Л.К. Габышева
(*Тюмень*)

О НЕКОТОРЫХ КОНЦЕПЦИЯХ СЕТЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В статье рассматриваются сетевые модели, опирающиеся на представления сетей в виде графов. К их числу отнесены модели малых миров, кластерная модель, модель распределения степеней вершин. Показано, как могут быть рассмотрены некоторые реальные социальные сети в виде сложных сетевых конструкций. Приведены способы вычисления ряда специальных коэффициентов, определяющих важные свойства социальных сетей.

Ключевые слова: социальная сеть, сетевая модель, сетевое моделирование, сетевой анализ, теория графов, структура связей, кластерная модель, коэффициент кластерности, модель распределения степеней вершин, модель малых миров.

В последние годы расширился спектр областей *сетевого моделирования*, методы которого многогранно и плодотворно развиваются, и в этой связи возникает проблема соотношения между существующими концепциями сети и измерениями в ней. Исходим из того, что объектом сетевого моделирования являются *социальные сети*. Такой объект определяется в основном эмпирически, ибо однозначной дефиниции понятия «социальная сеть» не существует.

В социологии о сетях говорят в двух различных смыслах: как о *феномене*, существующем в реальности, и как об *инструмен-*

Людмила Константиновна Габышева – кандидат социологических наук, заместитель директора Технологического института Тюменского государственного нефтегазового университета. E-mail: ludmila@tsogu.ru.

тарии, позволяющем анализировать эту реальность. В первом смысле исследуют содержание и *структуру связей* между акторами, а во втором – *конфигурацию сети*, оценивая силу и частоту связей. Под актороми понимаются субъекты социальных или экономических отношений, например, индивиды, семьи, домохозяйства, государства и т.д.

Понятие социальной сети было введено в 1954 г. Дж. Барнсом («Манчестерская школа») в работе «Классы и собрания в норвежском островном приходе» [1]. Фрагментарно сетевой анализ впервые был использован Г. Зиммелем в его понимании принципиального различия между отношениями в диадах и триадах, а также в его концепции города как системы пересекающихся сообществ [2]. В его «*социальной геометрии*» наиболее важными для социолога являются «*социальные формы*» – структуры социальных отношений.

С точки зрения сетевой теории способом исследования различных социальных структур является анализ связей, объединяющих членов общества. Сетевой подход трактует общество как сеть отношений между людьми, как совокупность форм, схем, способов взаимодействия людей. Действующие субъекты и их поведение рассматриваются с учетом ограничений, накладываемых структурой сети.

Научное осмысление социальных связей происходило в начале XX в. благодаря Дж.Л. Морено [3, с. 53]. Он отмечал, что психологическое благополучие личности зависит от ее места в системе межличностных отношений, которое определяется взаимными симпатиями и антипатиями, интересами и совместным опытом. Как известно, Дж. Морено разработал метод социометрии, основанный на построении социограмм для определения позиции членов группы. Это позволило выстраивать систему предпочтений в группе и вызвало потребность в сетевом анализе, в частности, для определения влияния различных типов сетевых структур на характер взаимодействия в группах.

Толчок к развитию сетевого подхода дала именно социология, а точнее *теория социального обмена*, родоначальником которой считается американский социолог Дж. Хоманс. Его теория основывается на том, что обмен социальными и материальными ресурсами – это фундаментальная форма человеческого взаимодействия. Уходя своими корнями в разные научные направления (культурную антропологию, неоклассическую экономику и психологию), теория социального обмена сфокусировалась на исследовании того, как сила взаимоотношений между индивидами и усилия по достижению баланса в обменных отношениях влияют на модели межличностного взаимодействия.

С точки зрения современной сетевой концепции сеть представляет собой множество *статусных позиций* акторов и связей между ними, которые определяются *потоками* информационных *ресурсов*. Достаточно простые взаимосвязи могут включаться и в комплексные сети, где возможен переход от одних типов ресурсов к другим.

Между парой акторов связь может существовать или не существовать. Она может быть как реальной, так и потенциальной, а ее появление может зависеть от наличия между акторами связей совершенно другого рода. Например, торговые связи между странами возможны, если существуют дипломатические, а дружеские связи между людьми – если существуют знакомства. Важным фактором формирования реальных связей является доверие, оно приводит к возникновению потенциальных связей между акторами. Трансфер ресурсов, общность интересов, обмен информацией, знаниями, взаимное обучение, формальные обязательства, доверие – это примеры разного рода связей.

Социальные сети имеют длинную историю изучения реальных сетей. Модели дружбы между личностями, деловые связи между компаниями и семейные связи – это примеры изучавшихся сетей. Среди ранних работ – построение сети предпочтений (дружбы) внутри малых групп [3], изучение социальных сетей фабричных рабочих в 1930-х гг. в Чикаго [4, с. 152]. *Сеть предпочтений* – это сеть с двумя видами вершин (индивиды и объекты их предпочтения) и ребрами, соединяющими не только индивидов с объектами, но и индивидов между собой по характеру предпочтений. В таких сетях могут использоваться веса, указывающие на силу предпочтения. *Сети сотрудничества* – это сети, в которых участники сотрудничают в группах того или иного вида. Классический пример такой сети – это сеть сотрудничества киноактеров, зарегистрированная в Интернете. Два актера соединены в сети, если вместе участвуют в фильме. Это же относится и к сети директоров компаний, в которой два директора связаны, если они принадлежат одному совету директоров, и к сети соавторства, в которой акторы связаны, если имеют соавторство в одной или более работ.

По мнению М. Грановеттера [5], в современном обществе все пронизано сетями социальных отношений – устойчивыми системами связей и контактов между индивидами. Эти сети неформальных отношений позволяют находить работу, обмениваться информацией, способствуют разрешению конфликтов, минуя судей и адвокатов. В своей работе М. Грановеттер обращает внимание на способы, с помощью которых распространяется информация о рабочих местах. Из эмпирических исследований [6] следует, что более половины тех, кто нашел или сменил место работы, пользовались информацией, полученной из личных неформальных источников. Они оказались значительно важнее объявлений о наличии мест и прямых обращений к работодателю. Выявлено, что люди, опиравшиеся на неформальные источники информации, добиваются относительно большего успеха с точки зрения уровня дохода, удовлетворенности рабочим местом. Чем выше их профессиональный статус, тем чаще они предпочитают сети неформальных социальных контактов, и так называемые *слабые связи* (с дальними знакомыми, коллегами) оказываются эффективнее сильных (с родственниками, близкими друзьями). Слабые связи расширяют масштабы привлекаемой информации, тогда как связи сильные выручают в экстремальных ситуациях, когда нет запаса времени на поиск работы. Успех поиска, таким образом, тесно связан с положением в социальной структуре, с репутацией, развитием контактов. Важным неэкономическим фактором продвижения на рынке труда является аккумулирование связей и контактов наряду с накоплением профессионального стажа. Чем больше таких связей, тем большими возможностями обладает работник с точки зрения вертикальной и горизонтальной мобильности.

Сетевое моделирование, основанное на теории графов

Существуют различные математические способы представления социальных сетей. Предметом нашего исследовательского интереса являются те из них, которые опираются на теорию графов, которая позволяет обозначить многие особенности изучаемых сетевых структур, а также предоставляет набор достаточно простых способов их качественного и количественного описания.

Независимо от способа формализации сетевое моделирование происходит в два этапа. На первом – выявляется структура сети по разным основаниям, например, для интерпретации того, как структура сети воздействует на распространение информации. На втором этапе проводится более глубокий анализ социальных процессов, отображаемых сетью. Следует подчеркнуть, что к проблемам изучения социальных сетей относят субъективность и малый объем выборки (для ограничения размера сети).

Традиционно сбор данных осуществляется методом опроса разного вида. Сетевые взаимодействия между акторами могут быть представлены на разных уровнях агрегирования собранных данных. В этой связи некоторые авторы считают сетевой подход универсальным [7]. Сетевые отношения формализуются, в частности, посредством графов – фигур, имеющих: *вершины,* соответствующие акторам сети, *ребра* – линии, отражающие взаимосвязи вершин, они называются дугами, если ребра направленные (ориентированные).

Простой тип формализованной сети – это ориентированный граф (множество вершин, соединенных дугами). Сеть может иметь различные типы вершин или дуг. Например, в сети, где вершина – индивид, типы вершин могут выделяться в зависимости от пола, возраста, национальности, материальной обеспеченности и т.д. Дуги могут представлять дружбу, враждебность, профессиональное знакомство, географическую близость и т.д. Им могут быть приписаны веса в соответствии, например, с тем, насколько хорошо два человека знают друг друга. В свою очередь веса могут быть ориентированными как граф, отражающий телефонные звонки или переписку по электронной почте (e-mail) между индивидами. Направленные графы могут быть *циклическими* или *ациклическими*, содержать *гипердуги* (дуги, присоединяющиеся к более чем двум вершинам, например, для отражения семейных связей).

В современных представлениях о сетевом моделировании значительную роль играют *кластерная* модель*,* модель *малых миров*, модель *распределения степеней вершин.*

Кластерная модель

Для описания свойств сети используется структурное сходство акторов. Это упрощает сеть, объединяя акторов, схожих по своим сетевым свойствам. Д. Уаттс и С. Строгатц отмечали, что большинство сетей имеют высокую транзитивность – кластерность [8]. Выделение кластеров происходит на основе *коэффициента кластерности* вершины. Его значение одинаково для двух вершин, если они структурно эквивалентны, т.е. имеют одинаковых соседей. Точная структурная эквивалентность практически невозможна. Например, связи между акторами A и B, B и C приводят к связи между A и C. Иными словами, если B имеет двух соседей по сети A и C, то они связаны друг с другом на основании их общей связи с B. Или, в топологических терминах, существует высокая плотность треугольников ABC (в сети), и кластеризация может быть определена количественно измерением этой плотности.

Под сетевой плотностью понимают относительно сильную связанность между разными объединениями в сети. Максимально возможное число связей неориентированного графа равно $\frac{n(n-1)}{2}$, где n – количество вершин графа. Тогда сетевая плотность может быть равной $\Delta = \frac{L}{n(n-1)/2} = \frac{2L}{n(n-1)}$, где L – количество наблюдаемых связей в графе [7]. Например, на рис. 1 представлена сеть дружественных отношений в школах США [9]. Она является направленной, т.е. если некто A говорит, что он друг B, то обратное необязательно верно. В сети выделяются 4 кластера. «Щель» слева направо иллюстрирует расовое расслоение, а «щель» сверху вниз – расслоение между младшими и старшими по возрасту учениками.

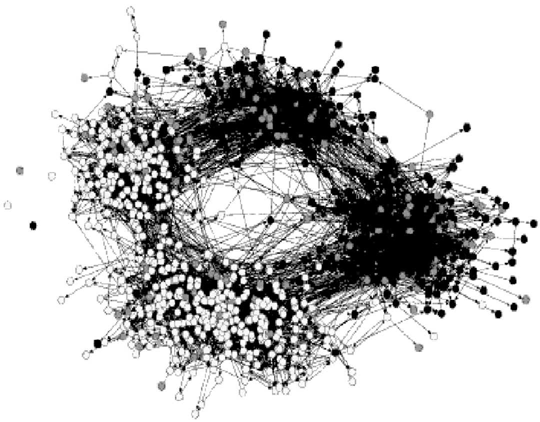

Рис. 1. Сеть дружественных отношений в школах США

Коэффициент кластерности вершины вычислен следующим образом. Для каждой i-й вершины сети состоящей из n вершин подсчитывается величина R_i, равная числу ребер, которые соединяют ее с другими вершинами. Отношение R_i к числу возможных связей равно $\frac{n(n-1)}{2}$ и является значением коэффициента для вершины i: $C_i = \frac{2R_i}{n(n-1)}$.

Модель малых миров

В анализе любых сетей основная задача заключается в выявлении сетевых подструктур – кластеров. Вершины, образующие кластер, связаны между собой сильнее, чем с вершинами других кластеров. Структурирование сети позволяет выделить кластеры, которые в свою очередь могут быть связаны между собой «слабыми связями». Кластеры, соединенные «слабыми связями», и образуют так называемые «малые миры». Пример «сильных связей» – отношения людей с близкими родственниками, «слабых связей» – с дальними родственниками, коллегами.

Именно слабые социальные связи соединяют воедино большую социальную сеть. Если такие связи «убрать» (исключить), то сеть распадется на отдельные кластеры, если же «убрать» сильные связи, сеть останется как целостность. Слабые связи являются тем феноменом, который связывает большое общество в единое целое, и объясняют появление «малых миров», базирующихся на наблюдениях С. Милграма, что между любыми произвольно выбранными людьми существует цепочка знакомств в среднем длиной, равной шести [10].

Эффект «малых миров» наглядно демонстрируется процедурой, представленной Д. Уаттсом и С. Строгатцом [8]. Рассматриваются два состояния сети: регулярная сеть, каждая вершина которой соединена с четырьмя соседними, и та же сеть, у которой некоторые «сильные» связи (ближние) случайным образом заменены «слабыми» (дальними) связями. Во втором случае и возникает феномен «малых миров». Сети знакомств, незаконных и террористических организаций – это типичные примеры поведения *малых миров*.

Модель распределения степеней вершин

Не все вершины сети имеют одинаковое количество ребер. Каждой вершине графа можно поставить значение переменной – *степень вершины,* равное числу соответствующих ей ребер. Распределение переменной описывается функцией $P(k)$ – это вероятность того, что случайно выбранная вершина будет иметь k ребер. Вершины случайного графа имеют приблизительно одинаковое значение по этой переменной, близкое средней степени ($\langle k \rangle$) по сети. Распределение переменной для случайного графа является распределением Пуассона с пиком в $P(\langle k \rangle)$. Вместе с тем эмпирические результаты иллюстрируют значительное отличие от этого распределения. Для многих сетей оно имеет вид: $P(k) \approx k^{-\gamma}$, где $\gamma = const$. Такие сети называют *нешкалированными* (масштабно независимыми).

Данный подход концентрируется на рассмотрении динамики сетей, его развитие должно объяснить происхождение степенного распределения степеней вершин и отклонений от распределения Пуассона, имеющих место в реальных сетях.

Модель многомерной сети

Обратимся к разновидности моделей, предназначенных для генерирования нешкалированных сетей (масштабно независимых), где количество вершин фиксировано [11].

На рис. 2 представлена сеть, описывающая статистическую модель слабых связей, состоящая из вершин и граней, где вершины (грани) представляют акторов (знакомых или их взаимодействие). Так, например, можно предположить, что два человека i и j являются выпускниками средней школы, подгруппа (μ). У них разные значения (массы) $\omega_i^{(\nu)}$ и $\omega_j^{(\nu)}$ по их должности в компании, подгруппе (ν). Тогда актор i имеет разные значения (массы) $\omega_i^{(\nu)}$ и $\omega_i^{(\mu)}$ для разных подгрупп. Для создания модели, копирующей социальное отношение, необходимы элементы, играющие роль «слабых уз». Тем самым, принимая в расчет социальные отношения между людьми с разным происхождением, предполагаем, что дополнительные социальные взаимоотношения формируются в соответствии с максимальными значениями (массами) среди q-компонентов (признаков) каждого актора. Иными словами, придадим значение q-компонента ($\omega_i^{(1)}, \omega_i^{(2)}, \ldots \omega_i^{(q)}$) каждой вершине i. Предположим, что μ-й компонент $\omega_i^{(\mu)}$ вершины i представляет собственное значение и подстраивается до подгруппы (μ) ($\mu = 1, \ldots q$) в обществе.

Проведем грань между парой (i, j), представляющую подгруппу (μ). Для придания модели наглядности эта подгруппа может быть обозначена линией определенного типа (сплошная, пунктирная и пр.) или толщины, а грань между парой (i, k) для подгруппы (ν) – линией другого типа. Тогда вершины сети соединены гранями q разных типов, представляющих разные подгруппы (признаки). Часть вершин $(1 - f)$ соединена в соответствии с этим способом, в оставшуюся часть f добавляется по $(q + 1)$ типу линий, используя максимальные значения среди q-компонентов, которые имеет каждый актор. Грани, сформированные максимальными значениями масс вершин, принадлежащих разным подгруппам, можно рассматривать как слабые связи, играющие важную роль в социальных сетях [6].

Так как общество состоит из множества разных групп и человек может знакомиться с людьми, принадлежащими разным подгруппам, данная модель может быть применена в моделировании социальных сетей.

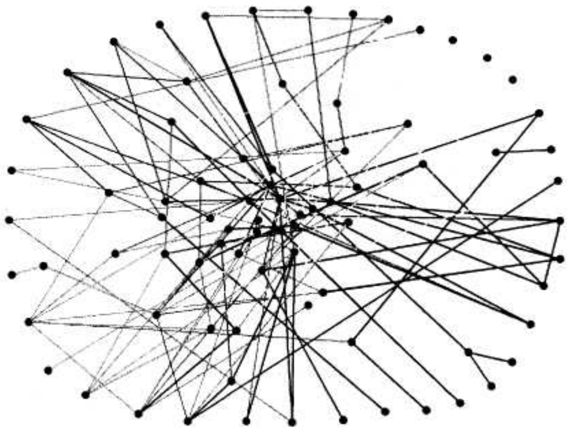

Рис. 2. Модель многомерной сети

На рис. 2 представлена модель сети с числом вершин $N = 80$, сеть является многомерной с числом признаков $q = 4$, выделенных по разным основаниям.

Обратимся к вопросу о распределении степеней вершин в данной сети. Итак, каждая вершина может быть проиндексирована целым числом i ($i = 1, \ldots N$) и наделена собственным значением массы $\omega_i = i^{-\alpha}$, где α – настраиваемый (подгоняемый) параметр. Затем выбираются две вершины (i, j) с вероятностями, равными нормализованным значениям $\omega_i \Big/ \sum_k \omega_k$ и $\omega_j \Big/ \sum \omega_k$, которые соединяются гранью. Этот процесс повторяется до тех пор, пока в системе не будут присутствовать mN граней, так чтобы средняя степень равнялась $2m$. Тем самым это нешкалированная сеть с соответствующим законом распределения степеней, где показатель степени $\gamma = 1 + 1/\alpha$. При значениях α, принадлежащих интервалу $[0,5; 1)$, γ принимает значения $2 < \gamma \leq 3$, при которых модель проявляет сходство с поведением реальных социальных сетей. Модель может быть легко воссоздана и использована для изучения многих аспектов нешкалированных сетей [12].

В случайном графе вершина с высокой степенью k имеет тенденцию быть соединенной (в среднем) с вершинами с низкой степенью и наоборот. Для количественной оценки этого эффекта служит *коэффициент смешанности* r.

Пусть p_k – распределение степени в сети. Степень вершины может быть определена как kp_k. Введем понятие «избыточной» степени, численно равной количеству ребер вершины (граф ненаправленный) минус 1. Вычитая единицу, исключаем ребро, связывающее рассматриваемую ранее вершину с данной, тем самым получая значение так называемых «избыточных ребер» – потенциальных связей с акторами, которые могут принадлежать различным кластерам сети. Распределение избыточной степени имеет вид: $g_k = (k+1)p_{k+1} \Big/ \sum_k kp_k$. Совместная вероятность того, что случайно выбранное ребро присоединяется к вершине с избыточными степенями j, k, равна $e_{jk} = g_j g_k$. Тогда коэффициент смешанности равен $r = \sigma_g^{-2} \sum_{j,k} jk(e_{jk} - g_j g_k)$, где $\sigma_g^2 = \sum_k k^2 g_k - \left[\sum_k kg_k\right]^2$ – дисперсия распределения g_k [13]. Комплексные сети можно классифицировать следующим образом: $r < 0$ (диссортативные), $r \approx 0$ (нейтральные), $r > 0$ (ассортативные). К последним из них относится большинство социальных сетей. В табл. 1 приводятся примеры сетей и значения их параметров, таких как размер сети (N), средняя степень $\langle k \rangle$, диаметр сети d (максимальное расстояние между вершинами), коэффициент смешанности r [11].

Модель проявляет похожие топологические особенности, как у реальных социальных сетей: распределение степеней имеет искаженную форму, диаметр такой же маленький, а коэффициент смешанности такой же положительный и большой, как в реальных социальных сетях, достигающий максимума при $f = 0{,}2$ (рис. 4).

Таблица 1

НЕКОТОРЫЕ ПАРАМЕТРЫ ИЗУЧАВШИХСЯ СЕТЕЙ

Название сети	N	$\langle k \rangle$	d	r
Сооαω ество математиков	78,835	4,16	8,455	0,672
Видеофильмы	29,824	33,69	4,789	0,222
ТВ мини-сериалы	33,980	73,04	3,845	0,379
ТВ сериалы	79,663	118,44	4,595	0,529
Сети поиска раαоты	2410	256,8	26,754	0,817

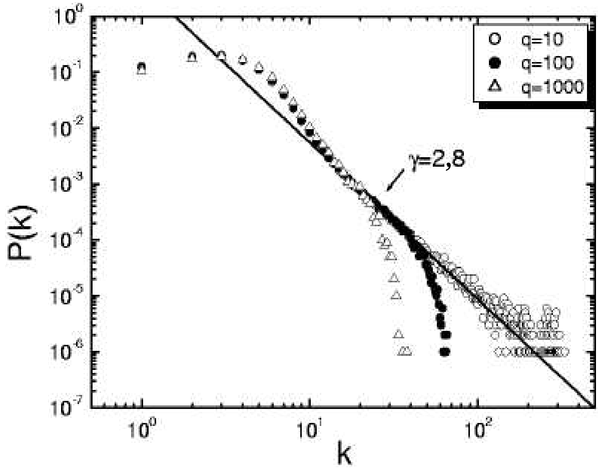

Рис. 3. Зависимость P(k)

Распределение степеней $P(k)$ для сетей, созданных представленным способом, показано на рис. 3. Распределение получено для $N = 10000$, $m = 2$ и $q = 10, 100, 1000$ [11]. Для различных величин параметров q, f, m, N определение диаметра d и коэффициента смешанности r как функции этих параметров, позволяет сделать следующие выводы.

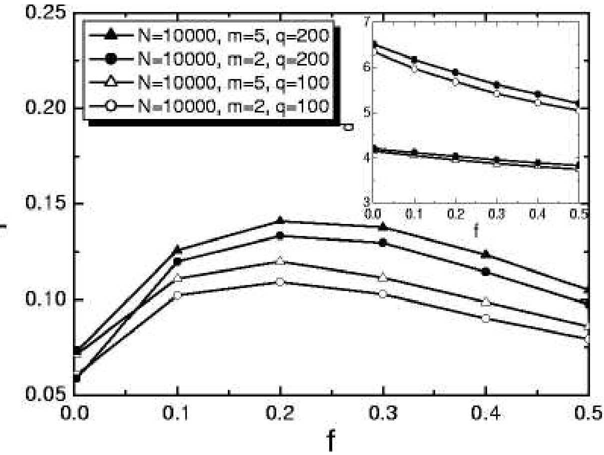

Рис. 4. Зависимость коэффициента смешанности r от параметра f

Во-первых, распределение степени зависит от количества подгрупп в сети. Для маленького q распределение степени следует степенному закону с показателем $\gamma = 2{,}8$, однако при большом значении q оно имеет искаженную форму. Наблюдаемые при больших k искажения возникают из-за случайного поведения каждой подгруппы, что характерно и для реальных социальных сетей.

Во-вторых, представленные на рис. 4 значения коэффициента смешанности r как функции f для фиксированного N и различных величин m и q показали, что коэффициент смешанности проявляет пик при $f \approx 0{,}2$. Отметим также, что с увеличением f диаметр постепенно уменьшается, как показано на вставке рис. 4.

В-третьих, определение коэффициента смешанности r как функции N для разных m и q выявило, что r возрастает с увеличением N, как $r \sim \ln\ln(N)$, как показано на рис. 5, но подавляется для больших N.

Рассматриваемая модель выявляет коэффициенты смешанности такие же большие, как и представленные в табл. 1 для реальных сетей.

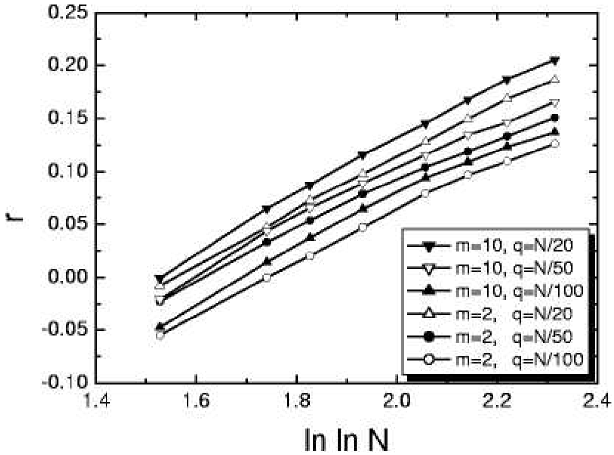

***Рис. 5. Зависимость коэффициента смешанности r от* (ln ln *N*)**

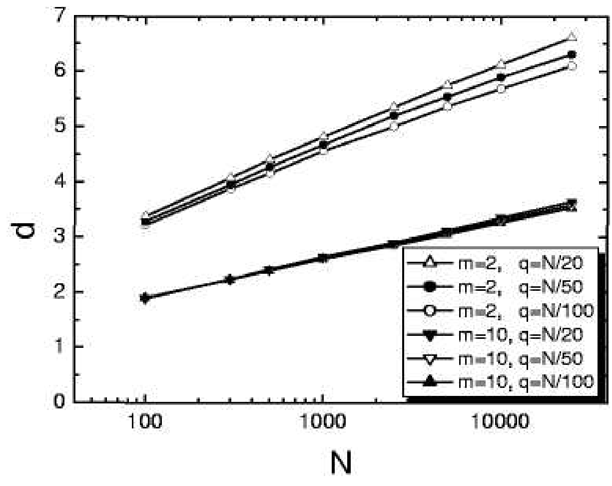

Рис. 6. Зависимость диаметра d от размера сети N

В-четвертых, исследование значений диаметра d как функции числа вершин N для разных m и q (см. рис. 6 [11]) обнаружило, что диаметр d пропорционален $\ln N$, как в случае со случайным графом, в котором $d \sim \ln N / \ln\langle k\rangle$. Более того, диаметр становится меньше при увеличении m, как и в случайных графах, при этом почти не чувствителен к q.

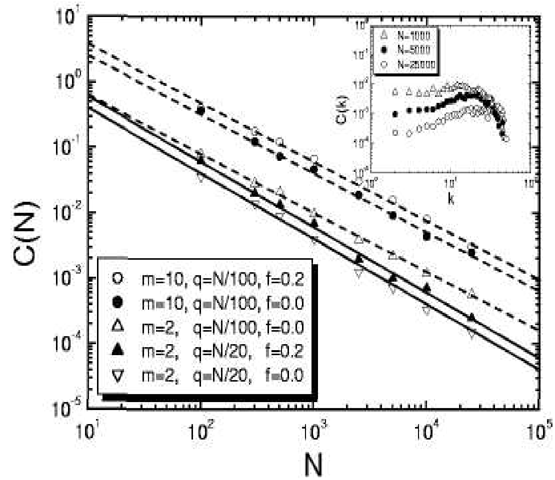

Рис. 7. Зависимость C(N) от размера сети N

Для проверки так называемого «шестистепенного распределения» необходимо экстраполировать прямую линию до большого N для $m = 10$ и $q = N/100$. В результате получим $d \approx 6{,}0$ для $N = 10^8$ и $d \approx 6{,}7$ для $N = 10^9$, что соответствует распределению Милграма. Выбор $m = 10$ и $q = N/100$ исходит из того, что человек знает в среднем около 10 других людей в подгруппе, состоящей из 100 членов.

В-пятых, для нейтральной сети коэффициент кластерности ведет себя как $C(N) \sim N^{(7-3\gamma)/(\gamma-1)}$, при $\gamma = 3$ $C(N) \sim N^{-1}$. Для q-компонентной статистической модели, когда r не равен нулю, правило соединения граней таково, что можно ожидать поведения $C(N) \sim N^{-1}$. Для нейтральных сетей известно, что коэффициент группирования вершины $C(k)$ почти не зависит от k для разных N, как показано на вставке рис. 7 [11].

В заключение отметим, что рассмотренная q-компонентная статистическая модель предполагает, что следует задать значения q-компонента для каждой вершины. Значение компонента вершины отражает вес индивида (актора) в подгруппе. В рамках модели получается диаметр сети знакомств такой же маленький, как в распределении Милграма, и коэффициент смешанности r такой же положительный и большой, как для разнообразных социальных сетей. Более того, получено распределение степеней в искаженной форме, что также напоминает социальные сети реального мира. Коэффициенты кластерности $C(N)$ и $C(k)$ ведут себя, как в нейтральной сети ($r = 0$). Этот недостаток модели можно попытаться устранить посредством введения иерархии для индивидов, входящих в разные подгруппы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Крюкова Е.* Сеть как чудо // Карьера. 2006. № 10(94).

2. *Зиммель Г.* Избранное. Т. 2: Созерцание жизни / Под ред. М. Мильской. М.: Юристъ, 1996.

3. *Морено Я.Л.* Социометрия: экспериментальный метод и наука об обществе. М.: Академический проект, 2001.

4. У истоков НОТ. Забытые дискуссии и нереализованные идеи: социально-экономическая литература 20-30 гг. / Под ред. Э.Б. Корецкого. Л., 1984.

5. *Granovetter M.* The Sociological Approaches to Labor Market Analysis: A Social Structural View // The Sociology of Economic Life / Ed. by I. Granovetter, R. Swedberg. Boulder: Westview Press, 1992. P. 244–245.

6. *Грановеттер М.* Экономическое действие и социальная структура: проблема укорененности // Экономическая социология. 2002. Т. 3. № 3. С. 44–58.

7. *Градосельская Г.В.* Сетевые измерения в социологии: Учебное пособие / Под ред. Г.С. Батыгина. М.: Издательский дом «Новый учебник», 2004.

8. *Watts D.J.* Collective Dynamics of «Small-world» Networks // Nature / Ed. by S.H. Strogatz. 1998. Vol. 393. P. 440–442.

9. *Newman M.* Why Social Networks Are Different Other Types Networks / Department of Physics and Center for the Study of Complex Systems University of Michigan // arXiv: cond-mat/0305612 vl 26 May 2003.

10. *Milgram S.* The Small World Problem // Psychology Today. 1967. Vol. 2. P. 60–67.

11. *Kim D.–H.* The q-component Static Model: Modeling Social Networks // arXiv: cond-mat/0307184 v1 9 Jul 2003 / Ed by B. Kahng, D. Kim.

12. *Бартоломью Д*. Стохастические модели социальных процессов. М.: ФиС, 1985.

13. *Newman M.E.J.* The Structure and Function of Networks // Computer Physics Communications. 2002. Vol. 147. P. 40–45.