

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СОЦИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ
«АБИТУРИЕНТЫ ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА»
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АППАРАТА СЛОЖНЫХ СЕТЕЙ**

© 2018 г. *М.В. Горемыко, И.Р. Плеве, В.В. Макаров, А.Е. Храмов*

Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина, Саратов
vladmak404@gmail.com

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 16-32-00334).

Предложена математическая модель социальной системы «абитуриенты технического университета», основанная на сетевом представлении взаимодействия абитуриентов, поступающих на различные специальности и направления. Исследование временной эволюции структуры социальной сети абитуриентов выявило динамический процесс ее реорганизации, выраженный в увеличении количества связей между структурными кластерами, которые были ассоциированы с факультетами и институтами, входящими в состав университета. Обнаружено, что такая реорганизация связана с изменением предпочтений абитуриентов при выборе специальностей, что может быть в дальнейшем использовано в практических целях увеличения эффективности приемной кампании и профориентации.

Ключевые слова: сложные сети, социальная система, математическая модель, высшее образование.

**THE MODEL OF THE SOCIAL SYSTEM «APPLICANTS
OF THE TECHNICAL UNIVERSITY» VIA COMPLEX NETWORK APPROACH**

M.V. Goremyko, I.R. Pleve, V.V. Makarov, A.E. Hramov

Saratov State Technical University, Saratov vladmak404@gmail.com

The paper presents a mathematical model of the admission campaign of technical university, based on a network representation of the interaction of applicants with each other. The time evolution study of the network structure revealed a process of its significant restructuring, expressed in increasing of the number of connections between the structural clusters associated with the faculties and institutes, affiliated to the university. It has been found that such reorganization is related to the switch in students preferences in specialties selection, what can be practically used to increase the effectiveness of the admission campaign and career guidance.

Key words: complex networks, social networks, mathematical model, high-level education.

1. Введение

Теория сложных сетей является одним из наиболее активно развивающихся направлений современной науки на стыке математики, нелинейной динамики, нейронауки, социологии [1]. Интерес исследователей к базовым закономерностям функционирования таких объектов как сети со сложной топологией связей, а также механизмов, ответствен-

ным за формирование топологии, динамику и эволюцию сетевых структур [2], связан в первую очередь с возможностью практического применения этих знаний в широком круге прикладных задач [3, 4]. Действительно, исследование динамики и эволюции сетевых структур позволяет решить различные прикладные задачи, например, оптимизацию энергетических и транспортных сетей мегаполисов [5, 6], выбор оптимальной транспортной структуры целых стран [7], обеспечение эффективности передачи информации при изменении структуры [8] (например, при выходе из строя части узлов) компьютерных сетей и т.д. Важной проблемой теории сложных сетей являются вопросы исследования структуры и особенностей функционирования нейронного ансамбля головного мозга, который представляет собой чрезвычайно сложный объект – комплекс сетей нейронов с разнообразными связями между ними [9].

Отдельным важным приложением теории сетей является изучение социальных процессов с привлечением сетевых методов и подходов [10, 11]. Одним из ярких примеров приложения теории сетей для моделирования социальных систем является построение моделей и исследование эволюции структуры (в том числе ее устойчивости к удалению тех или иных сегментов) сетей криминальных синдикатов и бандформирований, проводимые с использованием реальных данных о задержаниях преступников, представленных правоохранными органами некоторых стран [12]. Другой пример – исследование сетей цитирования и соавторства в научной среде, которые позволяют путем математического моделирования дать рекомендации по улучшению эффективности взаимодействия различных научных коллективов и групп как внутри одной страны, так и между различными странами [13]. Очевидно, подобное исследование требует тщательного выбора принципов построения моделей сети, содержащих информацию о реальной структуре. Последнее зачастую осложняется ограниченным набором статистических данных, имеющихся в распоряжении исследователей. В связи со сказанным выше, разработка новых методов построения сетевых моделей социальных структур и процессов является актуальной междисциплинарной задачей, привлекающей все большее внимание исследователей.

В данной работе предложена математическая модель сети абитуриентов вуза, основанная на статистических данных о распределении заявлений, поданных на различные направления обучения (специальности) за несколько лет. Актуальность данной работы связана с важностью социальной системы, которая оказывает сильное влияние на функционирование организаций Высшей школы [14], а также возможностью моделирования различных аспектов функционирования подобной системы [15] для улучшения профориентационной работы и, как следствие, улучшения качества абитуриентов, поступающих в технический вуз на инженерные и естественно-научные специальности.

2. Математическая модель

2.1. Статистические данные о социальной системе «абитуриенты технического университета». Исследуемые статистические данные, рассматриваемые в данной статье, представляют собой информацию о приемной комиссии Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю.А. за 2010-2013 годы, а именно, обезличенные данные о направлениях подготовки (специальностях), на которые подавали свои заявления абитуриенты вуза. Исследуемый в качестве примера вуз является крупным учебным заведением, совмещающим в себе как сугубо технические специаль-

ности, так и естественно-научные и гуманитарные направления, что заведомо говорит о сложной структуре взаимодействия между факультетами и институтами, составляющими структуру вуза, и делает рассматриваемые данные привлекательными в контексте математического моделирования и исследования такой социальной сети.

Сводная информация о количестве абитуриентов, направлений подготовки, и поданных на них заявлений приведена в табл.1. Предварительный анализ данных показал, что разделение заявлений, поданных на дневные и вечерние формы обучения и построение отдельных сетей в данном случае представляется нецелесообразным, так как обедняет статистику и не позволяет выделить структурные паттерны, представляющие исследовательский интерес. Также обратим внимание, что в 2010 году в соответствии с правилами приема в вузы Минобрнауки РФ каждый абитуриент мог подать свои заявления на неограниченное количество бюджетных специальностей, тогда как в последующие годы их количество было ограничено тремя. Этим объясняется уменьшение количества поданных заявлений в 2011-2013 годах.

Таблица 1. Статистические данные, полученные в ходе приемной кампании.

	2010	2011	2012	2013
Количество абитуриентов	7600	6988	5688	5826
Количество факультетов/институтов	20	20	20	20
Количество специальностей	241	193	200	212
Количество поданных заявлений	34073	17937	13193	12003
Ограничение по количеству заявлений на бюджетные специальности	нет	3	3	3

2.2. Построение математической модели. Для построения и апробации модельной сети абитуриентов вуза будут использованы данные, соответствующие приемной кампании 2011 года. В разработанной математической модели в качестве узлов социальной сети выступают абитуриенты, подающие свои заявления в вуз. Установление связи между узлами сети (абитуриентами) в данном случае основывается на выборе абитуриентами одинаковых направлений подготовки/специальностей, который диктуется в относительно равной степени индивидуальными склонностями, модой, а также доступностью (количеством бюджетных мест) той или иной специальности. При этом такой принцип задания связи, основанный на локальных характеристиках, может выявить более глобальные тенденции, имеющие место в такой системе. Стоит отметить, что схожий подход был применен в [16] для выделения структурных особенностей в сети мирового музыкального сообщества: связь между музыкантами осуществлялась на основе их коллабораций и жанровой принадлежности. В нашем же случае совпадение специальностей, на которые подали свои заявления два абитуриента, говорит о возникновении вероятности того, что в дальнейшем они будут учиться на одной специальности. В то же время данный индивидуальный выбор является следствием более глобальной конкуренции между описанными выше принципами.

Каждый узел сети (абитуриент) a_n , $n=1, \dots, N$, где N – общее количество абитуриентов, подавших заявления в данном году, ассоциируется с множеством $S_n = \{s_m^n\}$, $m=1, \dots, M$,

где M – количество специальностей, на которые подал заявления абитуриент; s_m^n – специальность, на которую подает заявление абитуриент. Пересечение данных множеств, $S_i \cap S_j$, $i \neq j$, позволяет установить связь между узлами a_i и a_j . Сила (вес) такой связи может быть определена величиной, пропорциональной этому пересечению, – количеству одинаковых специальностей, имеющих у связываемых абитуриентов. Тем не менее, такой подход представляется неоправданным вследствие ограниченного количества заявлений каждого абитуриента, в связи с чем вес связи будет, фактически, дискретным. Исходя из этого, имеет смысл ввести пороговое значение q , определяющее, какое количество общих специальностей нужно, чтобы связать два узла между собой:

$$H(s_k^i, s_l^j) = \begin{cases} 1, & \text{если } s_k^i = s_l^j, \\ 0, & \text{если } s_k^i \neq s_l^j, \end{cases} \quad (1)$$

$$w_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } \sum_k \sum_l H(s_k^i, s_l^j) \geq q, \\ 0, & \text{если } \sum_k \sum_l H(s_k^i, s_l^j) < q, \end{cases} \quad (2)$$

где w_{ij} – вес связи между узлами a_i и a_j , $s_k^i \in S^i$, $s_l^j \in S^j$. Такой тип связи называется бинарным. При построении настоящей модели были рассмотрены три различных пороговых значения, а именно $q=1, 2, 3$.

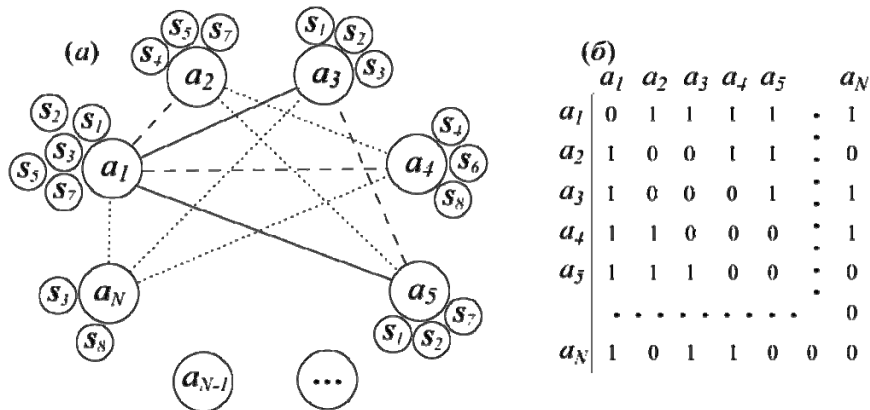


Рис.1. а) Схематичное представление связи между узлами сети в зависимости от порогового значения q : сплошные линии отражают связи, существующие при $q=1, 2, 3$, штриховые линии – $q=1, 2$, пунктирные линии – только при $q=1$. б) Матрица смежности для приведенной сети при $q=1$.

Выбор связи проиллюстрирован линиями на рис.1: в случае, когда $q=3$, существуют только связи (a_1, a_3) и (a_1, a_5) ($w_{1,3} = w_{1,5} = 1$) (сплошные линии) за счет наличия у них трех одинаковых специальностей ($S_1 \cap S_3 = (s_1, s_2, s_3)$, $S_1 \cap S_5 = (s_1, s_2, s_7)$). Уменьшение порогового значения до $q=2$ приводит к появлению связей (a_1, a_2) , (a_1, a_4) и (a_3, a_5) ($w_{1,3} = w_{1,5} = w_{1,2} = w_{1,4} = w_{3,5} = 1$) (штриховые линии) между элементами, имеющими

две одинаковые специальности. Дальнейшее уменьшение q отражается в появлении связей (a_2, a_5) , (a_2, a_4) ($w_{1,3} = w_{1,5} = w_{1,2} = w_{1,4} = w_{3,5} = w_{2,4} = w_{2,5} = 1$) (пунктирные линии) элементов, имеющих одну одинаковую специальность. Полученная структура (граф) может быть представлена в виде матрицы смежности, показанной на рис.1б.

Фактически пороговое значение q представляет собой не что иное, как вес связи: увеличение допустимого веса связи приводит к разрыву слабых соединений. При этом возможна ситуация, когда исследуемая система будет состоять из нескольких несвязанных друг с другом подсетей. Для того чтобы оценить целостность исследуемой сети, были построены визуализации ее структуры при различном параметре q с помощью программного обеспечения с открытым кодом Gephi [17], которые приведены на рис.2. Одиночные узлы, не имеющие связей, исключены из построения на рис.2. Во всех случаях несколько малых групп узлов оказываются оторванными от связанной компоненты сети, но количество элементов, входящих в них пренебрежительно мало. Это говорит о том, что все крупные структурные единицы (кластеры) сети имеют прочные связи между собой.

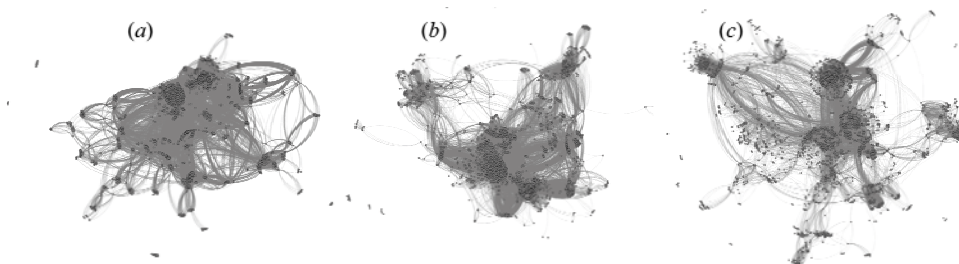


Рис.2. Визуализации модельной сети при увеличении порогового значения связи а) $q=1$, б) $q=2$, в) $q=3$. Визуализации построены с помощью программного обеспечения с открытым кодом Gephi.

Несмотря на это, целесообразным представляется рассмотрение только наибольшей (основной) связанной компоненты сети. Такой подход является типичным при исследовании реальных сетевых структур (в том числе и социальных) и позволяет избежать искажений характеристик исследуемой системы, вносимых большим количеством узлов, не имеющих связей [18]. Так как мы рассматриваем различные значения порогового веса связи, количество узлов и связей в основной компоненте будет сильно отличаться во всех рассматриваемых случаях, соответствующие значения представлены в табл.2. Увеличение параметра q приводит к уменьшению как количества узлов, так и количества связей в основной компоненте, а следовательно, к увеличению процента нерассматриваемых узлов.

Рассмотрим вопрос о том, как влияет выбор порогового значения связи на характеристики полученной модельной сети. Одной из основных статистических характеристик сети, позволяющих оценить ее структуру, является распределение степеней ее узлов. Степень узла k_i представляет собой количество связанных с ним узлов:

$$k_i = \sum_{j=1}^N p_{ij}, \quad (3)$$

где i – номер узла, p_{ij} – значение связи между узлами i и j . Практически все реальные

сети демонстрируют распределение степеней, которое может быть аппроксимировано степенным законом

$$y=x^{-\gamma}. \quad (4)$$

Такое распределение свидетельствует о наличии свойства свободного масштабирования (scale-free network), выраженного в неоднородном распределении связей между узлами и наличии узлов–«хабов», агрегирующих большое количество связей [19]. Такие узлы играют большую роль в процессах распространения информации в сети, а также синхронизации в сетях динамических элементов, и их число крайне мало по сравнению с количеством "периферийных" узлов [19]. Этот феномен является типичным для подавляющего большинства реальных сетей, включая интернет, социальные [9] и нейронные [10] сети.

Таблица 2. Характеристики основной компоненты сети при различных значениях пороговой связи q . Рассматриваемые данные соответствуют приемной кампании 2011 года.

	$q=1$	$q=2$	$q=3$
Количество узлов	6916	5772	4597
Количество связей	2154771	1070494	353816
Доля основной компоненты по отношению к общему количеству узлов	98.9 %	82.5 %	65.7 %

Распределения степеней узлов были построены для различных значений q и показаны на рис.2. Несмотря на некоторые отклонения, все три модельные сети с различным пороговым значением q имеют свойство свободного масштабирования. Такой результат является крайне важным при построении сети, т.к. данное свойство сохраняется при всех выбранных значениях пороговой связи между узлами, что говорит о структурной устойчивости разработанной модели.

Тем не менее, при $q=1$ (рис.3а) хвост распределения, соответствующий большим степеням узлов, сильно отклоняется от степенного закона. Детальное рассмотрение полученных результатов также говорит о некоторых отличиях в статистических свойствах полученных структур. В частности, показатель степени γ растет вместе с пороговым значением связи, достигая значения $\gamma=1.74$ при $q=3$, тогда как наиболее характерными для реальных сетевых структур являются распределения, аппроксимируемые степенным законом с показателями степени, лежащими в диапазоне $2<\gamma<3$ [19]. Перечисленное выше свидетельствует о целесообразности использования большего значения пороговой силы связи q при построении модельной сети.

Для оценки справедливости сделанных выводов был рассмотрен коэффициент кластеризации сети при различных значениях параметра q . Коэффициент кластеризации является мерой, отражающей, насколько плотно сеть заполнена связями, а именно, насколько хорошо связаны друг с другом соседние узлы (узлы i и j называются соседними, если они оба связаны с узлом l). Глобальный коэффициент кластеризации может быть рассчитан с помощью метода, предложенного в [20], как

$$C = \frac{3 \times \text{количество треугольников в сети}}{\text{общее количество триплетов}}, \quad (5)$$

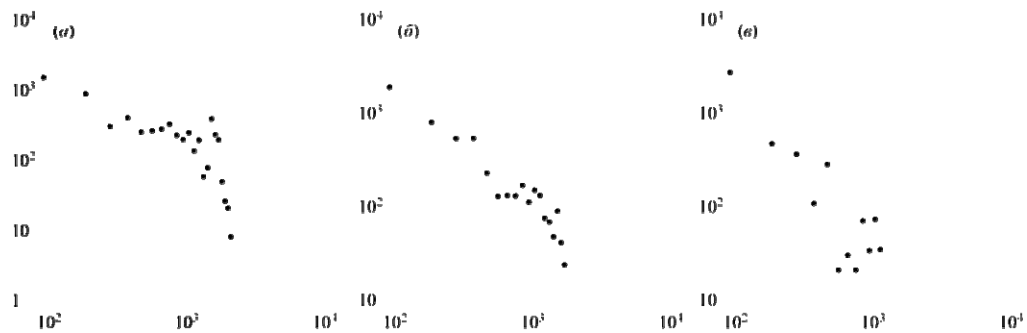


Рис.3. Распределения степеней узлов для различных значений пороговой связи q : а) $q=1$, б) $q=2$, в) $q=3$. Аппроксимации степенным законом $y=x^{-\gamma}$ с использованием метода наименьших квадратов показаны сплошной линией: а) $\gamma=-1.14$, б) $\gamma=-1.3$, в) $\gamma=-1.74$.

где треугольником являются три связанных друг с другом узла, а триплетом является пара узлов, соединенных через другой узел. Каждый треугольник содержит в себе три триплета, чем объясняется число 3 в числителе, и коэффициент кластеризации отражает вероятность того, что соседние узлы в триплете будут связаны между собой. Его значения для различной величины пороговой силы связи приведены в табл.3. Неожиданным фактом является то, что несмотря на уменьшение количества связей с ростом параметра q , глобальный коэффициент кластеризации меняется слабо, более того, $C_{q=3} > C_{q=2}$. Такой результат является положительным и важным, так как свидетельствует о сохранении глобальных характеристик нашей математической модели при изменении параметров ее построения. С другой стороны, данная характеристика является достаточно общей и дает нам лишь среднее значение плотности связей в модельной сети.

Таблица 3. Глобальный коэффициент кластеризации модельной сети для различных значений пороговой связи.

q	1	2	3
C	0.81	0.761	0.784

Чтобы оценить структурные изменения в сети, был рассчитан локальный коэффициент кластеризации, введенный в [21], который показывает плотность связей между соседями каждого узла i :

$$C_i = \frac{\text{количество связей между соседями узла } i}{\text{максимально возможное количество связей между соседями узла } i}, \quad (6)$$

что позволяет оценить распределение плотности связей в системе. Наиболее распространенным представлением локального коэффициента кластеризации является его усредненное значение в зависимости от степени узла, при этом зависимость также зачастую аппроксимируется степенным законом, где $\gamma=1$, что ассоциируется с иерархической природой многих реальных сетей. Но такой подход может приводить к существенной потере информации за счет усреднения в связи с тем, что узлы с одинаковой степенью могут иметь совершенно разные коэффициенты кластеризации. Для того чтобы оценить, какой выбор параметров при построении сетевой модели позволит лучше выделить струк-

турные паттерны реальной сети, нами был предложен метод, основанный на построении распределений локального коэффициента кластеризации в зависимости от степени узла для различных значений q , которые представлены на рис.4.

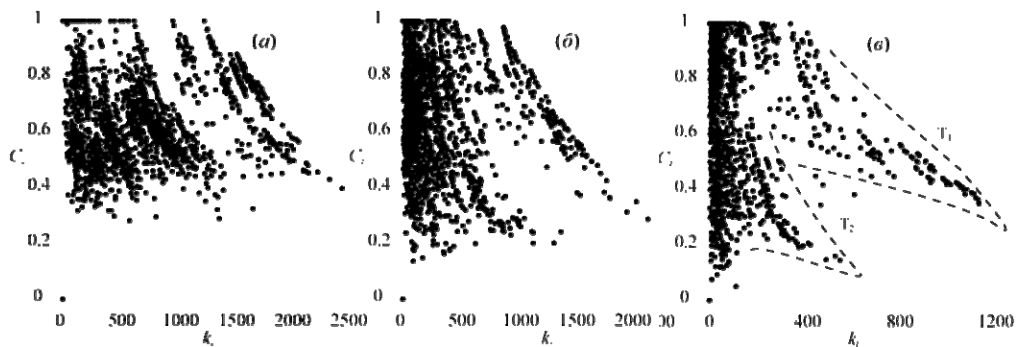


Рис.4. Корреляция между степенью узла и его локальным коэффициентом кластеризации при различных значениях параметра q : а) $q=1$, б) $q=2$, в) $q=3$. Рассматриваемые данные соответствуют приемной кампании 2011 года.

В случае выбора малого значения пороговой силы связи (рис.4а) узлы распределены достаточно равномерно в области $0.35 < C_i < 0.8$, $0 < k_i < 1500$, а также выделяется большая группа элементов в диапазоне $1500 < k_i < 2500$, степень которых растет с уменьшением коэффициента кластеризации. При увеличении пороговой связи элементы начинают концентрироваться в области низких степеней узла и равномерно распределяться вдоль значений коэффициента кластеризации. Также в области высоких степеней узла формируются две ветви, расширяющиеся в сторону уменьшения степени. Дальнейшее увеличение пороговой связи до $q = 3$ приводит к четкому выделению двух ветвей на графике, которые обозначены как T_1 и T_2 и выделены штриховыми линиями. Форма данных ветвей говорит о том, что они соответствуют двум большим иерархическим структурам, находящимся в модельной сети. Анализ узлов, входящих в каждую из ветвей, показал, что они соответствуют элементам-хабам, находящимся в двух различных структурных кластерах, отмеченных на визуализации, представленной на рис.5. Отметим, что по располо-

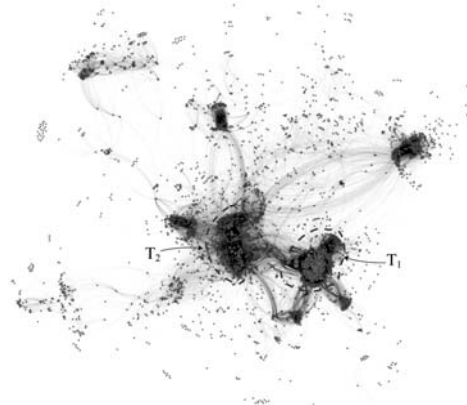


Рис.5. Визуализация структуры модельной сети, полученной при использовании порогового значения связи $q=3$. Размер узла пропорционален его степени. Рассматриваемые данные соответствуют приемной кампании 2011 года.

жению ветвей в координатах (k_i, C_i) можно судить о характеристиках кластеров, к которым принадлежат соответствующие элементы-хабы. В частности, кластер, соответствующей ветви T_1 , включает в себя большее число элементов и имеет большую плотность связей, за счет чего данная ветвь является более выраженной на распределении.

Обнаруженные закономерности свидетельствуют о том, что для построения модельной сети по рассматриваемым данным целесообразным является выбор большего значения пороговой связи $q = 3$ между элементами. Именно такое значение будет использовано при исследовании структуры данной сети в различные годы.

3. Анализ характеристик исследуемой социальной сети с течением времени

Для анализа изменения структуры сети абитуриентов технического университета с течением времени использовались основные связанные компоненты сетей, полученные с использованием порогового значения силы связи $q=3$, для данных о приемной кампании в различные годы. Характеристики исследуемых структур представлены в табл.4. Хорошо видно, что плотность связей в основной компоненте уменьшается с течением времени, но в то же время коэффициент кластеризации остается практически неизменным. Примечательно, что доля узлов, входящих в основную компоненту, по отношению к общему количеству узлов отличается не сильно: среднеквадратичное отклонение данной величины составляет 7.1 %.

Таблица 4. Характеристики анализируемой сети (ее основной связанной компоненты) в различные годы.

	2010	2011	2012	2013
Количество узлов	5418	4597	3076	3742
Количество связей	1295468	353816	84052	76270
Доля основной компоненты по отношению к общему количеству узлов	71.2 %	65.7 %	54.1 %	64.2 %
Глобальный коэффициент кластеризации (C)	0.777	0.784	0.790	0.775

Для исследования эволюции данной сети во времени рассмотрим, как меняется структура распределения локального коэффициента кластеризации в зависимости от степени узла с течением времени. Соответствующие распределения представлены на рис.6. В распределении, соответствующем 2010 году, также хорошо прослеживаются две ветви, которые обладают более четкой структурой по сравнению с 2011 годом: узлы концентрируются на верхней границе ветвей, делая ее практически сплошной. Наличие высокой плотности связей в сети в данном случае обуславливает большое количество узлов с высокой степенью k_i . На распределении, соответствующем 2011 году, данная структура теряет четкость: вследствие уменьшения плотности связей большая часть элементов смещается в область низких степеней узлов. Распределение, соответствующее 2012 году свидетельствует о том, что наблюдаемые ветви начинают стягиваться друг к другу, при этом их верхние границы стремятся к параболической форме. Последнее распределение отражает полное слияние ветвей. Это позволяет судить о том, что в 2013 году исследуемая сеть представляет собой одну иерархическую структуру, что говорит об изменении структуры предпочтений абитуриентов рассматриваемого технического университета относительно выбора направлений подготовки/специальностей.

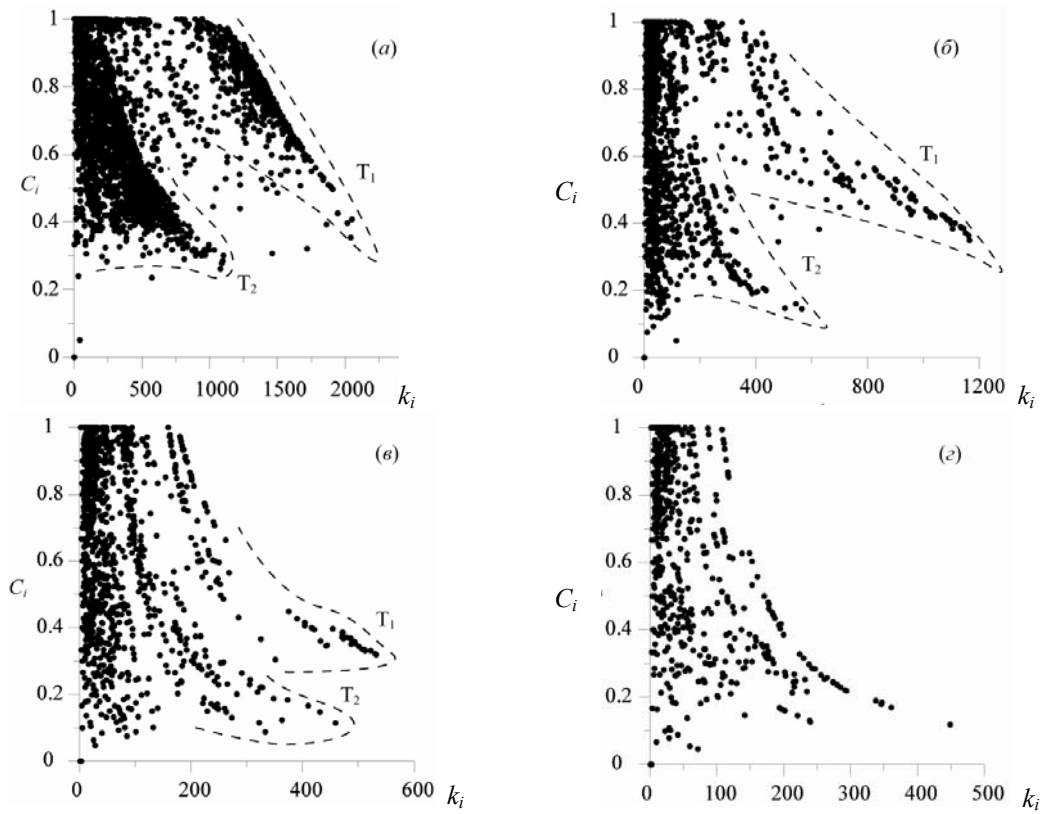


Рис.6. Корреляция между степенью узла и его локальным коэффициентом кластеризации в различные годы: а) 2010, б) 2011, в) 2012, г) 2013.

Чтобы подтвердить такой вывод, были рассчитаны значения второго наименьшего собственного вектора матрицы Кирхгофа исследуемой сети, которая имеет вид

$$K_{ij} = \begin{cases} \sum_{i=1}^N w_{ij}, & \text{если } i = j, \\ -w_{ij}, & \text{если } i \neq j. \end{cases} \quad (7)$$

При условии, что исследуемый граф является связным, собственные числа такой матрицы представляют собой набор:

$$0 = \lambda_1 < \lambda_2 \leq \lambda_3 \leq \dots \leq \lambda_N, \quad (8)$$

где N – количество узлов (размерность матрицы). Нас интересуют значения собственного вектора, соответствующего второму наименьшему собственному числу λ_2 :

$$\lambda_1^2, \lambda_2^2, \dots, \lambda_N^2, \quad (9)$$

который также называется вектором Фидлера и ассоциируется с алгебраической связностью элементов сети [22]. Значение алгебраической связности элемента позволяет оценить его значение (центральность) в графе. Близкие значения центральности, в свою оче-

редь, позволяют судить о принадлежности элементов одному структурному кластеру. Последнее дает возможность оценить структуру сети, упорядочив значения вектора (9).

Зависимости центральности элементов сети показаны на рис.7. Видно, что часть периферийных элементов имеет очень низкую центральность, из-за чего общий вид зависимости становится неинформативным. Поэтому на врезках приведены интересующие нас информативные участки, соответствующие элементам сети с немалой центральностью. Хорошо видно, что в 2010г. сеть имеет четкое разделение на структурные элементы: существует большой кластер (основное плато на рис.7а), соответствующий ветви T_2 (рис.6а), а также ряд кластеров, имеющих большую центральность и соответствующих ветви T_1 . Элементы, расположенные ниже плато, соответствуют периферийным элементам, имеющим малую степень узла k_i (левая граница распределения на рис.6а). В 2011г. границы между плато становятся более плавными (рис.7б), что говорит об увеличении количества связей между структурными кластерами. Это связано с тем, что абитуриенты начинают предпочитать подачу заявлений на разные специальности не только в рамках одного факультета, в основном на специальности разных факультетов, т.к. количество бюджетных специальностей, на которые они могут подать заявления, становится ограниченным (ограничение в подаче заявлений не более чем на 3 направления подготовки/специальности).

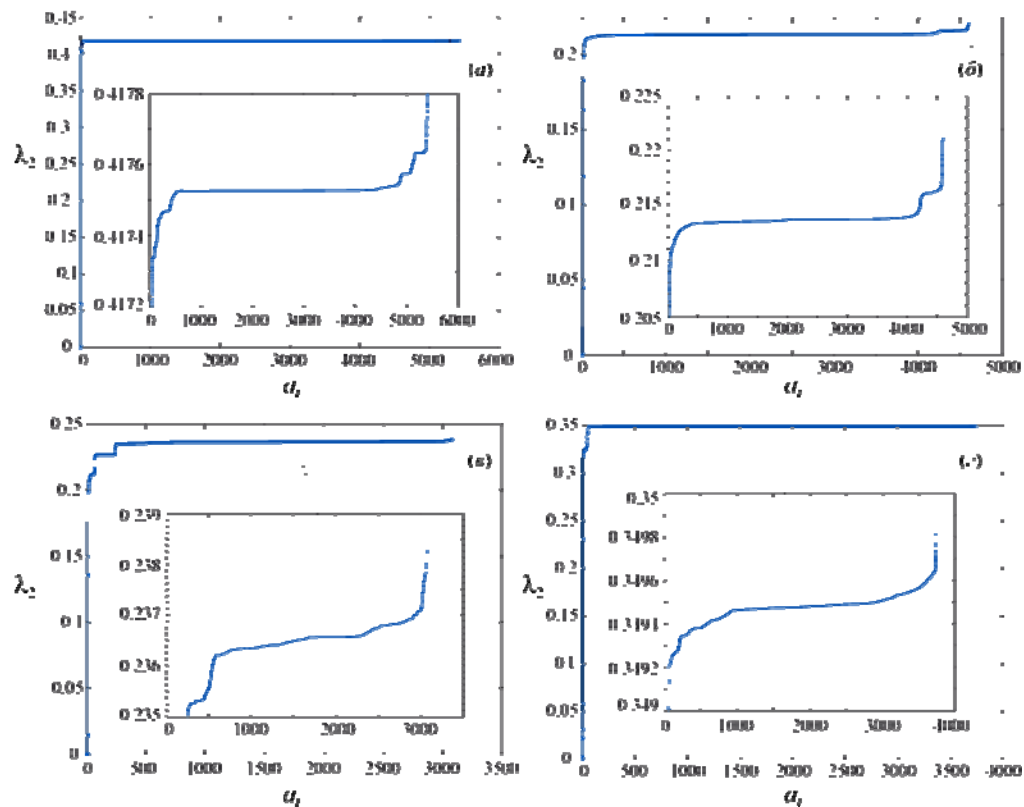


Рис.7. Упорядоченные значения центральности узлов сети в различные годы а) 2010, б) 2011, в) 2012, г) 2013. На врезках показаны увеличенные области, обведенные штриховой линией.

Дальнейшая временная эволюция приводит к искажению основного плато на рис.7в - основной кластер в сети, соответствующий ветви T_2 становится менее однородным. Общий вид зависимости свидетельствует о существенном усилении связи между кластерами. Зависимость, соответствующая последнему анализируемому году, представлена на рис.7г. Она практически не содержит резких скачков: несмотря на наличие большого кластера, структурные единицы, которые фактически соответствуют отдельным факультетам и институтам, имеют хорошую связь между собой. Очевидно, что последнее непосредственно связано с изменением предпочтений абитуриентов, которые начинают стремиться подать заявления на специальности разного профиля, тогда как в 2010г. доля заявлений, поданных на смежные специальности, была существенно выше. Такая временная динамика может быть вызвана введением ограничения на количество заявлений на бюджетные специальности: абитуриентам необходимо делать выбор более тщательно, подавая часть заявлений на специальности с меньшим конкурсом или другим профилем. Эта стратегия, безусловно, способствует лучшему распределению абитуриентов с хорошими способностями (высокими баллами) внутри университета между факультетами и может рассматриваться как фактор, повышающий эффективность приемной кампании.

4. Заключение

В настоящей работе построена математическая модель приемной кампании технического университета на основе аппарата теории сложных сетей и разработан способ задания связи в такой модели. На основе изучения характеристик полученной сети определены оптимальные параметры модели, при которых могут быть выявлены структурные особенности реальной исследуемой системы. Исследование изменения характеристик рассматриваемой сети абитуриентов технического университета с 2010 по 2013 год выявило процесс существенной реорганизации ее структуры, выраженной в увеличении количества связей между структурными кластерами сети, ассоциирующимися с факультетами и институтами, входящими в состав университета. Обнаружено, что такая реорганизация связана с изменением предпочтений абитуриентов при выборе специальностей. В то время как в 2010 году абитуриенты были склонны к выбору смежных специальностей, с течением времени их приоритет смещается в сторону выбора существенно различающихся профилей обучения.

Информация, полученная в настоящей работе, имеет большую важность для оптимизации структуры и специальностей в вузах и корректирования подходов к профориентации абитуриентов. Дальнейшее развитие математических моделей таких социальных систем позволит более точно определять эффективность приемной кампании высшего учебного заведения и разрабатывать рекомендации по оптимизации процесса взаимодействия с абитуриентами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Boccaletti S., Latora V., Moreno Y. et al. Complex Networks: Structure and Dynamics // Phys. Rep., 2006, v.424, p.175.
2. Makarov V.V., Koronovskii A.A., Maksimenko V.A. et al. Emergence of a multilayer structure in adaptive networks of phase oscillators // Chaos, Solitons & Fractals, 2016, v.84, p.23.
3. McPherson M., Smith-Lovin L. & Cook J.M. Birds of a feather: Homophily in Social Networks // Annual Review Sociology, 2001, v.27, p.415.
4. Алешковский И.А., Иванов А.В., Ильин И.В. и др. (под ред. Ильина И.В., Трубецкова Д.И.)

- Моделирование нелинейной динамики глобальных процессов. – М.: Издательство Московского университета, 2010, 412 с.;
- Aleshkovskii I.A., Ivanov A.V., Il'in I.V. i dr. (pod red. Ilina I.V., Trubetskova D.I.) Modelirovanie nelineinoi dinamiki globalnykh protsessov.* – М.: Izdatelstvo Moskovskogo universiteta, 2010, 412s.
5. *Onnela J.P., Saramäki J., Hyvönen J. et al.* Structure and tie strengths in mobile communication networks // *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 2007, v.104, p.7332.
 6. *Гасников А.В., Дорн Ю.В., Нестеров Ю.Е. и др.* О трехстадийной версии модели стационарной динамики транспортных потоков // *Математ. моделирование*, 2014, т.26, № 6, с.34–70.
Gasnikov A.V., Dorn Yu.V., Nesterov Yu.E. i dr. O trekhstadiinoy versii modeli statsionarnoi dinamiki transportnykh potokov // *Matemat. modelirovanie*, 2014, t.26, № 6, s.34–70.
 7. *Tero A., Kobayashi R., Nakagaki T.* A mathematical model for adaptive transport network in path finding by true slime mold // *Journal of Theoretical Biology*, 2007, v.244, № 4, p.553.
 8. *Nishikawa T., Motter A.E.* Maximum Performance at Minimum Cost in Network Synchronization // *Physica D*, 2006, v.224, p.77.
 9. *Bullmore E., Sporns O.* Complex brain networks: graph theoretical analysis of structural and functional systems // *Nature Review Neuroscience*, 2009, v.10, p.186.
 10. *Onnela J. P., Saramäki J., Hyvönen J. et al.* Analysis of a large-scale weighted network of one-to-one human communication // *New Journal of Physics*, 2007, v.9, p.179.
 11. *Петров А.П., Маслов А.И., Цаплин Н.А.* Моделирование выбора позиций индивидами при информационном противоборстве в социуме // *Математ. модел.*, 2015, т.27, № 12, с.137–148;
Petrov A.P., Maslov A.I., Tsaplin N.A. Modeling position selection by individuals during information warfare in society // *Math. Models and Computer Simulations*, 2016, v.8, №4, p.401–408.
 12. *Agreste S., Catanese S., De Meo P. et al.* Network Structure and Resilience of Mafia Syndicates // *arXiv:1509.01608*.
 13. *Hummon N.P., Dereian P.* Connectivity in a citation network: The development of DNA theory // *Social Networks*, 1989, v.11, № 1, p.39–63.
 14. *Стриханов М.Н., Трубецков Д.И., Короновский А.А., Шараевский Ю.П., Храмов А.Е.* Высшая школа России с позиций нелинейной динамики (проблемы, оценки, модели). – М.: Физматлит., 2007, 192 с. ISBN: 5-9221-0774-7.
Strikhanov M.N., Trubetskov D.I., Koronovskii A.A., Sharaevskii Yu.P., Khramov A.E. Vysshaya shkola Rossii s pozitsii nelineinoi dinamiki (problemy, otsenki, modeli). – М.: Fizmatlit., 2007, 192 s. ISBN: 5-9221-0774-7.
 15. *Плеве И.Р., Храмов А.Е., Иванов А.В., Храмова М.В., Москаленко О.И.* Научно-образовательный центр как "точка роста" технического университета // *Высшее образование в России*, 2014, т.5, с.5–11;
Pleve I.R., Khramov A.E., Ivanov A.V., Khramova M.V., Moskalenko O.I. Nauchno-obrazovatelnyi tsentr kak "tochka rosta" tekhnicheskogo universiteta // *Vysshee obrazov. v Rossii*, 2014, t.5, s.5–11.
 16. *Teitelbaum T., Balenzuela P., Cano P. and Javier M. Buldú.* Community structures and role detection in music network // *Chaos*. 2008, v.18, 043105.
 17. *Bastian M., Heymann S., Jacomy M.* Gephi: an open source software for exploring and manipulating networks / *International AAAI Conference on Weblogs and Social Media*, 2009.
 18. *Goh K.-I., Oh E., Kahng B. and Kim D.* Betweenness centrality correlation in social networks // *Phys. Rev. E.*, 2003, v.67, 017101.
 19. *Réka A., Barabási A.-L.* Statistical mechanics of complex networks // *Reviews of modern physics*, 2002, v.74, p.47.
 20. *Wasserman S., Faust K.* Social Network Analysis: Methods and Applications. – Cambridge: Cambridge University Press, 1994.
 21. *Watts D.J., Strogatz S.* Collective dynamics of 'small-world' networks // *Nature*, 1998, v.393, p.440.
 22. *Fiedler M.* Laplacian of graphs and algebraic connectivity // *Comb.&Graph Theory*, 1989, v.25, p.57.

Поступила в редакцию 06.07.2016.