

МОДЕЛЬ СРЕДНЕГО ПОЛЯ ДЛЯ ОПИСАНИЯ КОЭВОЛЮЦИИ МНЕНИЙ И СВЯЗЕЙ В СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЯХ

Губанов А.В.

Томский Государственный Университет, Томск, Россия
derzhiarbuz@yandex.ru

Козицин И.В.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия
kozitsin.ivan@mail.ru

Аннотация. В докладе предлагается оригинальная модель, описывающая коэволюцию мнений и связей крупномасштабной социальной сети. Модель представляет из себя систему детерминированных дифференциальных уравнений для средних характеристик сети. Агрегирование динамики мнений и сетевых связей осуществляется на основе предположений конфигурационной модели.

Ключевые слова: социальные сети, модели социального влияния, темпоральные сети, конфигурационная модель.

Введение

Широкое распространение онлайн-социальных сетей привело к тому, что в данный момент они являются одним из основных средств коммуникации, обеспечивающим эффективный и быстрый обмен информацией без каких-либо географических, культурных и экономических барьеров. Информация, которую получает пользователь в онлайн-сетях влияет на его мнение – читая посты новостных источников, а также комментарии своих друзей, пользователи корректируют свои взгляды. Эмпирические исследования указывают на статистически значимую роль социального влияния в процессах формирования мнений. Описанием такого рода процессов занимаются так называемые модели социального влияния. Канонические, эти модели рассматривают динамику мнений закрытой системы из фиксированного числа агентов, которые взаимодействуют друг с другом в рамках статичной социальной сети [1]. Мнения агентов (которые как-правило формализуются с помощью одномерных или многомерных математических конструкций) при этом меняются в соответствии с наперед заданными протоколами [2].

Однако реальные социальные сети (в том числе и онлайн-сети) не являются статичными, а трансформируются со временем – формируются новые знакомства, некоторые из уже существующих связей прерываются. Изучением темпоральных сетей занимается отдельное научное направление, входящее в теорию сетевого анализа [3]. Сложность рассматриваемого объекта хорошо прослеживается по текущему состоянию в данной области – до сих пор не было предложено модели формирования социальных сетей, которая была бы способна воспроизводить весь спектр свойств реальных социальных сетей (степенное распределение степеней вершин, кластеризация, ассортативность, небольшая средняя длина пути и др.) [4].

Последние два десятилетия характеризуются попытками гибридизации моделей социального влияния и моделей формирования сетей с целью описания коэволюции этих двух тесно взаимосвязанных процессов [5]–[7]. С одной стороны, социальные сети формируют структуру, в рамках которой распространяется социальное влияние. С другой стороны, мнения индивидов влияют на структуру сети – люди стремятся взаимодействовать с теми, кто разделяет похожие взгляды (селективность – один из признанных в литературе механизмов формирования сетей). Однако зачастую такие модели коэволюции носят упрощенный характер (а основная цель их создания – понять природу объекта исследования, не претендуя на предсказание его поведения), а параметры, фигурирующие в них трудно измерить на практике.

В данной работе предлагается оригинальная агентная модель, которая рассматривает сетевую структуру (содержательная интерпретация – онлайн-социальная сеть) и описывает коэволюцию мнений агентов относительно важного социально-политического вопроса с двумя опциями ответа (пример – выборы из двух кандидатов) и связей между ними в терминах макро-показателей. Особенностью модели является тот факт, что она характеризует как динамику общественного мнения (численности групп сторонников различных взглядов), так и динамику связей между различными фракциями агентов (как внутригрупповые, так и межгрупповые). Модель представляется системой дифференциальных уравнений, все величины которой могут быть измерены эмпирически. В работе приводятся возможные спецификации модели, обеспечивающие различные уровни детализации рассматриваемой сетевой структуры.

1. Описание модели

Рассмотрим социальную систему, описываемую графом $G = \{V, E\}$, где V – множество вершин, а E – множество рёбер. Вершины представляют агентов социальной сети, а неориентированные рёбра – дружеские связи между ними. Кроме этого, каждая вершина придерживается одного из двух мнений, L или R (содержательная интерпретация: L – левые, R – правые).

Сеть изменяется с течением времени. Эти изменения заключаются в появлении или исчезновении связей, а также в изменении мнений агентов. Модель описывает коэволюцию мнений агентов и связей между ними

Будем считать, что, помимо мнения, на появление/удаление рёбер влияют так же степени вершин в графе. Для простоты предположим, что распределения степеней вершин с левыми и правыми взглядами не зависят от времени. Обозначим их p_k^L и p_k^R (p_k^L – вероятность того, что степень наугад взятой вершины с левыми взглядами равна k). Это довольно сильное требование и о том, что с ним делать, написано ниже в пункте «Проблема распределения степеней».

Переменные, описывающие средние характеристики системы:

- $LL(t)$ – число связей Левый-Левый в момент времени t
- $RL(t)$ – число связей Правый-Левый в момент времени t
- $RR(t)$ – число связей Правый-Правый в момент времени t
- $L(t)$ – число вершин с Левыми взглядами в момент времени t
- $R(t)$ – число вершин с Правыми взглядами в момент времени t

Если общее число вершин в сети постоянно и равно N , то последнюю переменную можно выкинуть, так как $R(t) = N - L(t)$. Данный набор переменных позволяет описывать два интересующих нас аспекта сети: распределение мнений (вычисляется через $L(t)$ и $R(t)$) и структуру их поляризации (вычисляется через $LL(t)$, $RL(t)$ и $RR(t)$).

Все вместе эти переменные образуют фазовое пространство, а динамика конкретной системы будет описываться траекторией в этом фазовом пространстве.

Модель строится на основании двух гипотез относительно процесса создания/исчезновения связей и изменения мнений вершин:

- Вершины связываются друг с другом по правилам конфигурационной модели [8], то есть каждое полурёбро, примыкающее к вершине, равновероятно «выбирает» себе в пару другое полурёбро в сети и это событие не зависит от того, как соединились другие полурёбра.
- В один момент времени с вершиной может произойти только одно событие, то есть вероятность, что на интервале длины Δt с вершиной произойдёт более чем одно событие (например, она поменяет мнение и появится новое, примыкающее к ней, ребро) стремится к нулю быстрее, чем Δt .

Модель представляет из себя систему дифференциальных уравнений относительно фазовых переменных и выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{dLL(t)}{dt} &= N'_{LL+}(t) + N'_{RL \rightarrow LL}(t) - N'_{LL-}(t) - N'_{LL \rightarrow RL}(t), \\ \frac{dRL(t)}{dt} &= N'_{RL+}(t) + N'_{LL \rightarrow RL}(t) + N'_{RR \rightarrow RL}(t) - N'_{RL-}(t) - N'_{RL \rightarrow LL}(t) - N'_{RL \rightarrow RR}(t), \\ \frac{dRR(t)}{dt} &= N'_{RR+}(t) + N'_{RL \rightarrow RR}(t) - N'_{RR-}(t) - N'_{RR \rightarrow RL}(t), \\ \frac{dL(t)}{dt} &= N'_{R \rightarrow L}(t) - N'_{L \rightarrow R}(t), \\ R(t) &= N - L(t), \end{aligned} \tag{1}$$

где $N'_*(t)$ – средние скорости изменения различных количественных характеристик сети, обусловленных микро-параметрами. Например, $N'_{LL+}(t)$ – среднее количество новых связей, возникающих между двумя Левыми вершинами, в единицу времени. $N'_{RL \rightarrow LL}(t)$ – среднее число в единицу времени связей типа RL , превращающихся в связи типа LL из-за того, что какие-то Правые вершины изменили свои взгляды на Левые и примыкающие к ним рёбра стали другого типа.

Члены $N'_*(t)$ зависят как от фазовых переменных, так и от величин, полученных эмпирически при измерении наблюдаемого объекта.

В следующих разделах публикации подробно изложено построение системы (1) и вывод формул для членов $N'_*(t)$.

2. Вероятности и интенсивности перехода

Изменение переменных, описывающих средние характеристики системы (макро-параметры) обусловлено элементарными изменениями системы на микроуровне. Между парами узлов создаются или разрушаются связи, узлы меняют своё мнение. Эти изменения носят вероятностный характер, и вероятности элементарных изменений (точнее, их интенсивности) оцениваются на основании данных, полученных при измерении реального объекта. При этом объект должен быть измерен хотя бы в два различных момента времени. Под измерением объекта подразумевается сбор данных о том, кто из агентов с кем состоит в дружеской связи (измерение социальной сети) и оценка для каждого агента его мнения (измерение мнения).

Из данных, полученных на основании измерения объекта в два момента времени t_0 и t_1 , можно получить вероятности следующих событий:

- $P_{LL+}(l, m)$ – вероятности того, что две не связанные Левые вершины степеней l и m стали связаны;
- $P_{LL-}(l, m)$ – вероятности того, что две связанные Левые вершины степеней l и m стали не связаны.

Аналогично определяются вероятности $P_{RL+}(l, m)$, $P_{RL-}(l, m)$, $P_{RR+}(l, m)$, $P_{RR-}(l, m)$ для появления и исчезновения рёбер Правый – Левый и Правый – Правый. При желании количество факторов, от которых зависит эта вероятность, может быть увеличена (пол, возраст, город проживания).

Кроме появления и исчезновения связей вершины могут менять свои политические взгляды. Обозначим вероятности поменять взгляды с Правых на Левые и с Левых на Правые соответственно $P_{R \rightarrow L}(l)$ и $P_{L \rightarrow R}(l)$, где l – степень вершины.

Для построения уравнений динамики нам необходимы не вероятности появления/исчезновения рёбер или изменения мнения на интервале $[t_0, t_1]$, а их интенсивности. Интенсивность события в момент времени t это предел отношения вероятности того, что событие произойдёт на интервале $[t, t + \Delta t]$ к длине интервала Δt при $\Delta t \rightarrow 0$. В связи с этим необходимо сделать некоторое допущение и предположить, что на промежутке $[t_0, t_1]$ каждая вершина поменяла мнение не более чем один раз, и рёбра между не изменявшими мнение вершинами имели возможность возникнуть или исчезнуть тоже только единожды. То есть считается, что интервал $[t_0, t_1]$ достаточно мал. Тогда интенсивности можно оценить по формулам:

$$\begin{aligned} v_{l,m}^{LL+} &\sim \frac{P_{LL+}(l, m)}{t_1 - t_0}, \\ v_{l,m}^{LL-} &\sim \frac{P_{LL-}(l, m)}{t_1 - t_0}, \\ v_l^{R \rightarrow L} &\sim \frac{P_{R \rightarrow L}(l)}{t_1 - t_0}, \\ v_l^{L \rightarrow R} &\sim \frac{P_{L \rightarrow R}(l)}{t_1 - t_0}, \end{aligned} \quad (2)$$

и так далее аналогично для $v_{RL+}(l, m)$, $v_{RL-}(l, m)$, $v_{RR+}(l, m)$ и $v_{RR-}(l, m)$.

Зная интенсивности, можно записывать вероятность того, что какое-то событие произошло на малом временном промежутке Δt . Например, вероятность того, что на интервале $[t, t + \Delta t]$ вершина степени l сменила взгляды с Правых на Левые будет равна:

$$v_l^{R \rightarrow L} \Delta t + o(\Delta t)$$

Вероятность того, что вершина поучаствует в двух событиях одновременно (например, сменился её мнение и появится/исчезнет примыкающее к ней ребро) будет иметь порядок малости $o(\Delta t)$. Это может быть не верно для безмасштабных сетей, однако реальные социальные сети редко обладают свойством безмасштабности.

3. Уравнение динамики числа рёбер

Получив интенсивности элементарных изменений, приступаем к спецификации членов уравнений системы (1). В системе присутствует два типа уравнений – для динамики числа рёбер и динамики числа вершин. Уравнения одного типа строятся по одинаковому принципу, поэтому здесь подробно рассматривается по одному уравнению каждого типа.

Динамику числа рёбер будем рассматривать на примере $LL(t)$.

Среднее количество рёбер $LL(t + \Delta t)$, соединяющих две Левые вершины в момент времени $t + \Delta t$, будет равно:

- количеству аналогичных рёбер в момент времени t ,
- плюс среднее число рёбер, возникших между двумя Левыми вершинами за время Δt ,
- плюс среднее число рёбер, появившихся в результате того, что какие-то Правые вершины стали Левыми и примыкающие к ним связи RL превратились в LL ,
- минус среднее число разорванных связей между двумя Левыми вершинами,
- минус среднее число рёбер, появившихся в результате того, что какие-то Левые вершины стали Правыми и примыкающие к ним связи LL превратились в RL .

Мы не рассматриваем ситуации, когда рёбра RR превратились в LL (и наоборот), так как вероятность события, что за время Δt две вершины на концах одного ребра поменяют свои политические взгляды, имеет порядок малости $o(\Delta t)$.

В общем виде запишем это как

$$LL(t + \Delta t) = LL(t) + N'_{LL+}(t)\Delta t + N'_{RL \rightarrow LL}(t)\Delta t - N'_{LL-}(t)\Delta t - N'_{RL \rightarrow LL}(t)\Delta t + o(\Delta t) \quad (3)$$

Распишем каждый из членов. Удобнее сперва будет расписать $N'_{LL-}(t)$:

$$N'_{LL-}(t) = \sum_{(i,j) \in \{LL\}} \sum_{l,m} q_l^l q_m^l \cdot v_{l+1,m+1}^{LL-},$$

где внешняя сумма считается по всем существующим рёбрам между парами Левых вершин, а внутренняя представляет из себя математическое ожидание интенсивности $v_{l+1,m+1}^{LL-}$ по всем возможным парам избыточных степеней вершин.

Избыточная степень [8] – это степень вершины, примыкающей к наугад взятому концу ребра минус 1 (поэтому индексы v^{LL-} увеличены на единицу). Таким образом, наугад взятое ребро одним своим концом с вероятностью q_l^l примыкает к вершине степени $l + 1$, а другим с вероятностью q_m^l примыкает к вершине степени $m + 1$. Распределение избыточной степени учитывает тот факт, что наугад взятый конец ребра с большей вероятностью примыкает к вершинам с большей степенью. Данное распределение определяется через распределение степеней по формуле:

$$q_k^l = \frac{k + 1}{\bar{k}_L} \cdot p_{k+1}^l,$$

где \bar{k}_L – средняя степень Левых вершин, а p_k^l – распределение степеней Левых вершин в сети.

Так как внутренняя сумма не зависит от (i, j) , то выражение можно записать как

$$N'_{LL-}(t) = LL(t) \sum_{l,m} q_l^l q_m^l \cdot v_{l+1,m+1}^{LL-},$$

где $LL(t)$ – число существующих рёбер между парами Левых вершин.

Далее. Член $N'_{LL+}(t)$ вычисляется аналогичным образом, но есть некоторые отличия. Во-первых, нужно перебрать не существующие рёбра, а потенциальные рёбра типа LL . Таких рёбер в сети $\frac{L(t)(L(t)-1)}{2} - LL(t)$ штук. Во-вторых, вместо распределения избыточных степеней q_k^l нужно брать другую величину, r_k^l – распределение недостающих степеней. r_k^l обозначает вероятность того, что конец наугад взятого потенциального (не существующего) ребра типа LL примыкает к вершине степени k . Данное распределение учитывает тот факт, что чем больше степень вершины, тем меньше новых рёбер можно к ней провести.

Недостающая степень вычисляется по формуле:

$$r_k^l = \frac{L - 1 - \alpha^L k}{L - 1 - \alpha^L \bar{k}_L} \cdot p_k^l,$$

где $\alpha^L = \frac{LL(t)}{RL(t) + LL(t)}$ – доля левых соседей у левых вершин. Стоит отметить, что если L достаточно велико, а сеть не является плотной ($\bar{k}_L = o(L)$), недостающую степень r_k^l можно приближённо заменить на p_k^l , так как $r_k^l \rightarrow p_k^l$ при $L \rightarrow \infty$ для любого k .

Учитывая вышеизложенное, получаем, что член $N'_{LL+}(t)$ вычисляется по формуле:

$$N'_{LL+}(t) = \left(\frac{L(t)(L(t) - 1)}{2} - LL(t) \right) \sum_{l,m} r_l^L r_m^L \cdot v_{l,m}^{LL+}$$

Теперь рассмотрим член $N'_{RL \rightarrow LL}(t)$. Чтобы посчитать, сколько новых рёбер LL появилось из-за того, что какие-то Правые вершины стали Левыми, нужно перебрать все правые вершины и для каждой из них посчитать среднее число примыкающих рёбер типа RL . Так как наугад взятая Правая вершина имеет случайную степень, распределённую по закону p_k^R , а вероятность того, что наугад взятое ребро, примыкающее к вершине R , связывает её с Лёвым соседом, равна $\frac{RL(t)}{RL(t)+RR(t)}$ (средняя доля левых друзей у наугад взятой правой вершины), то выражение для $N'_{RL \rightarrow LL}(t)$ будет выглядеть как:

$$N'_{RL \rightarrow LL}(t) = \sum_{i \in R} \sum_l p_l^R \cdot \frac{l \cdot RL(t)}{RL(t) + RR(t)} \cdot v_l^{R \rightarrow L}$$

Так как внутренняя сумма не зависит от i , то выражение можно переписать как

$$N'_{RL \rightarrow LL}(t) = \frac{R(t) * RL(t)}{RL(t) + RR(t)} \sum_l l \cdot p_l^R \cdot v_l^{R \rightarrow L},$$

где сумма – ни что иное как математическое ожидание функции $l \cdot v_l^{R \rightarrow L}$ по степени вершины l .

Рассуждая аналогичным образом, получим выражение для $N'_{LL \rightarrow RL}(t)$:

$$N'_{LL \rightarrow RL}(t) = \frac{L(t) \cdot RL(t)}{RL(t) + LL(t)} \sum_l l \cdot p_l^L \cdot v_l^{L \rightarrow R}$$

Вспоминая уравнение (3), перенося $LL(t)$ в левую часть, деля обе части на Δt и устремляя Δt к нулю, получаем уравнение динамики для числа рёбер LL :

$$\frac{dLL(t)}{dt} = N'_{LL+}(t) + N'_{RL \rightarrow LL}(t) - N'_{LL-}(t) - N'_{LL \rightarrow RL}(t)$$

Для $RR(t)$ уравнение динамики строиться аналогичным образом:

$$\frac{dRR(t)}{dt} = N'_{RR+}(t) + N'_{RL \rightarrow RR}(t) - N'_{RR-}(t) - N'_{RR \rightarrow RL}(t)$$

Однако для $RL(t)$ оно будет отличаться, так как если, вследствие перекрашивания вершин, рёбра LL или RR могут получаться только из рёбер RL , то рёбра RL могут получаться как из RR , так и из LL . Точно так же, рёбра RL могут превращаться как в LL , так и в RR . Таким образом, уравнение динамики $RL(t)$ будет иметь вид:

$$\frac{dRL(t)}{dt} = N'_{RL+}(t) + N'_{LL \rightarrow RL}(t) + N'_{RR \rightarrow RL}(t) - N'_{RL-}(t) - N'_{RL \rightarrow LL}(t) - N'_{RL \rightarrow RR}(t)$$

4. Уравнение динамики числа вершин

Динамику числа вершин рассмотрим на примере динамики числа Левых вершин $L(t)$. Среднее количество таких вершин $L(t + \Delta t)$ в момент времени $t + \Delta t$ будет равно:

- количество вершин в момент времени t ,
- плюс среднее число вершин, изменивших мнение с Правого на Левое,
- минус среднее число вершин, изменивших мнение с Левого на Правое.

В общем виде запишем это как

$$L(t + \Delta t) = L(t) + N'_{R \rightarrow L}(t)\Delta t - N'_{L \rightarrow R}(t)\Delta t + o(\Delta t)$$

Член, отвечающий за среднее число вершин, сменивших мнение с Правого на Левое будет вычисляться по формуле

$$N'_{R \rightarrow L}(t) = \sum_{i \in R} \sum_l p_l^R \cdot v_l^{R \rightarrow L},$$

а так как внутренняя сумма не зависит от i , то можно записать:

$$N'_{R \rightarrow L}(t) = R(t) \cdot \sum_l p_l^R \cdot v_l^{R \rightarrow L} \quad (4)$$

Аналогичным образом, изменение мнений с Левого на Правое происходит в соответствии с уравнением:

$$N'_{L \rightarrow R}(t) = L(t) \cdot \sum_l p_l^L \cdot v_l^{L \rightarrow R} \quad (5)$$

Переносим в уравнении (16) $L(t)$ в левую часть, делим на Δt и устремляем Δt к нулю получаем:

$$\frac{dL(t)}{dt} = N'_{R \rightarrow L}(t) - N'_{L \rightarrow R}(t) \quad (6)$$

Можно видеть, что в уравнениях (4) и (5) отсутствует явная связь с фазовыми переменными $LL(t)$, $RR(t)$ и $RL(t)$. То есть мнения изменяются независимо от того, в какой пропорции в сети присутствуют внутригрупповые и межгрупповые связи (какова степень поляризации мнений). То, каким образом добавить в модель учёт эффекта социального давления на изменение мнения, разбирается в пункте 5.

4. Проблема распределения степеней

Слабым местом в данной модели является распределение степеней. Может оказаться, что со временем общее число связей растёт либо, наоборот, уменьшается, поэтому разумно аппроксимировать распределение некоторой известной функцией, желательно такой, которую можно вычислить на основании средней степени. В свою очередь, средняя степень в каждый момент времени вычисляется исходя из числа вершин и рёбер по формулам:

$$\bar{k}_L(t) = \frac{2LL(t) + RL(t)}{L(t)},$$

$$\bar{k}_R(t) = \frac{2RR(t) + RL(t)}{R(t)}.$$

Кроме этого, можно ввести дополнительное упрощение (если данные позволяют это сделать) и предположить, что интенсивности перехода не зависят от степеней вершин, то есть $v_{l,m}^{LL+} = v^{LL+}$, а $v_l^{R \rightarrow L} = v^{R \rightarrow L}$.

Тогда члены уравнений перехода упростятся и примут следующий вид:

$$N'_{LL+}(t) = \left(\frac{L(t)(L(t) - 1)}{2} - LL(t) \right) v^{LL+},$$

$$N'_{LL-}(t) = LL(t) v^{LL-},$$

$$N'_{RL \rightarrow LL}(t) = \frac{R(t) * RL(t)}{RL(t) + RR(t)} \cdot v^{R \rightarrow L} \cdot \bar{k}_R(t),$$

$$N'_{LL \rightarrow RL}(t) = \frac{L(t) * RL(t)}{RL(t) + LL(t)} \cdot v^{L \rightarrow R} \cdot \bar{k}_L(t), \quad (7)$$

$$N'_{R \rightarrow L}(t) = R(t) \cdot v^{R \rightarrow L},$$

$$N'_{L \rightarrow R}(t) = L(t) \cdot v^{L \rightarrow R}.$$

5. Учёт социального давления

Из уравнений (4, 5, 6) видно, что динамика количества узлов, придерживающихся того или иного мнения, не зависит от динамики числа рёбер разного типа, тогда как число рёбер зависит от числа узлов. Так получается из-за того, что в модели не учитывается социальное давление, которое обусловлено наличием в окружении пользователя людей с противоположным мнением.

Социальное давление можно учесть, введя в эмпирически измеряемые интенсивности $v_l^{L \rightarrow R}$ и $v_l^{R \rightarrow L}$ зависимость от числа соседей с противоположным мнением.

Обозначим через n_l^R число Правых соседей у наугад взятойлевой вершины степени l . Это случайная величина, принимающая значения от 0 до l . Зависимость интенсивности смены взглядов с Левых на Правые от этой величины запишем как $v_l^{L \rightarrow R}(n_l^R)$.

Исходя из предположения конфигурационной модели и зная количество рёбер разного типа, можно определить вероятность того, что n_l^R в момент времени t принимает значение i :

$$p(n_l^R = i, t) = C_l^i \cdot \left(\frac{RL(t)}{LL(t) + RL(t)} \right)^i \cdot \left(\frac{LL(t)}{LL(t) + RL(t)} \right)^{l-i}$$

Это схема Бернулли, где вероятность события «ребро, исходящее излевой вершины, примыкает к вершине с Правыми взглядами» равняется

$$\frac{RL(t)}{LL(t) + RL(t)}$$

Исходя из этого, в каждый момент времени t можно посчитать среднюю интенсивность смены взглядов вершин степени l с Левых на Правые:

$$\bar{v}_l^{L \rightarrow R}(t) = \sum_{i=0}^l v_l^{L \rightarrow R}(i) \cdot p(n_l^R = i, t)$$

Тогда формула для скорости смены взглядов в сети с Левых на Правые с учётом социального давления будет записываться как:

$$N'_{L \rightarrow R}(t) = L(t) * \sum_l p_l^L \cdot \bar{v}_l^{L \rightarrow R}(t)$$

Аналогичным образом,

$$N'_{R \rightarrow L}(t) = R(t) * \sum_l p_l^R \cdot \bar{v}_l^{R \rightarrow L}(t)$$

6. Апробация модели

Модель с упрощёнными формулами вычисления членов уравнений (7) была апробирована на данных, полученных в результате наблюдения за изменениями мнений и социальных связей между жителями одного российского города. Размер сети 27861 узлов. Каждый узел принимает одно из двух мнений (L – левое, R – правое). Сеть измерена дважды с интервалом в полгода. На основании измерений оценены интенсивности перехода (2) и смоделированы траектории изменений фазовых переменных.

Интерес представляет то, как в сети меняется поляризация мнений. Явление поляризации заключается в том, что люди с одинаковыми взглядами гораздо чаще связаны между собой, чем люди с различными взглядами. Это может приводить, в частности, к неверной оценке числа представителей различных мнений в обществе, если человек основывается на своём личном опыте и своём окружении.

Для отображение этого эффекта на рисунке 1 приводятся величины того, во сколько раз в среднем доля соседей вершины с определённым мнением отличается от таковой по популяции. К примеру, кривая R -> R показывает, во сколько раз доля Правых соседей у вершины с Правыми взглядами отличается от доли Правых вершин в популяции. Как видно из графика, на момент измерений Левые вершины, в среднем, почти в 2 раза переоценивают число других Левых вершин, и несколько недооценивают число Правых. Однако, тенденции изменения мнений и связей таковы, что в будущем эта переоценка «своих» и недооценка «чужих» должна сгладиться. Для Правых вершин, наоборот, их переоценка количества Правых немного вырастет. Таким образом, Левые в перспективе станут менее замкнуты на себя, а Правые – чуть более.

Рисунок так же свидетельствует о том, что изменения в системе происходят довольно медленно, и для выхода на стационарный режим (при сохранении динамики микро-изменений в системе) требуется более 10 лет.

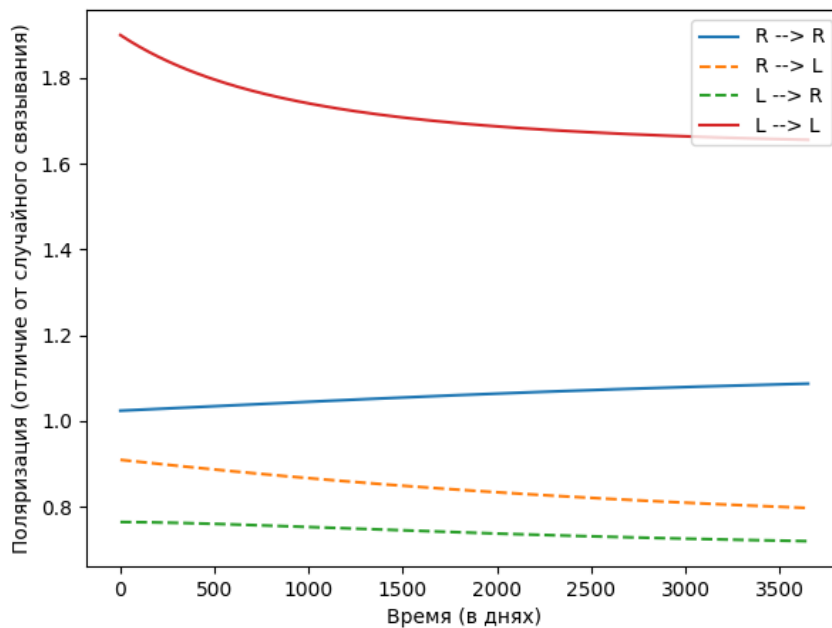


Рис. 1. Зависимость отличия доли соседей вершин с различными мнениями от их истинной доли в популяции. Кривая R- →R показывает, во сколько раз доля соседей Правых вершин, в среднем, больше, нежели доля правых вершин в популяции. Аналогичным образом интерпретируются R- →L, L- →R и L- →L. Видно, что Правые вершины имеют более реалистичное (с точки зрения представленных мнений) окружение, чем Левые, однако со временем ошибка Левых вершин имеет тенденцию уменьшаться, а Правых – немного увеличиваться

7. Заключение

В публикации представлена агентная модель коэволюции мнений и связей в социальной сети для случая, когда мнение принимает одно из двух значений, а рёбра могут быть трёх разных типов – два типа внутригрупповых (Левый-Левый, Правый-Правый) и один межгрупповой (Правый-Левый). Данную модель можно усложнять, увеличивая количество возможных мнений и добавляя новые модальности (например, пол, возраст и так далее), что достигается механическим увеличением количества групп, на которые разбиваются вершины, и введением новых типов рёбер.

Модель предполагается использовать для прогнозирования динамики активных сетевых структур, в качестве нулевой модели для выявления моментов, в которые система резко поменяла своё поведение (индикатор искусственного вмешательства), аналитических исследований с целью выявления состояний динамического равновесия и влияния на него различных факторов.

В дальнейшем планируется провести оценку качества работы модели на лонгитюдных датасетах. Также перспективным видится разработка альтернативных спецификаций модели, учитывающих различные механизмы формирования сетей.

Литература

1. Das A., Gollapudi S., Munagala K. Modeling opinion dynamics in social networks // Proceedings of the 7th ACM international conference on Web search and data mining. – 2014. – P. 403-412.
2. Flache A., Mäs M., Feliciani T., Chattoe-Brown E., Deffuant G., Huet S., Lorenz J. Models of social influence: Towards the next frontiers // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. – 2017. – Vol. 20. – №. 4. <http://jass.soc.surrey.ac.uk/204/2.html>.
3. Neubaum G., Cargnino M., Winter S., Dvir-Gvirzman S. “You’re still worth it”: The moral and relational context of politically motivated unfriending decisions in online networks // PloS one. – 2021. – Vol. 16. – №. 1. – e0243049. – P. 1-20.
4. Kozitsin I.V., Gubanov A.V., Sayfulin E.R., Goiko V.L. A nontrivial interplay between triadic closure, preferential, and anti-preferential attachment: New insights from online data // Online Social Networks and Media. – 2023. – Vol. 34. – 100248. – P. 1-51.
5. Holme P., Newman M. E. J. Nonequilibrium phase transition in the coevolution of networks and opinions // Physical Review E. – 2006. – Vol. 74. – №. 5. – 056108. – P. 1-5.

6. *Frasca P., Tarbouriech S., Zaccarian L.* Hybrid models of opinion dynamics with opinion-dependent connectivity //Automatica. – 2019. – Vol. 100. – P. 153-161.
7. *Kozitsin I. V.* A general framework to link theory and empirics in opinion formation models // Scientific reports. – 2022. – Vol. 12. – №. 1. – P. 1-18.
8. *Newman M. E. J.* Networks: an Introduction. Oxford University Press, New York, USA. – 2010. – P. 369-416.