

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СООБЩЕСТВА В СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЕВЫХ СТРУКТУРАХ.

Ч. 1. От основного понятия к математическим моделям формирования¹

Д.А. Губанов, И.В. Петров

Аннотация: Представлен обзор исследований, связанных с информационными сообществами во взаимодополняющих направлениях: модели формирования информационных сообществ в социальных сетевых структурах и прикладные аспекты выявления и анализа информационных сообществ в социальных сетевых структурах. В рамках первого направления рассматриваются математические модели формирования информационных сообществ в условиях неопределенности, в которых индивиды стремятся прийти к истинному представлению относительно интересующего их вопроса. Наиболее релевантными здесь являются модели динамики представлений, в которых представления узлов изменяются под влиянием других узлов сети и учитываются факторы (в частности, топология сети и ограничения рациональности индивидов сети), ведущие к формированию информационных сообществ. В первой части обзора дано понятие информационного сообщества, изложен процесс обработки информации и принятия решений агентом в социальной сети в условиях внешней неопределенности, выделены факторы, влияющие на формирование информационных сообществ в сети. Исследованы базовые модели динамики представлений с байесовскими агентами и их расширения.

Ключевые слова: социальные сетевые структуры, информационное сообщество, формирование информационных сообществ, выявление информационных сообществ, формирование представлений.

ВВЕДЕНИЕ

Интернет и онлайн-социальные сети открыли большие возможности для эффективного производства, распространения и потребления информации в обществе, и, следовательно, возможности для рационального обсуждения различных вопросов и формирования взвешенных мнений по ним. Однако, как оказалось, доступность и разнообразие источников информации и представленных в них альтернативных точек зрения не приводит автоматически к повышению качества получаемой информации и компетентности людей в общественно важных вопросах. Напротив, по многим вопросам в обществе происходит расхожде-

ние представлений и формирование отдельных сообществ с различными, нередко диаметрально противоположными точками зрения на одни и те же вопросы. Объясняется это тем, что участники социальной сети не являются полностью рациональными агентами, эффективно агрегирующими информацию по интересующим их вопросам, поскольку на обработку информации индивидами оказывают существенное воздействие социально-психологические факторы.

Во многих предметных областях выявление и исследование в социальных сетях *информационных сообществ* — множеств индивидов, обладающих близкими и устойчивыми представлениями по некоторому вопросу — является важной задачей. Например, в социологии и политологии считается, что формирование изолированных сообществ (информационных пузырей и эхо-камер) представляет угрозу для общества. Эмпирические исследо-

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-17-50225.

вания показывают наличие самых разнообразных информационных сообществ в социуме (например, поляризованных сообществ республиканцев и демократов в США). В этих исследованиях изучаются различные аспекты: получение пользователем альтернативной информации в зависимости от предпочтений его контактов в сети и алгоритмов онлайн-социальной сети [1], взаимодействие сообществ с разными представлениями [2], информационные роли пользователей [3] и др. Для исследования чаще всего применяются статистические методы и методы машинного обучения (например, методы корреляционного и кластерного анализа), а также методы социально-сетевых анализов, опирающиеся на феномен гомофилии² [1–5]. Применение таких методов требует предварительной обработки данных и последующей интерпретации полученных результатов, т. е. исследователь должен иметь представление о закономерностях динамики мнений в социальных сетях и о существовании в них информационных сообществ. Особенности обработки информации индивидом исследуются в области когнитивистики, психологии и социальной психологии (см., например, работу [8]), а для моделирования динамики представлений в сетях с учетом этих особенностей разрабатываются формальные микроуровневые модели ограниченного рациональных агентов (см., например, работы [9–13]). На практике применять эти модели для выявления сообществ непросто из-за принятых упрощений и предположений, сложности идентификации параметров моделей и отсутствия четко сформулированного понятия информационного сообщества.

Цель настоящего обзора состоит в рассмотрении моделей формирования информационных сообществ в социальных сетях (имеющих как микроэкономические, так и когнитивные и социально-психологические основания) и методов их выявления. Обзор состоит из трех частей. Структура первой части обзора такова: в § 1 дано определение информационного сообщества; в § 2 кратко рассмотрен процесс обработки информации и принятия решений агентом в социальной сети в условиях внешней неопределенности, выделены факторы, влияющие на динамику представлений в социальной сети и — в итоге — на формирование информационных сообществ в сети; в § 3 кратко рассмотрены формальные модели динамики представлений с байесовскими агентами, которые ведут к формированию информационных сообществ.

² Исследования гомофилии активно ведутся в социологии (в частности, изучение свидетельств ее наличия и причин возникновения — см., например, работы [6, 7]). В настоящей статье мы не претендуем на обзор результатов, полученных в социологии.

1. О ПОНЯТИИ ИНФОРМАЦИОННОГО СООБЩЕСТВА

Понятие сообщества (community) является довольно нечетким, оно часто используется неформально. Приведем некоторые из имеющихся определений. Сообщество — «объединение людей, народов, государств, имеющих общие интересы, цели» [14]. Сообщество можно рассматривать:

- как объединение индивидов:
 - как группу людей с общими характеристиками или интересами, живущих вместе в пределах большего общества,
 - как совокупность индивидов с общими интересами, распределенных по всему обществу,
 - как объединение людей или наций, имеющих общую историю или общие социальные, экономические и политические интересы;
- как общество в целом [15].

В качестве примеров сообществ можно привести научное сообщество и языковое сообщество.

Из определений сообщества прежде всего следует общность характеристик индивидов, входящих в него. Этот эффект тесно связан с *гомофилией* — склонностью индивидов формировать связи на основании общности характеристик [6, 7]. С этой точки зрения существует прямая связь с определением в теории сложных сетей, в котором сообществом называют множество узлов, преимущественно связанных друг с другом, нежели с узлами других сообществ [16]. В рамках данной работы авторы интересуются такими характеристиками индивидов, как их представления относительно тех или иных вопросов (проблем). Поэтому будем понимать *информационное сообщество* как совокупность индивидов, являющихся участниками социальной сети и объединенных общими устойчивыми представлениями³ относительно заданных вопросов (см. введенное нами формальное определение сообщества в докладе [17]).

Для описания и объяснения динамики формирования информационных сообществ в социальных сетях необходимы соответствующие модели динамики представлений индивидов. Здесь можно выделить два типа значимых динамических процессов в социальных сетях (рис. 1): процесс изменения представлений индивидов сети (состояния сети) в рамках фиксированной топологии и процесс изменения топологии сети, когда состояние сети «воздействует» на топологию (единомышленники начинают чаще взаимодействовать друг с другом). Обычно считается, что динамика топологии происходит в медленном времени, а динамика состояний — в быстром. Наиболее интересными и

³ Термины «представление», «мнение» и «убеждение» рассматриваются как синонимы.

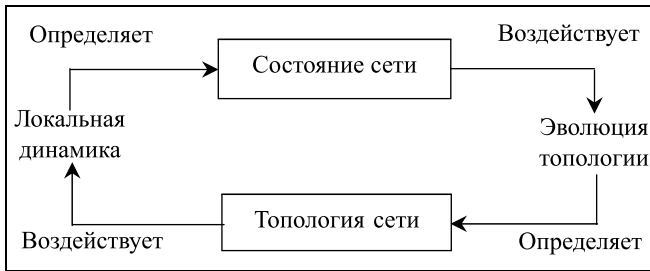


Рис. 1. Взаимовлияние состояния сети и ее топологии

сложными представляются ситуации, когда оба процесса влияют друг на друга, воздействуя, в свою очередь, на формирование информационных сообществ в социальной сети.

В настоящем обзоре рассмотрены модели динамики представлений индивидов в сетях с фиксированной структурой (в некоторых случаях с изменяющимися весами связей), в которых индивиды в процессе социальных взаимодействий пытаются разрешить неопределенность относительно рассматриваемого вопроса. Общность итоговых представлений индивидов и представляет собой условие формирования информационных сообществ в сети. Эти модели рассмотрены далее в первой и во второй частях обзора.

2. ФОРМИРОВАНИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ В СОЦИАЛЬНОЙ СЕТИ

Участники социальных сетей обмениваются информацией и пытаются устранить неопределенность относительно некоторого вопроса (который при построении моделей обычно формализуется в виде значения некоторого параметра), формируя относительно него свое представление. В теории управления социально-экономическими системами обычно предполагается, что рациональные индивиды (агенты) обладают представлениями (beliefs) о состоянии природы (state of nature) $\theta \in \Theta$. Индивидуальные предпочтения агента определены на множестве результатов деятельности, которые зависят, в частности, от действия агента и состояния природы. В соответствии с гипотезой рационального поведения агент выбирает действие, которое приводит к наилучшему для него результату. И здесь существенна та информация, которой он обладает относительно состояния природы. Рациональный агент стремится устранить существующую неопределенность и принимать решения в условиях полной информированности (гипотеза детерминизма) [18]. В настоящей работе речь идет прежде всего об устранении внешней объективной неопределенности — неопределенности состояния природы. Предполагается, что рациональный агент

пытается устранить неопределенность при помощи внешней информации о состоянии природы и в процессе взаимодействия с соседями (действия которых раскрывают имеющуюся у них частную информацию), изменяя свои представления в соответствии с некоторыми механизмами обновления представлений (или правилами обработки информации) (рис. 2). Рациональные агенты при расчете апостериорных представлений применяют правило Байеса.

Однако индивиды не являются полностью рациональными. Психологи отмечают (см., например, работы [19—21]), что индивиды обладают *ограниченной рациональностью* в силу различных когнитивных ограничений (прежде всего, ограниченного объема памяти и ограниченных вычислительных возможностей) и психических особенностей (см. на рис. 2 психические компоненты, детальное описание которых приведено в работе [22]) и допускают систематические ошибки, влияющие на обработку информации (когнитивные искажения). Поэтому здесь могут быть рассмотрены эвристические способы обновления, которые основываются на эмпирических закономерностях и демонстрируют наблюдаемые на практике социально-психологические эффекты. В частности, социальное влияние на убеждения индивида рассматривается в классической модели ДеГроота [9], в которой агент обновляет свое представление на основе информации о представлениях его доверенного окружения в социальной сети. В содержательно более богатых моделях (например, рассмотренных в работах [10—12]) сила влияния соседей зависит от того, насколько их представления согласуются с представлением агента (учитывается склонность индивида к подтверждению своей точки зрения), и это может привести к возникновению в сети сообществ агентов, внутри которых поддерживаются одинаковые представления.

В целом на динамику представлений индивидов в социальной сети влияют такие факторы (см. рис. 2), как:

- *Состояние природы* $\theta \in \Theta$, относительно которого формируют представления индивиды (например, относительно формы Земли или курса валют на завтра).
- *Представление индивида относительно состояния природы*. Представление может быть задано, в частности, при помощи некоторой точечной оценки или распределения субъективных вероятностей на множестве Θ . Представления индивида ограничены памятью и могут зависеть от его представлений по иным вопросам.
- *Механизм обновления представлений*. Отправной точкой в теории управления социально-экономическими системами служит предположение о том, что агенты рациональны и действуют по

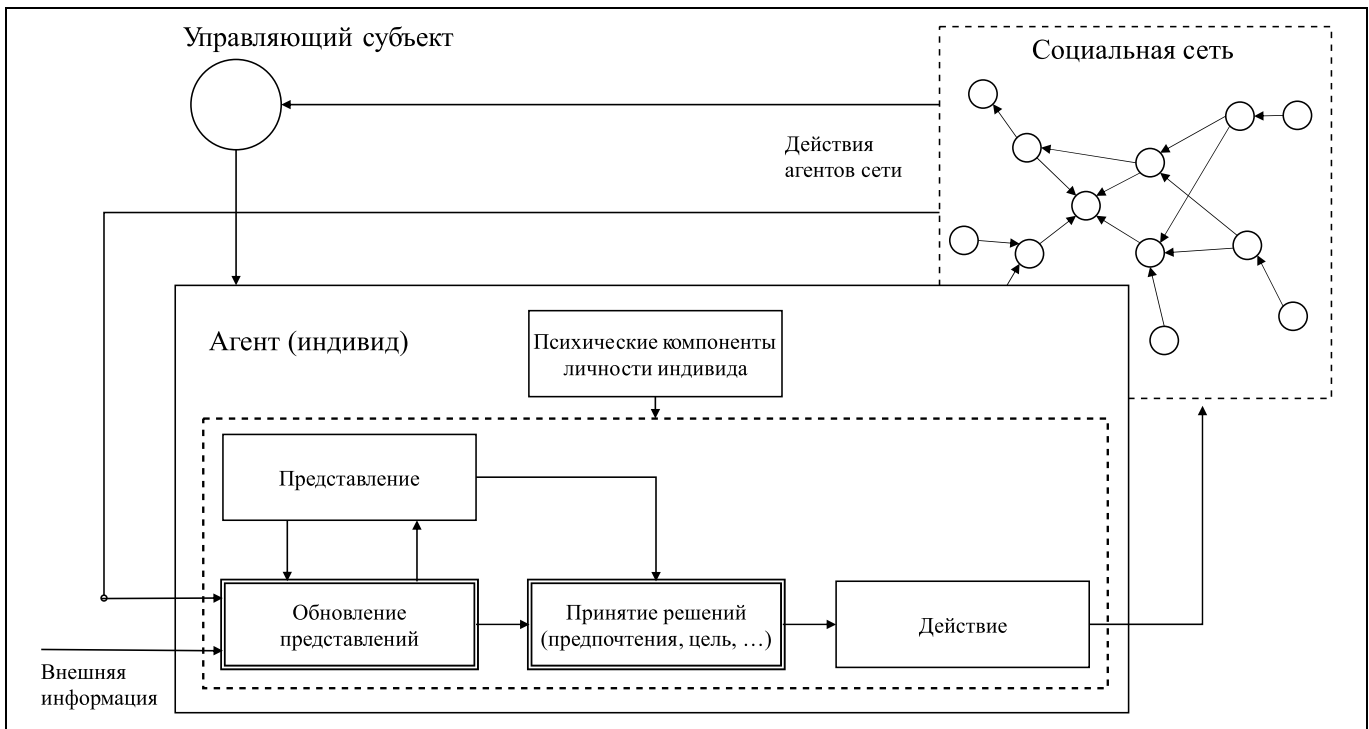


Рис. 2. Процесс обработки информации и принятия решений агентом в социальной сети

правилу Байеса, однако ограниченно рациональные индивиды могут применять эвристические правила.

- *Действие индивида*, которое отражает его представление. Действие из дискретного множества обычно менее информативно, чем действие из континуального, поскольку недостаточно хорошо отражает представления агента.
- *Предпочтения индивида*, задаваемые на результатах его деятельности, или индуцированная предпочтениями целевая функция, которая зависит от действий индивидов и состояния природы.
- *Структура социальной сети*. Очевидно, что структура сети влияет на формирование представлений индивидов. Приведем примеры сетевых эффектов: несвязные сети редко приводят к согласованным представлениям индивидов; индивиды, занимающие выгодное положение в структуре связей сети, обычно оказывают существенное влияние на мнение остальных; и др.

Перечисленные факторы (с учетом в каждом из них психических особенностей индивидов) обуславливают различные информационные эффекты в социальной сети, рассматриваемые в моделях динамики представлений:

— *возникновение истинного или ложного консенсуса представлений в сети* и, как следствие, — формирование глобального информационного со-

общества (с учетом приведенного выше определения);

— *возникновение разногласий в сети* и, как следствие, — формирование различных информационных сообществ в сети.

Далее рассматриваются математические модели динамики представлений агентов в сети, которые учитывают перечисленные факторы и демонстрируют указанные информационные эффекты, и, следовательно, возможность формирования информационных сообществ в сети. Первичным является разделение моделей по интеллектуальным возможностям агентов сети и способу обновления представлений агентов на модели с рациональными байесовскими агентами и модели с ограниченно-рациональными агентами, которые руководствуются эвристическими правилами обновления представлений.

3. ФОРМИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ СООБЩЕСТВ В МОДЕЛЯХ С БАЙЕСОВСКИМИ АГЕНТАМИ

3.1. Формирование представлений индивида

В моделях с байесовскими агентами рассматривается в основном вопрос о возможности формирования агентами в сети истинных представлений о состоянии природы. Множество возможных значений состояния природы Θ задано, как и мно-



жество агентов, у которых имеются представления относительно состояния природы в виде распределения вероятностей. Научение происходит в процессе обработки доступной агенту информации относительно состояния природы: *частного/закрытого сигнала* (private signal) и, возможно, действий его соседей (если агент получает информацию о действиях соседей, то научение называется *социальным*, social learning). Для того, чтобы быть информативным, сигнал s должен зависеть от состояния природы θ , но в то же время он, вообще говоря, не полностью раскрывает состояние природы, т. е. представляет собой случайную величину. Обработка информации происходит при помощи правила Байеса — поступающая информация используется для обновления априорных убеждений индивида и формирования апостериорных убеждений:

$$f(\theta|s) = \frac{\phi(s|\theta)f(\theta)}{\int \phi(s|\theta')f(\theta')d\theta'}$$

где $f(\theta)$ — априорная плотность распределения θ ; $\phi(s|\theta)$ — условная плотность распределения параметра s при условии θ ; $f(\theta|s)$ — апостериорная плотность распределения параметра θ при условии s .

В классических моделях научения все агенты знают структуру модели: априорные вероятности значений состояния природы и то, как заданы частные сигналы (их распределения при условии тех или иных значений состояния природы). Эта информация — *общее знание* (common knowledge):

- 1) каждому агенту известна эта структура;
- 2) всем агентам известно 1;
- 3) всем агентам известно 2 и т. д. до бесконечности.

Однако агентам неизвестна реализация состояния природы и реализации чужих частных сигналов. Предположение об общем знании структуры модели является довольно сильным, в ряде исследований оно ослабляется (см., например, работы [23, 24]).

Далее рассматриваются две базовые модели обновления представлений индивида, в которых принимаются конкретные предположения о структуре информированности индивида, а информационное взаимодействие между индивидами отсутствует.

3.2. Базовые модели обновления представлений индивида

Рассмотрим две базовые модели обновления представлений индивида. Кратко их можно описать так: в простой бинарной модели состояние природы принимает два значения (состояние является дискретным) и каждый агент получает бинарный сигнал о состоянии природы, а в гауссовской модели состояние природы и частные сигна-

лы являются реализациями гауссовских случайных величин.

В *бинарной модели* множество значений состояния $\theta \in \{\theta_0, \theta_1\}$, где $\theta_0 < \theta_1$, в простом случае $\theta \in \{0, 1\}$. Распределение вероятностей характеризуется одним числом — вероятностью состояния 1. Частные сигналы принимают значение 1 или 0 в соответствии с вероятностями $P(s = 1 | \theta = 1) = q$ и $P(s = 0 | \theta = 0) = q'$. Частный сигнал называется *симметричным*, если $q = q'$. В этом случае параметр q называется точностью сигнала (обычно считается, что $q > 1/2$).

Правило Байеса в случае бинарной модели удобно представить в виде отношения правдоподобия:

$$\frac{P(\theta = 1|s)}{P(\theta = 0|s)} = \frac{P(s|\theta = 1)}{P(s|\theta = 0)} \cdot \frac{P(\theta = 1)}{P(\theta = 0)}$$

В бинарной модели сигнал приводит к ограниченному изменению представлений. Если субъективным представлением состояния 1 является μ , то его дисперсия равна $\mu(1 - \mu)$, т. е. новая информация может увеличить дисперсию и уменьшить уверенность в полученной оценке. В случае последовательности сигналов $\{s_t\}$ с одинаковой точностью q правило Байеса применяется последовательно. При $t \rightarrow \infty$ представление агента $\mu_t \rightarrow \theta$, причем дисперсия оценки стремится к нулю.

В *гауссовской модели* состояние природы является реализацией случайной величины, имеющей нормальное распределение (нормальной случайной величины или нормально распределенного случайного вектора). В простом случае $\theta \sim N(m, \sigma_0^2)$. Точность распределения обозначается как $\rho_0 = 1/\sigma_0^2$. Частный сигнал $s = \theta + \epsilon$ имеет нормальное распределение, где шум $\epsilon \sim N(0, 1/\rho_\epsilon)$. После получения сигнала s обновленное распределение θ остается нормальным $N(m', 1/\rho')$, его параметры определяются как

$$\rho' = \rho + \rho_\epsilon,$$

$$m' = \alpha s + (1 - \alpha)m, \text{ где } \alpha = \rho_\epsilon/\rho'.$$

Следовательно, в простой гауссовской модели научения наблюдения приводят к повышению точности представлений индивида (уменьшению дисперсии), а апостериорное ожидание θ представляет собой взвешенную сумму сигнала и априорного ожидания (с отражающими точность весами).

Таким образом, в базовых моделях научения агент, получая последовательность информативных сигналов, приходит к истинной оценке состояния природы. Рассмотрим теперь вопросы формирования различных информационных сообществ в приведенных моделях.

3.3. Формирование различных информационных сообществ

Возникает вопрос: могут ли байесовские агенты⁴ прийти к разным убеждениям, если они получают одну и ту же информацию (одинаковую последовательность сигналов) о состоянии природы?

Наличие когнитивных ограничений

Агенты могут прийти к разным убеждениям, если *априорные представления агентов различны и их память ограничена*. В работе [25] некоторые из получаемых агентами сигналов относительно состояния природы могут быть неоднозначными и могут быть истолкованы по-разному в зависимости от текущих представлений. В частности, агент в момент времени t может получить информативные относительно состояния природы сигналы a или b , или неоднозначный сигнал ab , который он вынужден из-за ограничений памяти интерпретировать и сохранять в памяти как a или b . Агент формирует убеждение λ относительно состояния природы по правилу Байеса и интерпретирует поступающий сигнал ab как a , если $\lambda_{t-1} > 1/2$, или как b , если $\lambda_{t-1} < 1/2$ (проявляя тем самым склонность к подтверждению своей точки зрения). Если вероятность появления неоднозначных сигналов существенна, то агенты, придерживающиеся разных априорных представлений (например, первый агент считает более вероятным состояние A , а второй — B), в итоге с положительной вероятностью придут к противоположным убеждениям относительно состояния природы.

Наличие когнитивных искажений

В работе [26] моделируется эффект склонности агента к подтверждению своей точки зрения на базе бинарной модели. Для моделирования склонности к подтверждению своей точки зрения вводится предположение: если агент получает сигнал, противоречащий его убеждению о состоянии мира, то он с вероятностью $q > 0$ неверно интерпретирует (воспринимает) этот сигнал как подтверждающий его убеждение. При этом он не подозревает о неправильной интерпретации сигнала и действует как обычный байесовский агент. Доказано, что в случае склонности к подтверждению своего мнения (выражаемого параметром q) агент может в итоге прийти к неверному убеждению, несмотря на воспринимаемую им бесконечную последовательность информативных сигналов. Соответственно, индивидуальные вероятности q могут привести к разногласиям агентов в обществе.

⁴ Хотя в этом подразделе рассматриваются ситуации с двумя агентами, рассуждения применимы и для множества агентов двух типов.

Сложная модель представлений: дополнительные факторы и вопросы

В работе [27] показано, что в некоторых случаях усиление разногласий индивидов при наблюдении одних и тех же данных является рациональным, если индивиды делают *разные предположения о дополнительных факторах, влияющих на зависимости между рассматриваемыми величинами: состоянием мира и полученным сигналом* (т. е. представления индивида о проблемной ситуации являются более богатыми, чем индивидов в классических моделях научения). С этим же аспектом связана работа [28], в которой рассматривается роль убеждений относительно «вспомогательного» вопроса, не имеющего прямого отношения к «основному» вопросу, но влияющего на интерпретацию сигналов, связанных с основным вопросом. Эти убеждения могут привести к поляризации представлений по основному вопросу. С некоторой натяжкой (в силу специфичности функции полезности агентов) к этому классу моделей можно отнести модель [29], в которой состояние природы $\theta = (\alpha, \beta)$ является реализацией случайной величины $\tilde{\theta} = (\tilde{\alpha}, \tilde{\beta})$, $\tilde{\alpha}, \tilde{\beta} \in \{0, 1\}$, а агенты с разными частными сигналами об α , получая общие сигналы о β , приходят к различным представлениям относительно оптимальных действий.

Различные априорные представления

В работе [30] рассматривается поляризация представлений байесовских индивидов в ситуации коллективного выбора: существует некоторая проблема, зависящая от состояния мира и требующая решения (выбора некоторой политики). Избиратели в зависимости от своих представлений о состоянии мира голосуют за ту или иную альтернативу, после чего наблюдают степень успешности результата выбора (результат выбранной политики) и корректируют свои представления относительно состояния природы. Поляризация исключена, если и только если условная плотность результата выбора (относительно состояния мира и выбранной политики) обладает свойством монотонности отношения правдоподобия (англ. *Monotone Likelihood Ratio Property*, MLRP). В противном случае поляризацию исключить нельзя даже в случае небольших *различий в априорных представлениях*: показаны соответствующие примеры для дискретных и непрерывных индикаторов успешности выбранной политики.

Различные априорные представления относительно условных распределений сигналов

Агенты также могут прийти к разногласиям, если различны их априорные представления относительно состояния природы, а также *представления*



относительно условных распределений сигналов. Рассмотрим подробнее этот аспект.

В работе [31] рассматривается модель научения с двумя байесовскими агентами, с номерами 1 и 2, которые наблюдают последовательность сигналов внешней среды $\{s_t\}_{t=0}^n$, где $s_t \in \{a, b\}$. Состояние природы задается параметром $\theta \in \{A, B\}$ (истинным является состояние A), а априорное представление агента i относительно вероятности того, что $\theta = A$, задается параметром $\pi^i \in (0, 1)$. Агенты считают, что для заданного параметра θ поступающие сигналы являются независимыми и одинаково распределенными: $P(s_t = a | \theta = A) = p_A$ и $P(s_t = b | \theta = B) = p_B$. Обычно эти вероятности считаются известными, но в действительности возможна неопределенность относительно значения вероятности p_θ ($\theta \in \{A, B\}$), которая задается для каждого агента i его распределением субъективных вероятностей F_θ^i .

Рассмотрим бесконечную последовательность сигналов $s \equiv \{s_t\}_{t=1}^\infty$, и пусть S — множество всех таких последовательностей. Апостериорное убеждение агента i относительно значения параметра θ при условии наблюдения последовательности сигналов $\{s_t\}_{t=1}^n$

$$\phi_n^i(s) \equiv P^i(\theta = A | \{s_t\}_{t=1}^n).$$

Апостериорная вероятность в силу того, что сигналы независимы и одинаково распределены, зависит от числа сигналов $s_t = a$ к моменту времени n :

$$r_n(s) \equiv \#\{t \leq n | s_t = a\}.$$

Согласно усиленному закону больших чисел $r_n(s)/n$ сходится с вероятностью, равной единице, к некоторому значению частоты $\rho(s) \in [0, 1]$ для всех агентов. Определим множество $\bar{S} \equiv \{s \in S : \exists \lim_{n \rightarrow \infty} r_n(s)/n\}$. Тогда

$$\phi_n^i(s) = \frac{1}{1 + \frac{1 - \pi^i P^i(r_n | \theta = B)}{\pi^i P^i(r_n | \theta = A)}},$$

где $P^i(r_n | \theta)$ — вероятность наблюдения ровно r_n сигналов $s_t = a$ в последовательности из n первых сигналов согласно F_θ^i .

Оказывается [31], что если для каждого F_θ^i вероятность некоторого $\hat{p}_\theta > 1/2$ равна единице, т. е. $F_\theta^i(\hat{p}_\theta) = 1$ и для $p < \hat{p}_\theta$ $F_\theta^i(p) = 0$, то для каждого

$i = 1, 2$: $P^i(\lim_{n \rightarrow \infty} \phi_n^i(s) = 1 | \theta = A) = 1$ (асимптотическое научение); $P^i(\lim_{n \rightarrow \infty} |\phi_n^1(s) - \phi_n^2(s)| = 0) = 1$ (асимптотическое согласие). Таким образом, если индивиды знают условные распределения сигналов (которые одинаковы для них), то они узнают истинное состояние природы из наблюдений (почти, наверное, при $n \rightarrow \infty$) и придут к консенсусу относительно состояния θ в случае наблюдения одинаковой последовательности сигналов. Если предельная частота сигнала a равна \hat{p}_A , то индивид считает, что $\theta = A$, если она равна $1 - \hat{p}_B$, то $\theta = B$. Вероятность всех остальных случаев для агента равна нулю, и если индивиды для достаточно больших $n < \infty$ наблюдают ρ (частоту сигналов a), отличающуюся от \hat{p}_A и $1 - \hat{p}_B$, то они приписывают это отклонение изменчивости выборки (sampling variation). Однако по мере роста выборки (при $n \rightarrow \infty$) становится сложно объяснить изменчивостью выборки частоту сигнала, отличающуюся от \hat{p}_A и $1 - \hat{p}_B$. Поэтому естественно разрешить индивидам задавать положительные (хотя и небольшие) вероятности всем возможным значениям p_θ . Такое допущение ведет к самым различным последствиям, что иллюстрирует

Теорема 1. *Предположим, что для каждого агента i и значения параметра θ функция распределения F_θ^i имеет непрерывную, ненулевую и конечную плотность f_θ^i на отрезке $[0, 1]$, тогда (для $s \in \bar{S}$): асимптотическое научение отсутствует, т. е. $P^i(\lim_{n \rightarrow \infty} \phi_n^i(s) \neq 1 | \theta = A) = 1$; асимптотическое согласие отсутствует (есть разногласия между агентами), т. е. $P^i(\lim_{n \rightarrow \infty} |\phi_n^1(s) - \phi_n^2(s)| \neq 0) = 1$ всякий раз, когда $\pi^1 \neq \pi^2$ и $F_\theta^1 = F_\theta^2$ для каждого значения $\theta \in \{A, B\}$ [31, 32].*

Фактически научение в условиях такого типа неопределенности может привести к усилению разногласий двух байесовских агентов после получения одной и той же бесконечной последовательности сигналов, что невозможно в рамках стандартной модели. Этот результат сформулирован в следующей теореме.

Теорема 2. *Предположим, что для каждого агента i и значения параметра θ функция распределения F_θ^i имеет непрерывную, ненулевую и конечную плотность f_θ^i на отрезке $[0, 1]$, тогда существует такое $\epsilon > 0$, что $|R^1(\rho) - R^2(\rho)| > \epsilon$ для каждого значения*

частоты $\rho \in [0, 1]$ ($R^1(\rho) \equiv f_B^i(1 - \rho)/f_A^i(\rho)$ — отношение правдоподобия). Тогда существует такое открытое множество априорных представлений π^1 и π^2 , что для всех сигналов $s \in \bar{S}$ выполняется неравенство $\lim_{n \rightarrow \infty} |\phi_n^1(s) - \phi_n^2(s)| > |\pi^1 - \pi^2|$, в частности, $P(\lim_{n \rightarrow \infty} |\phi_n^1(s) - \phi_n^2(s)| > |\pi^1 - \pi^2|) = 1$ [31].

Таким образом, даже небольшие различия в априорных представлениях агентов приводят к различным интерпретациям сигналов, и если первоначальное несоответствие является небольшим, то после почти любой последовательности сигналов разногласия между агентами будут нарастать.

В рассмотренных выше моделях научения и формирования информационных сообществ сетевое взаимодействие между агентами отсутствует. В общем же случае индивиды — члены социума — взаимодействуют между собой в рамках социальной сети, соответственно, действия соседей в сети могут предоставить агенту дополнительную информацию о состоянии природы. Такой вид взаимодействия будет рассмотрен во второй части обзора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В первой части обзора кратко изложена концепция информационного сообщества и рассмотрены релевантные модели формирования представлений индивидов, которые стремятся устранить неопределенность относительно заданного(-ых) вопроса(-ов), формируя в итоге информационные сообщества. Описаны подходы к моделированию обновления представлений индивидов и влияние различных факторов на достижение истинных представлений и формирование в сети одного или нескольких различных информационных сообществ. В обществе с байесовскими агентами, как правило, достигается истинное представление относительно исследуемого вопроса, и для возникновения различных информационных сообществ необходимо ослабить требование рациональности индивидов и/или ввести допущения о различной информированности индивидов.

Во второй части обзора будут рассмотрены вопросы формирования информационных сообществ в сетевых моделях с байесовскими агентами, а также с наивными («эвристическими») индивидами. Эмпирическим исследованиям, связанным с вопросами существования информационных сообществ в реальных социальных сетях, и их особенностям, будет посвящена третья, заключительная часть обзора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bakshy, E., Messing, S., Adamic, L.A. Exposure to ideologically diverse news and opinion on Facebook // Science. — 2015. — Vol. 348, no. 6239. — P. 1130–1132.
2. Kumar, S., Hamilton, W.L., Leskovec, J., Jurafsky, D. Community interaction and conflict on the web // Proceedings of the 2018 World Wide Web Conference. — 2018. — P. 933–943.
3. Garimella, K., De Francisci Morales, G., Gionis, A., Mathioudakis, M. Political Discourse on Social Media: Echo Chambers, Gatekeepers, and the Price of Bipartisanship // ArXiv180101665 Cs. — 2018.
4. Barberá, P., Jost, J.T., Nadler, J., et al. Tweeting from Left to Right: Is Online Political Communication More than an Echo Chamber? // Psychological Science. — 2015. — Vol. 26, iss. 10. — P. 1531–1542.
5. Бызов Л.Г., Губанов Д.А., Козицин И.В., Чхартишвили А.Г. Идеальный политик для социальной сети: подход к анализу идеологических предпочтений пользователей // Проблемы управления. — 2020. — № 4. — С. 15–26. [Byzov, L.G., Gubanov, D.A., Kozitsin, I.V., Chkhartishvili, A.G. Perfect Politician for Social Network: An Approach to Analysis of Ideological Preferences of Users // Control Sciences. — 2020. — No. 4. — P. 15–26 (In Russian)]
6. McPherson, M., Smith-Lovin, L., Cook, J.M. Birds of a Feather: Homophily in Social Networks // Annu. Rev. Sociol. — 2001. — Vol. 27, no. 1. — P. 415–444.
7. Kadushin, C. Understanding social networks: theories, concepts, and findings. — New York: Oxford University Press, 2012. — 252 p.
8. Myers, D.G. Social Psychology. — N.-Y.: McGraw-Hill. — 1999.
9. De Groot, M.H. Reaching a Consensus // Journal of American Statistical Association. — 1974. — No. 69. — P. 118–121.
10. Deffuant, G., Neau, D., Amblard, F., Weisbuch, G. Mixing Beliefs among Interacting Agents // Advances in Complex Systems. — 2000. — Vol. 03. — P. 87–98.
11. Hegselmann, R., Krause, U. Opinion Dynamics under the Influence of Radical Groups, Charismatic Leaders, and Other Constant Signals: A Simple Unifying Model // Networks and Heterogeneous Media. — 2015. — Vol. 10, no. 3. — P. 477–509.
12. Губанов Д.А., Новиков Д.А., Чхартишвили А.Г. Социальные сети: модели информационного влияния, управления и противоборства. 3-е изд., перераб. и дополн. — М.: МЦНМО, 2018. — 224 с. [Gubanov, D.A., Novikov, D.A., Chkhartishvili, A.G. Social Networks: Models of information influence, control and confrontation. — Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2019. — 158 p.]
13. Губанов Д.А., Петров И.В., Чхартишвили А.Г. Многомерная модель динамики мнений в социальных сетях: индексы поляризации // Проблемы управления. — 2020. — № 3. — С. 26–33. [Gubanov, D.A., Petrov, I.V., Chkhartishvili, A.G. Multidimensional Model of Opinion Dynamics in Social Networks: Polarization Indices // Control Sciences. — 2020. — No. 3. — S. 26–33 (In Russian)].
14. Ожегов С.И., Шведова Н.Ю. Толковый словарь русского языка. — М.: ИТИ Технологии. — 2006. — 944 с. [Ozhegov, S.I., Shvedova, N.Yu. Tolkovyi slovar' russkogo yazyka. — M.: ITI Tekhnologii. — 2006. — 944 s. (In Russian)].
15. Merriam-Webster Dictionary (<https://www.merriam-webster.com/dictionary/community>).
16. Girvan, M., Newman, M.E.J. Community structure in social and biological networks // Proceedings of the national academy of sciences. — 2002. — Vol. 99, no. 12. — P. 7821–7826.
17. Губанов Д.А., Чхартишвили А.Г. О понятии информационного сообщества в социальной сети // Матер. 13-й мультиконференции по проблемам управления. — 2020. [Gubanov, D.A., Chkhartishvili, A.G. O ponyatii informatsionnogo soobshchestva v sotsial'noi seti // Materialy 13-i mul'tikonferentsii po problemam upravleniya. — 2020 (In Russian)].



18. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. — Москва: МПСИ. — 2005. — 584 с. [Novikov, D.A. Teoriya upravleniya organizatsionnymi sistemami. — Moskva: MPSI, 2005. — 584 s. (In Russian)]
19. Simon, H.A. Rationality as Process and as Product of Thought // American Economic Review. — 1978. — Vol. 68, no. 2. — P. 1—16.
20. Tversky, A., Kahneman, D. Judgement Under Uncertainty: Heuristics and Biases // Science. — 1974. — No. 185. — P. 1124—1131.
21. Kahneman, D., Tversky, A. Prospect Theory: An Analysis of Decision under Risk // Econometrica. — 1979. — Vol. XLVII. — P. 263—291.
22. Новиков Д.А. Модели динамики психических и поведенческих компонент деятельности в коллективном принятии решений // Управление большими системами. — М.: ИПУ РАН. — 2020. — Вып. 85. — С. 206—237. — DOI: <https://doi.org/10.25728/ubs.2020.85.9> [Novikov, D.A. Dynamics models of mental and behavioral components of activity in collective decision-making // Large-Scale Systems Control. — 2020. — Iss. 85. — P. 206—237 (In Russian)]
23. Dasaratha, K., He, K. Network Structure and Naive Sequential Learning // arXiv:1703.02105 [q-fin.EC]. — 2019.
24. Li, W., Tan, X. Locally Bayesian learning in networks // Theoretical Economics. — 2020. — No. 1 (15). — P. 239—278.
25. Fryer, R., Harms, P., Jackson, M. National Bureau of Economic Research. Updating Beliefs with Ambiguous Evidence: Implications for Polarization. — Cambridge, MA. — 2013.
26. Rabin, M., Schrag, J.L. First Impressions Matter: A Model of Confirmatory Bias // The Quarterly Journal of Economics. — 1999. — No. 1 (114). — P. 37—82.
27. Jern, A., Chang, K.K., Kemp, C. Belief polarization is not always irrational // Psychological Review. — 2014. — No. 2 (121). — P. 206—224.
28. Benoit, J., Dubra, J. Apparent bias: what does attitude polarization show? // International Economic Review. — 2019. — No. 4 (60). — P. 1675—1703.
29. Andreoni, J., Mylovnikov, T. Diverging Opinions // American Economic Journal: Microeconomics. — 2012. — No. 1 (4). — P. 209—232.
30. Dixit, A.K., Weibull, J.W. Political Polarization // Proceedings of the National Academy of Sciences. — 2007. — No. 18 (104). — P. 7351—7356.
31. Acemoglu, D., Ozdaglar, A. Opinion Dynamics and Learning in Social Networks // Dynamic Games and Applications. — 2011. — No. 1 (1). — P. 3—49.
32. Acemoglu, D., Chernozhukov, V., Werning, I. Fragility of Asymptotic Agreement Under Bayesian learning: Fragility of Asymptotic Agreement // Theoretical Economics. — 2016. — No. 1 (11). — P. 187—225.

Статья представлена к публикации членом редколлегии чл.-корр. РАН Д.А. Новиковым.

Поступила в редакцию 26.08.2020, после доработки 09.11.2020.
Принята к публикации 24.11.2020.

Губанов Дмитрий Алексеевич — канд. техн. наук,
✉ dmitry.a.g@gmail.com,

Петров Илья Владимирович — аспирант,
✉ zyzzy@protonmail.ch,

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
г. Москва.

INFORMATION COMMUNITIES IN SOCIAL NETWORKS. Part I: From Concept to Mathematical Models

D.A. Gubanov¹ and I.V. Petrov²

V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

¹✉ dmitry.a.g@gmail.com, ²✉ zyzzy@protonmail.ch

Abstract. This survey covers the literature related to information communities in mutually complementary areas: the formation of information communities in social networks and some applied aspects of identifying and analyzing information communities in social networks. First, mathematical models describing the formation of information communities under uncertainty are considered. Among these models, the most relevant ones are the mathematical models of opinion/belief dynamics reflecting any changes in the beliefs of nodes under the influence of other network nodes and significant effects (in particular, the preservation of differences in beliefs and the divergence of beliefs) that lead to the formation of information communities. In part I of the survey, the concept of an information community is first presented. Then information processing and decision-making by an agent in a social network under external uncertainty are outlined. The factors influencing the formation of information communities in the network are highlighted, and the basic models of Bayesian agents and their extensions are investigated.

Keywords: social networks, information community, formation of information communities, analysis of information communities, belief formation.

Funding: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 19-17-50225.