

УДК: 519.1+538.911

Когнитивные сети

И. А. Евин^{1,3,a}, А. А. Кобляков², Д. В. Савриков¹, Н. Д. Шувалов³

¹ Учреждение Российской академии наук Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН,
Россия, 101990, г. Москва, Малый Харитоньевский переулок, 4

² Московская государственная консерватория им. П. И. Чайковского,
Россия, 125009, г. Москва, Большая Никитская, 13/6

³ Московский физико-технический институт (государственный университет),
Россия, 141700, г. Долгопрудный, Институтский переулок, 9

E-mail: ^a yevin@list.ru

Получено 25 июля 2011 г.,
после доработки 23 августа 2011 г.

Традиционная классификация сложных сетей на биологические, технологические и социальные является неполной, поскольку существует огромное разнообразие продуктов художественного творчества, структуру которых также можно представить в виде сетей. В статье дан обзор исследований сложных сетей, моделирующих некоторые литературные, музыкальные и живописные произведения. Соответствующие сети предложено называть когнитивными. Обсуждаются основные направления изучения таких сетевых структур.

Ключевые слова: безмасштабные сети, ассортативность, кластеризация

Cognitive Networks

I. A. Yevin¹, A. A. Koblyakov², D. V. Savricov³, N. D. Shuvalov³

¹ Mechanical Engineering Institute, 4 Maliy Charitonjevskiy pereulok, Moscow, 101909, Russia

² Moscow State Conservatory, 13/6 Bolshaya Nikitskaya, Moscow, 124009, Russia

³ Moscow Institute of Physics and Technology, 9 Institutsky per, Dolgoprudny, 141700 Russia

Abstract. — Traditional classification of real complex networks on biological, technological and social is incomplete, as there is a huge variety of artworks, which structure also can be presented in the form of networks. In this paper the review of researches of the complex networks, modeling some literary, musical and painting works is given. Corresponding networks are offered for naming cognitive networks. The possible directions of studying of such networks are discussed.

Keywords: scale-free networks, assortativity, clasterisation

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2011, vol. 3, no. 3, pp. 231–239 (Russian).

В последнее десятилетие в изучении сложных систем были достигнуты значительные успехи благодаря применению сетевого подхода. Узлами соответствующих сетей берутся элементы моделируемых сложных систем, а связи между узлами описывают взаимодействие между элементами. Получающиеся сложные сети принято разделять на технологические (Интернет, WWW), социальные (сети знакомств, сети сотрудничества) и биологические (экологические, функциональные сети мозга, сети белковых взаимодействий, метаболические сети) [Евин, 2009; Евин, 2010]. Закон распределения узлов по числу связей во всех перечисленных сетях подчиняется степенному закону $P \propto q^{-\gamma}$, где q есть степень узла (число связей), γ — постоянная величина. Такие сети получили название безмасштабных сетей (scale-free networks) [Евин, 2010; Newman, 2010; Solè et al., 2010] по аналогии с понятием «безмасштабное распределение» (scale-free distribution), описывающим степенное распределение флуктуаций в критической точке в теории фазовых переходов. При этом технологические и биологические сети отличаются от социальных сетей характером корреляции узлов, который получил название ассортативность. Показатель ассортативности описывается коэффициентом Пирса:

$$r = \frac{L \sum_{i=1}^L j_i k_i - \left[\sum_{i=1}^L j_i \right]^2}{L \sum_{i=1}^L j_i^2 - \left[\sum_{i=1}^L j_i \right]^2}.$$

Здесь L — число связей в сети, а j_i и k_i — число связей у узлов на обоих концах связи i . Если узлы с большим числом связей (хабы) связаны друг с другом, то $r \approx 1$. Если узлы с большим числом связей связаны с узлами с небольшим числом связей, то $r \approx -1$. В социальных сетях имеет место положительная ассортативность, в то время как для технологических и биологических сетей свойственна отрицательная ассортативность [Евин, 2009].

Еще одной важной характеристикой безмасштабных сетей является их кластеризация. Кластеризация всей сети определяется как

$$C = 3 \cdot \frac{M_{\Delta}}{M_V},$$

где M_{Δ} — число треугольников в сети, образуемых ее связями, а M_V — число «вилкок», где «вилка» означает узел и две его связи. По сути, коэффициент кластеризации C есть доля «вилкок» у связей, образующих треугольник, то есть циклов длины 3. У безмасштабных сетей коэффициент кластеризации обычно на порядки выше, чем у случайных графов тех же размеров.

В последнее время структурные свойства языка, тексты литературных произведений и тексты, связанные с религиозным сознанием (собрания мифов, Ветхий и Новый Заветы, Коран и т. п.), а также организацию музыкальных произведений и живописи также стали изучать с применением методов теории сложных сетей. Соответствующие сети нельзя отнести ни к одной из трех вышеназванных категорий (технологические, биологические, социальные); они образуют особую, малоизученную категорию, которую мы будем называть когнитивными сетями.

Термин «когнитивные сети» был предложен в работах по исследованию сетевой структуры естественного языка [Caldarelli, 2007]¹. Предварительные исследования показывают, что когнитивные сети являются безмасштабными, однако другие их свойства, в том числе показатель их ассортативности, во многих случаях не вычислялись. В данной статье мы рассмотрим

¹ В англоязычной научной литературе термин *cognitive networks* используется также в исследованиях по адаптации технических устройств к окружающей технологической среде, где он имеет метафорический смысл, никак не связанный с изучением мозга (см., например, Q. Mahmoud. *Cognitive Networks: Towards Self-Aware Networks*. Wiley, 2007.).

вероятность возникновения связи между ближайшими словами (узлами сети) в зависимости от степени узла, и обнаружена композитная степенная зависимость для обоих этих показателей.

Сети взаимоотношений героев литературных произведений

На протяжении трех тысяч лет писатели, поэты, художники, композиторы используют в своем творчестве мифологические образы Древней Греции. Возможно, и сейчас эти сюжеты и образы формируют нас в большей степени, чем современная литература.

Словарь классической греческой мифологии Гранта и Хазеля содержит биографии всех персонажей древнегреческих мифов, как всем известных богов, так и малоизвестных нимф [Grant, Hazel, 1985]. Всего в словаре 1 647 богов, нимф, чудовищ, сирен, простых смертных. На основе этого словаря была сконструирована ориентированная сеть межличностных связей героев древнегреческих мифов [Choi, Kim, 2007]. В этой сети каждому узлу соответствует определенный персонаж, а узлы А и В соединены связью, если при описании персонажа А появляется персонаж В, и наоборот.

Например, Акакаллида, дочь Миноса и Пасифаи, родила Аполлону сына Амфидемиса и, возможно, Милета. Следовательно, Акакаллида связана с этими пятью персонажами направленными от нее связями. Если ее имя будет упоминаться в историях, связанных с другими героями, то появятся связи, направленные к ней самой (рис. 2).

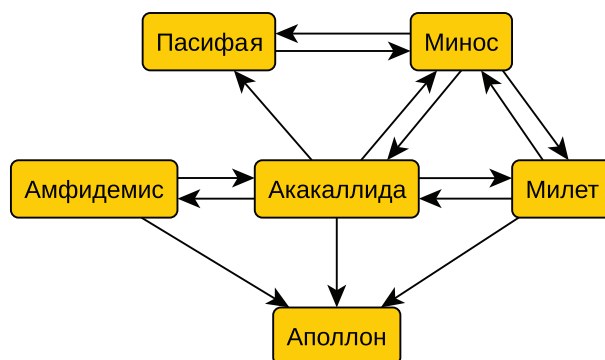


Рис. 2. Фрагмент сетевой структуры героев древнегреческих мифов. Показаны межличностные связи Акакаллиды — критянской нимфы. Для этого персонажа число выходящих и входящих связей равно соответственно $k_{out} = 5$ и $k_{in} = 3$. Адаптировано из [Choi, Kim, 2007]

Сконструированная таким образом ориентированная сеть оказалась безмасштабной с $\gamma_{out} \approx 3.0$ и $\gamma_{in} \approx 2.5$. Среднее число шагов между узлами в этой сети равняется $\langle l \rangle \approx 3.47$.

Зависимость коэффициента кластеризации от степени узла в построенной сети подчиняется степенному закону с показателем степени, равным 0.63, что указывает на то, что сеть имеет иерархическую структуру.

Подобного рода новые подходы в исследовании канонических текстов религиозных учений очень важны для когнитивной науки, поскольку религиозное сознание было первой формой сознания человека, и понимание количественных закономерностей его формирования может помочь в изучении других форм сознания, в том числе связанного с искусством. Недавно была построена социальная сеть персонажей Нового и Ветхого Заветов [Harrison, <http://www.chrisharrison.net/projects/bibleviz/>], и в настоящее время вычисляются статистические параметры этой сети.

Д. Стиллер (James Stiller), Д. Неттл (Daniel Nettle) и Р. Данбар (Robin Dunbar) исследовали структуры взаимодействия персонажей в десяти наиболее популярных пьесах В. Шекспира. Каждый персонаж пьесы является узлом соответствующей сети. Два узла такой сети связаны между

собой, если соответствующие персонажи хотя бы раз одновременно появлялись на сцене [Stiller et al., 2003].

Анализ построенных сетей для всех десяти пьес показал, что герои связаны друг с другом не более чем двумя степенями разделения, а социальные связи в этих пьесах имеют высокую степень кластеризации. Увеличение числа персонажей в пьесах Шекспира ведет к росту числа социальных групп, по мере того как драма увеличивается в размерах, коммуникативные связи становятся менее насыщенными.

Обычно общее число персонажей в пьесах Шекспира варьирует в пределах 30–40, что сравнимо с размерами древних охотничьих сообществ и числом социальных контактов человека в современном обществе. Возможно, эта величина соответствует тем пределам когнитивных способностей человека, за которыми уже становится затруднительным отслеживание всех возможных изменений в структуре социальных контактов [Stiller et al., 2003].

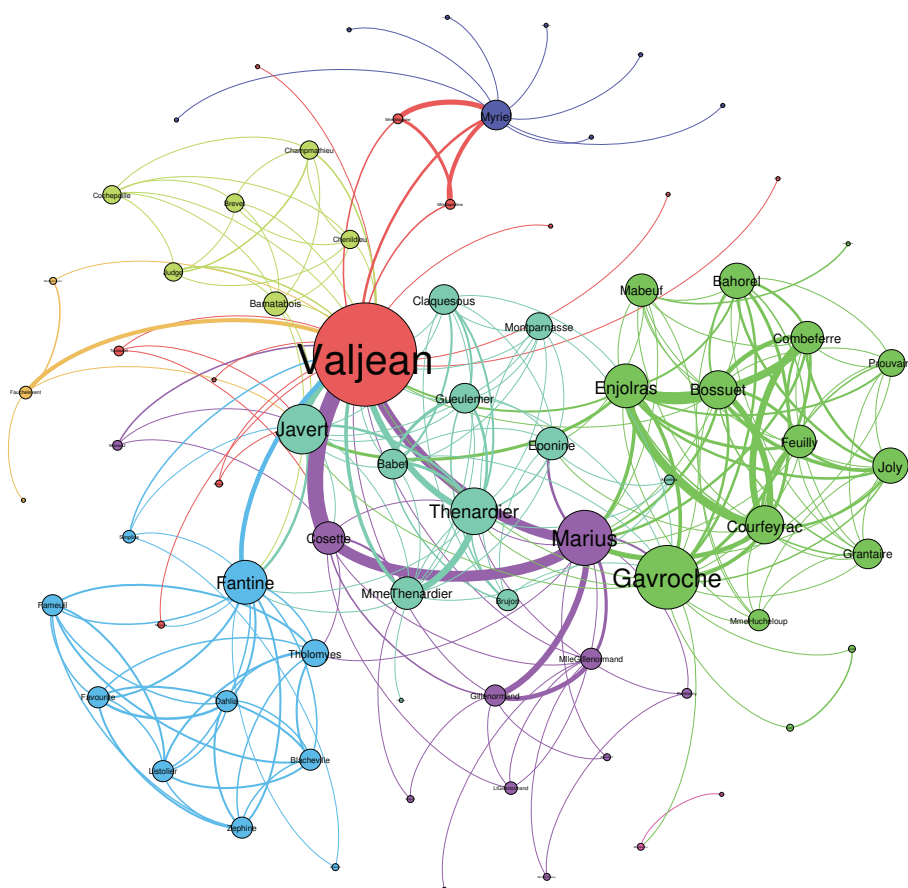


Рис. 3. Сеть межличностных связей героев романа В. Гюго «Отверженные»

На рисунке 3 изображен построенный нами фрагмент безмасштабной сетевой структуры межличностных связей основных персонажей романа Виктора Гюго «Отверженные», имеющей показатель степени $\gamma \approx 6.57$, коэффициент кластеризации $C \approx 0.57$ и среднее межузловое расстояние $\langle l \rangle \approx 2.64$.

Безмасштабные сети музыкальных произведений

Партитура музыкального произведения легко преобразуется в сетевую структуру, если в качестве узлов такой сети взять музыкальные ноты всех возможных длительностей. Нетрудно

подсчитать, что число узлов для одного голоса в такой сети не будет превышать 1 800. В самом деле, число клавишей у рояля равно 88-ми, умножая это число на 20 — число длительностей ноты (половинные, четверти, восьмые и т. д.), получаем 1760. Связи между узлами (нотами) в сети устанавливаются по хронологическому принципу: если нота I начинает звучать в момент времени T, а нота J в этот момент заканчивает свое звучание, то между соответствующими узлами сети имеет место связь.

Ли (Xiaofan Liu), Тсе (Chi K. Tse) и Смол (Michael Small) из политехнического университета Гонконга проанализировали статистические свойства сетей, построенных по описанному выше принципу, для произведений Баха, Моцарта, Шопена и современных китайских композиторов, работающих в жанре поп-музыки. Все эти сети оказались безмасштабными [Liu, Tse, Small, 2010]. Среднее число шагов между узлами в этих сетях варьирует в диапазоне от 2.8 до 4.2. Другие параметры сетей также изменялись довольно значительно для различных произведений.

Нами были построены ориентированные сетевые структуры для всех четырех частей сочинения Л. Бетховена «Большая fuga си-бемоль мажор» для струнного квартетаopus 133». Узлами сети, как и в описанном выше исследовании, брались отдельные ноты различных длительностей, а узлы соединялись стрелкой в направлении от предшествующей ноты к последующей. На рис. 4 показана сеть для первого голоса (скрипки) для четвертой части этого сочинения.

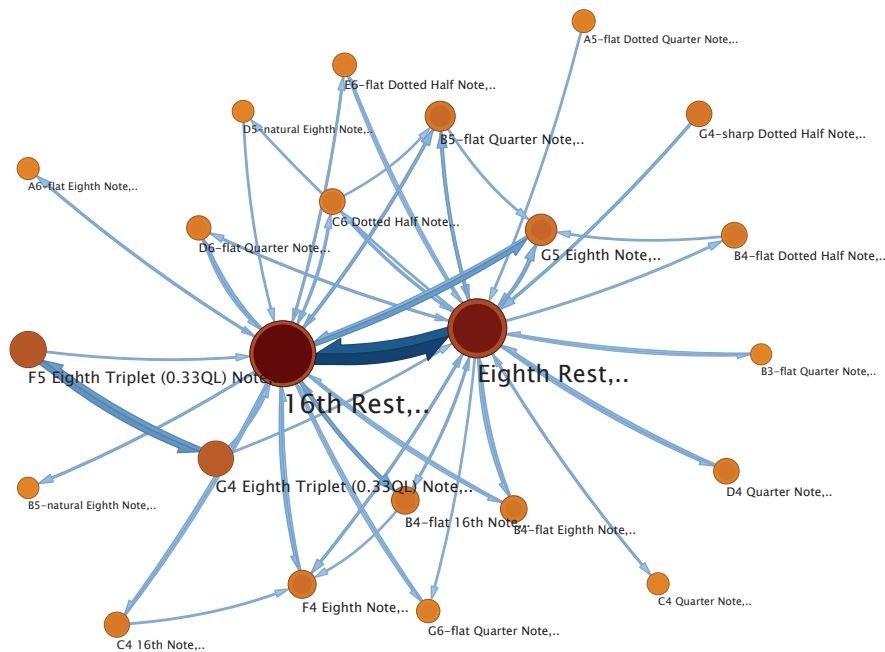


Рис. 4. Фрагмент сети для первой скрипки четвертой части сочинения Л. Бетховена «Большая fuga си-бемоль мажор» для струнного квартетаopus 133»

Показатель степени этой безмасштабной сети равен $\gamma \approx 1.13$.

О сетевой структуре некоторых произведений кубизма

В статье [Hassan et al., 2010] показано, что при случайном разбиении плоскости на непересекающиеся смежные блоки можно построить безмасштабную сеть, в которой узлами будут сами блоки, а связями — общая граница между блоками. В живописи кубистов (Пикассо, Брак, Мондриан и др.) такими блоками чаще всего являются треугольники, квадраты и прямоугольники, но можно найти и другие геометрические и негеометрические формы. Рассмотрим, например, одну из картин голландского художника-кубиста Пита Мондриана (1892–1944) (рис. 5).

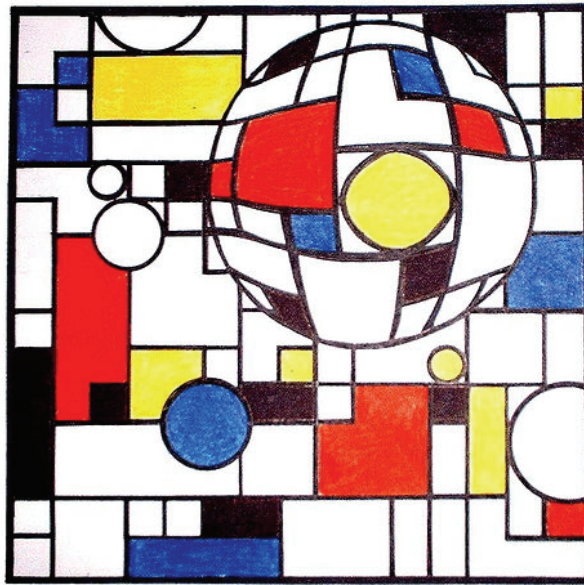


Рис. 5. Пит Мондриан. Композиция, 1921

Распределение узлов по степеням для сети этой картины подчиняется степенному закону $P \propto q^{-\gamma}$. Показатель степени для сети этой картины равен $\gamma \approx 3.2$. Коэффициент кластеризации этой сети $C \approx 0.2$, а среднее межузловое расстояние $\langle l \rangle \approx 3.2$ [Yevin, Shuvalov, 2011].

Картина русского художника Казимира Малевича (1878–1935) «Лесоруб», принадлежащая к живописному стилю кубофутуризма, также легко разбивается на непересекающиеся блоки (рис. 6).



Рис. 6. Казимир Малевич. Лесоруб

Соответствующая сетевая структура также является безмасштабной с $\gamma \approx 1.94$, коэффициентом кластеризации $C \approx 0.37$ и $\langle l \rangle \approx 4.1$.

Подход, описанный здесь, может быть обобщен, если разбивать плоскость картины на области, имеющие один цвет. В этом случае можно исследовать гораздо большее число живописных стилей.

Об ассортативности и других характеристиках когнитивных сетей

Для сетевых структур языка обнаружены как положительные, так и отрицательные значения ассортативности. Хотя для сети героев древнегреческих мифов прямое вычисление ассортативности не проводилось, косвенные данные свидетельствуют, что их структура близка к структуре социальных сетей (подробнее см. [Choi, Kim, 2007]).

Предварительные исследования закономерностей узловой корреляции для других когнитивных сетей показывают, что эти сети по своей структуре ближе к биологическим и технологическим, чем к социальным сетям. Например, сеть социальных связей персонажей романа В. Гюго «Отверженные» имеет коэффициент ассортативности -0.165 . Все четыре сети «"Большая fuga си-бемоль мажор" для струнного квартета опус 133» Л. Бетховена имеют коэффициент ассортативности -0.1 . Для сетей произведений живописи также свойственны отрицательные значения ассортативности. Представляет интерес задача выявления художественных произведений с положительным коэффициентом ассортативности.

Заключение

Поскольку с каждым произведением литературы, музыки и живописи можно соотнести соответствующую сетевую структуру, можно ожидать, что разнообразие когнитивных сетей по крайней мере не меньше, чем технологических, биологических и социальных сетей. Когнитивные сети могут иметь такие сочетания динамических и статистических свойств, которые отсутствуют у реальных сетей — технологических, биологических, социальных. Поэтому, помимо ассортативности, при исследовании когнитивных сетей целесообразно определять максимально возможное число параметров и свойств для сравнения их с сетями других типов. В частности, было бы интересно сравнить управляемость (controllability) когнитивных сетей с другими сетевыми структурами [Liu et al., 2011], а также исследовать закономерности их эволюции.

Обнаружение безмасштабной сетевой организации произведений художественного творчества самой разной природы имеет принципиальное значение для всей теории искусства и эстетики, для понимания природы самого феномена искусства. Структура таких сетей подчиняется универсальной феноменологии критических явлений [Евин, 2008; Евин, 2009; Vak, 1997], что указывает на общность принципов самоорганизации художественных произведений независимо от их видов и жанров с законами эволюции материи. Исследования в этом новом для искусствознания и эстетики направлении находятся лишь в начальной стадии, и здесь можно ожидать новых содержательных результатов.

Особый интерес представляет изучение когнитивных сетей для понимания принципов функционирования мозга. Ведущиеся сейчас исследования по приложению теории сложных сетей в изучении мозга способствовали более глубокому пониманию общих закономерностей взаимодействия различных уровней его структурной организации [Sprons, 2011], а привлечение в эти исследования концепции когнитивных сетей позволит учесть некоторые особенности творческих функций человека.

Список литературы

- Евин И. А. Искусство и синергетика. — М.: Либроком, 2008.
- Евин И. А. Феномен «тесного мира» в искусстве и культуре. // Вопросы культурологии. — 2009. — № 3. — С. 75–78.

- Евин И. А.* Введение в теорию сложных сетей // Компьютерные исследования и моделирование. — 2010. — Т. 2, № 2. — С. 121–141.
- Bak P.* How Nature works. — Copernicus, New York, 1997.
- Caldarelli G.* Scale-Free Networks. Complex Webs in Nature and Technology. — Cambridge University Press, 2007.
- Ferrer-i-Cancho R., Sole R. V.* Small world of human language // Proc. R. Soc. Lond. B. — 2001. — Vol. 268. — P. 2261.
- Grant M., Hazel Z.* Gods and Mortals in Classical Mythology: A Dictionary. — Dorset Press, 1985.
- Hassan M. K., Hassan M. Z., Pavel N. I.* Scale-free network topology and multifractality in a weighted planar stochastic lattice // New Journal of Physics. — 2010. — Vol. 12. — P. 093045.
- Liu X., Tse C., Small M.* Complex network structure of musical compositions: Algorithmic generation of appealing music // Physica A. — 2010. — Vol. 389. — P. 126–132.
- Liu Y.-Y., Slotine J.-J., Barabási A.-L.* Controllability of complex networks // Nature. — 2011. — Vol. 473. — P. 123–248.
- Masucci A. P. and Rodgers G. J.* Network properties of written human language // Physical Review E. — 2006. — Vol. 74. — P. 026102.
- Newman M. E. J.* 2003, Mixing patterns in networks // Phys. Rev. E. 2003. — Vol. 67. — P. 026126, arXiv:cond-mat/0209450.
- Newman M. E. J.* Networks. An Introduction. — Oxford University Press, 2010.
- Solè R. V., Corominas-Murtra B., Valverde S., Steels L.* Language Networks: Their Structure, Function, and Evolution // Complexity. — 2010. — Vol. 15, № 6. — P. 20–26.
- Sporns O.* Networks of the Brain. — The MIT Press, 2011.
- Stiller J., X Nettle D., Dunbar R. I. M.* The small world of Shakespeare's plays // Human Nature. — 2003. — Vol. 14. — P. 397–408.
- Yeon-Mu Ch., Hyun-Joo K.* A Directed Network of Greek and Roman Mythology. // Physica A. — 2007. — Vol. 382. — P. 665–671.
- Yevin I., Shuvalov N.* The Theory of Complex Networks in Painting Studying. In: Unifying Themes in Complex Systems. Volume VIII. Proceedings of the Eighth International Conference on Complex Systems New England Complex Systems Institute. Book Series NECSI Knowledge Press, Editors: Hiroki Sayama, Ali A. Minai, Dan Braha, Yaneer Bar-Yam, p. 751, 2011.
- Harrison Ch.* Visualizing The Bible. —
<http://www.chrisharrison.net/projects/bibleviz/>