the necessary terminology is introduced. A number of principles have been formulated that must be considered when forming metaphors for representing graph models. On the basis of the introduced principles, a general approach to the construction of representation metaphors for visualization of arbitrary graph models is proposed. The main ideas for applying the proposed approach are demonstrated by examples of constructing representation metaphors for two types of graph models: fuzzy cognitive maps and Bayesian networks. In order to discuss the results, a contradiction between the volume of a representation metaphor and its cognitive clarity is formulated, and a hypothesis is proposed about the relationship of this contradiction with Hick's law. The feasibility of experimental study of this relationship and the refinement of its parameters, including with the aim of developing recommendations for the construction of efficient representation metaphors of graph models, is noted. In the future, the presented approach can become an important component of an integrated approach to building a visualization mechanism for an arbitrary graph model, which provides support for efficient visual analysis throughout all stages of modeling.

Keywords: graph model, graph visualization, visualization metaphor, cognitive map, Bayesian network.

References

1. Staab, S., Studer R. (Eds.): Handbook on Ontologies. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. doi: 10.1007/978-3-540-92673-3
2. Sucar, L.E.: Probabilistic Graphical Models. Principles and Applications. Springer-Verlag London, 2015. doi: 10.1007/978-1-4471-6699-3
3. Jensen, F.V., Nielsen, T.D.: Bayesian Networks and Decision Graphs, 2nd. ed. Springer Science + Business Media LLC, 2007.
4. Bramer, M.: Principles of Data Mining. Springer-Verlag London Ltd., 2016. doi: 10.1007/978-1-4471-7307-6
5. Taha, H.A.: Operations Research: An Introduction, 10th. ed. Pearson, 2017.
6. Saaty, T.L.: Decision Making with Dependence and Feedback: The Analytic Network Process. RWS Publishing, Pittsburgh, PA, 2001.
7. Borisov, V.V., Kruglov, V.V., Fedulov, A.S.: Fuzzy Models and Networks. Goryachaya Liniya – Telekom, Moscow, Russia, 2012. [in Russian]
8. Piegat, A.: Fuzzy Modeling and Control. Physica-Verlag Heidelberg, 2001. doi: 10.1007/978-3-7908-1824-6

9. Zakharova, A.A., Shklyar, A.V.: Visualization Metaphors. *Scientific Visualization* 5 (2), 16–24 (2013).
10. Huang, W., Hong, S.H., Eades, P.: Predicting Graph Reading Performance: A Cognitive Approach. In: *Proc. Asia Pacific Symposium on Information Visualization (APVIS2006)*, Tokyo, Japan, 2006, pp. 207–216. doi: 10.1145/1151903.1151933
11. Podvesovskii, A.G., Isaev, R.A.: Visualization Metaphors for Fuzzy Cognitive Maps. *Scientific Visualization* 10 (4), 13–29 (2018). doi: 10.26583/sv.10.4.02
12. Podvesovskii, A.G., Isaev, R.A.: Constructing Optimal Visualization Metaphor of Fuzzy Cognitive Maps on the Basis of Formalized Cognitive Clarity Criteria. *Scientific Visualization* 11 (4), 115–129 (2019). doi: 10.26583/sv.11.4.10
13. Isaev, R.A., Podvesovskii, A.G.: Verification of Cause-and-Effect Relationships in Cognitive Models Using Visualization Metaphors of Fuzzy Cognitive Maps. *Scientific Visualization* 12 (4), 1–8 (2020). doi: 10.26583/sv.12.4.01
14. Isaev, R.A., Podvesovskii, A.G.: Improving the Cognitive Clarity of Graph Models of Knowledge Representation and Decision-Making Using Visualization. *Ergodesign*. 1 (11), 27–35 (2021). [in Russian]. doi: 10.30987/2658-4026-2021-1-27-35
15. Kasyanov, V., Kasyanova, E.: Information Visualization on the Base of Graph Models. *Scientific Visualization* 6 (1), 31–50 (2014).
16. Sylov, V.B.: *Strategical Decision Making in Fuzzy Environment*. INPRO-RES, Moscow, Russia, 1995. [in Russian].
17. Podvesovskii, A.G., Titarev, D.V., Isaev R.A.: Fuzzy cognitive models in software projects analysis and planning. *Herald of Computer and Information Technologies*, 8, 22-31 (2019). [in Russian]. doi: 10.14489/vkit.2019.08.pp.022-031
18. Zakharova, A.A., Podvesovskii, A.G., Isaev, R.A.: Mathematical and Software Support for Cognitive Modeling of Semi-structured Organizational and Technical Systems. In: *CPT2019 International conference Proceedings*, pp. 131–141. Pub. NNGASU and SRCIPT, Nizhniy Novgorod (2019). [in Russian].
19. GeNIe Modeler – BayesFusion. URL: <https://www.bayesfusion.com/genie/>
20. Asia Bayesian network | Live demo. URL: <https://www.bayesserver.com/examples/networks/asia>
21. Proctor, R.W., Schneider, D.W.: Hick’s law for choice reaction time: A review. *Quarterly Journal of Experimental Psychology* 10 (4), 145–153 (2018). doi: 10.1080/17470218.2017.1322622
22. Zakharova, A.A., Vekhter, E.V., Shklyar, A.V., Krysko, A.V., Saltykova, O.A.: Quantitative Assessment of Cognitive Interpretability of Visualization. *Scientific Visualization* 71 (6), 1281–1299 (2018). doi: 10.26583/sv.10.4.11