
DOI: 10.25728/mlsd.2023.37; 3

МЕХАНИЗМЫ УСИЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ В СЕТЕВЫХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ¹

Алоджанц А.П.

*Институт перспективных систем передачи данных,
Университет ИТМО, Санкт Петербург, Россия
alexander_ap@list.ru*

Аннотация. Рассмотрена проблема значительного усиления информации в распределенных интеллектуальных системах с точки зрения парадигмы квантовой теории. Предложена лазероподобная модель (солазер) для социальной сложной сети в качестве «рабочей среды», описывающая такие явления, как возникновение эхо-камер, социальной поляризации, а также рост информационных каскадов.

Ключевые слова: сложные сети, фазовые переходы, агенты принятия решений, распределенные интеллектуальные системы, эхо-камеры, спонтанные процессы, лазеры.

Введение

Распространение информации в социальных сообществах является на сегодня междисциплинарной проблемой, которая объединяет в себе фундаментальные концепции математики и теории управления [1], теории сетей [2], информационных, компьютерных, когнитивных, социальных [3] и физических наук [4]. Существующие в реальном мире социальные сети представляют собой, по сути, распределенные интеллектуальные системы (РИС), которые включают в себя агентов принятия решения (АПР) – агентов естественного (АЕИ) и/или искусственного (АИИ) интеллекта [5]. Моделирование таких сложных по своей природе и поведению систем является непростой задачей, требующей междисциплинарных решений. Традиционно подход статистической физики применяется к описанию сложных систем, которые могут включать в себя сложные сети, демонстрирующие социальные сообщества [2]. Преимущественно речь идет о выявлении фазовых переходов в термодинамически равновесной модели Изинга, определенной на сложных сетях, и учитывающей взаимодействие АПР, имеющих бинарные (взаимоисключающие) предпочтения, моделируемые частицей со спином $\frac{1}{2}$, см., напр., [6]. Важно заметить, что несмотря на свою универсальность, модель Изинга не позволяет сделать однозначный вывод о скорости распространения информации в сетевом сообществе, поскольку в ней не учитываются свойства самих носителей информации. Вместе с тем, именно диссеминация информации (знаний, идей и пр.) в социальных сетях представляет большой интерес [7]. С практической точки зрения решение такой задачи может быть основано на различных неравновесных эпидемиологических моделях, которые, зачастую, бывают весьма сложны в своих связях, ср. с [8].

В данной работе рассматривается принципиально другой подход к исследованию формирования мнений, социальному воздействию и распространению информации, основанный на неравновесных фазовых переходах в лазероподобной системе, обладающей гамильтонианом, подобным Изингу [9]. А именно, речь идет о моделировании РИС в парадигме так называемого, социального лазера (солазера), который позволяет достаточно наглядно представить и объяснить распространение информации в социальной среде, являющейся разновидностью РИС [10].

1. Модель РИС в виде социального лазера

В этом разделе рассмотрена проблема неравновесного фазового перехода, который может происходить в больших, социально ориентированных РИС с обменом социально значимой информацией между АПР. Предлагаемая здесь модель формулируется в наиболее общей форме в терминах аппарата квантовой теории, а также гамильтонова формализма, который с недавних пор получил большое распространение при решении различных оптимизационных задач экономики и финансов [11]. Согласно этому формализму, целевой функции, которая подлежит оптимизации, соответствует (социальная) энергия, физически соответствующая исследуемому ниже

¹ Работа выполнена в рамках гос. задания № 2019-1339 Министерства науки и высшего образования РФ.

гамильтониану. В каждом узле сети РИС имеются агенты принятия решений, обладающие простой двухуровневой когнитивной структурой, описываемой основным ($|g\rangle$) и возбужденным ($|e\rangle$) ментальными состояниями, которым можно приписать энергии E_g и E_e ($E_e > E_g$), соответственно. В более общем случае АПР может состоять из агента естественного интеллекта, обладающего бинарными когнитивными состояниями, а также АИИ – например, аватара АЕИ, в функции которых входит взаимодействие как со «своим» АЕИ, так и взаимодействие с другими агентами в сети, как это описано в [5]. В таком случае мы считаем, что АЕИ и его аватар могут быстро и эффективно обмениваться информацией, которую получают извне, в том числе и от других АПР. На внешнем контуре, составляющем социальную сеть, обмен информацией происходит на другом, более длинном временном масштабе. Таким образом, мы полагаем что в каждом узле сети расположена эффективная двухуровневая система ПР (социальный s-атом, ср. с [4]), которая описывается, как и в квантовой теории, вектором в двумерном Гильбертовом пространстве. Используя метод вторичного квантования, описываем процессы, происходящие с АПР с помощью операторов уничтожения \hat{a}_j , \hat{b}_j и рождения \hat{a}_j^\dagger , \hat{b}_j^\dagger , которые относятся к изменению ментального состояния АПР на основном ($|g\rangle$) и возбужденном ($|e\rangle$) состояниях, соответственно. Информационное поле полагаем квантованным; оно описывается операторами уничтожения (\hat{f}_v) и рождения \hat{f}_v^\dagger социальных s-квантов информационного поля, которые представляют на практике короткие сообщения, которыми обмениваются АПР в РИС (в этом аспекте s-информация отличается от обычной информации Шеннона, не учитывающей смысл самого сообщения). Гамильтониан рассматриваемой РИС задается выражением

$$\hat{H} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N \omega_j (\hat{b}_j^\dagger \hat{b}_j - \hat{a}_j^\dagger \hat{a}_j) + \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sum_{v=1}^{k_j} [\omega \hat{f}_v^\dagger \hat{f}_v + g_j N (\hat{f}_v^\dagger \hat{a}_j^\dagger \hat{b}_j + \hat{b}_j^\dagger \hat{a}_j \hat{f}_v)] + iP(\hat{f}_v^\dagger - \hat{f}_v), \quad (1)$$

где g_j характеризует взаимодействие j -го АПР с информационным полем \hat{f}_v (далее предполагаем, что все $g_i = g$ для всех АПР); $\omega_j = E_{e,j} - E_{g,j}$ ($j = 1, 2, \dots, N$) и ω определяют параметры системы АПР и квантованного информационного поля, соответственно, k_j есть j -я степень узла сети РИС; параметр P характеризует инжекцию (вброс) релевантной классической информации под действием которой находятся агенты ПР в сети. В работе полагаем постоянную Планка равной единице. В этой связи характерные параметры частоты ω_j , ω , а также g_j в (1) имеют смысл некоторой (социальной) энергии.

На рис. 1 приведены элементарные события, которые могут происходить с АПР в условиях внешнего информационного воздействия и которые учитываются в (1); в квантовой физике им соответствуют вполне определенные процессы, происходящие на микроскопическом уровне с двухуровневыми системами, см., напр., [12]. В частности, переход в (эмоционально) возбужденное состояние $|e\rangle$ большое количество АПР совершает под действием сильной информационной накачки, рис. 1(а). Отдельно взятый АПР может возбудиться под воздействием внешнего (резонансного) кванта s-информации, например, при получении некоторого сообщения от других АПР, см. рис. 1(в). Далее, с этого состояния АПР может (спонтанно) релаксировать в основное состояние, рис. 1(б), или перейти на основное состояние с испусканием s-кванта - рис. 1(г). Наконец, следует также учитывать процесс стимулированного испускания квантов s-информации, которые происходят в присутствии получения сообщения от других АПР, см. рис. 1(д). Такие процессы весьма распространены в социальных сетях, когда у АПР есть возможность «твитнуть» сообщение, т.е. поделиться им с другими АПР, что, по сути, является источником роста информационных каскадов, см., напр., [13].

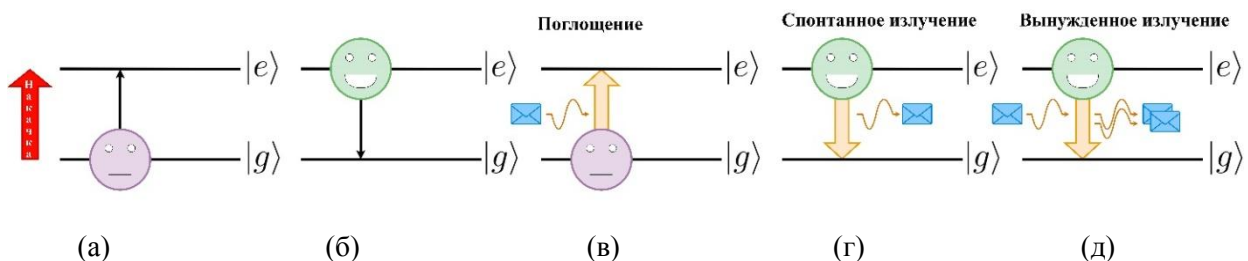


Рис. 1. Схематичный рисунок элементарных процессов, происходящих с j -ым АПР в сети, обладающим двумя ментальными состояниями: $|g\rangle$ – эмоционально основное (нейтральное), и $|e\rangle$ – возбужденное состояния, соответственно. Кванты s-информации (синие конвертики) следует рассматривать как смысловые сообщения, например, посты, твиты, ретвиты, электронные письма и т.д., содержащие некоторую контекстуальную информацию, характеризующую социальной энергией с частотой ω . Остальные детали даны в тексте

Таким образом, стимулированные переходы происходят когерентно, приводя к усилению информационного поля. Процессы спонтанного излучения не когерентны; в физике они демонстрируют квантовую природу взаимодействия вещества и света [12].

В физических лазерах активную среду помещают в резонатор, который служит для увеличения взаимодействия излучения со средой, а также селекции мод и усилении лазерного излучения [12]. В случае с РИС роль резонатора выполняет эхо-камера, действие которой основано на циркуляции и усилении информации в сетевом сообществе, обсуждающем определенную тематику, которая в нашем случае соответствует частоте ω , см., напр., [13], а также рис. 2. В отсутствие эхо-камеры s-информация распространяется в социальных сетях и может быть потеряна после нескольких (или даже многих) шагов, которые характеризуются временем жизни s-кванта $\tau_{ph} \propto 1/\kappa$, где κ характеризует скорость потерь квантов s-поля из области РИС, ср. с [14]. Например, для сетевого сообщества можно определить время τ_{ph} как среднюю продолжительность публикации. Для известных социальных сетей она варьируется от нескольких минут до нескольких месяцев, см. [15]. Современные социальные сети технически предоставляют возможности одновременного обмена s-информацией со многими пользователями. Например, АПР продвигает распространение s-информации в РИС путем публикации, твитов и повторных ретвитов. Контекст некоторой значимой информации может быть задан с помощью хэштегов. Иначе говоря, эхо-камера, по аналогии с резонатором обычного лазера способствует выделению (и усилению) некоторой характерной моды с частотой ω , которая находится в приблизительном резонансе с частотами ω_j АПР, т.е. $\omega_j \simeq \omega$. Данное соотношение можно связать также со свойством гомофилии АПР, которые поддерживают тенденцию в сети быть связанными вместе, с похожими на себя людьми [16].

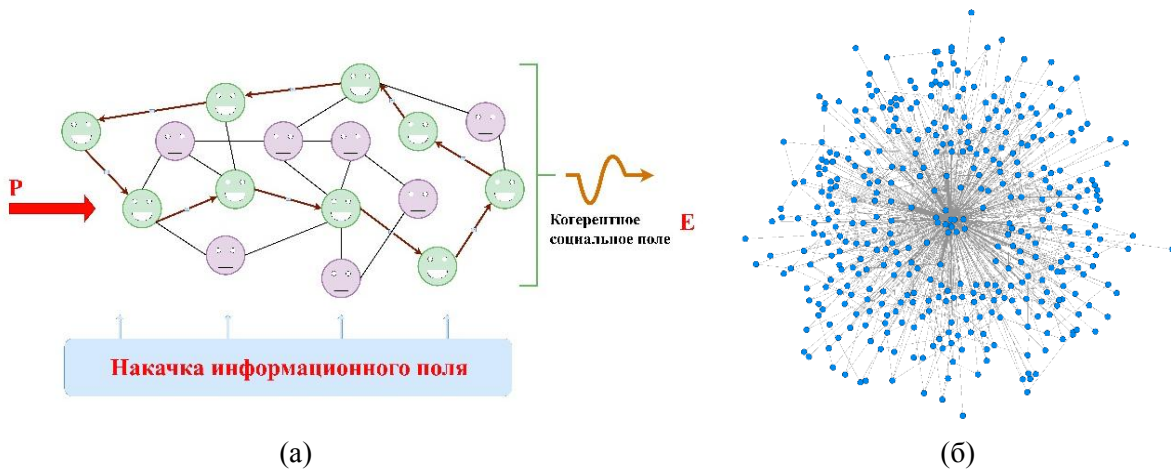


Рис. 2. (а) Схематический рисунок РИС в виде социального лазера (солазера), (б) сеть со степенным законом распределения узлов, $\gamma = 2.5$, в виде активной «среды» солазера с числом узлов $N = 500$

Для моделирования свойств РИС в пределе больших N , мы используем сеть со степенным законом распределения степеней узлов k , обладающей непрерывной функцией распределения $p(k)$ в виде (ср. с [2])

$$p(k) = \frac{(\gamma-1)k_{min}^{\gamma-1}}{k^\gamma}, \quad (2)$$

где γ – показатель степени; k_{min} – минимальное значение степеней узлов. Флуктуации степеней узлов возрастают при $\gamma \leq 3$. В этом случае в сети имеются хабы – узлы с максимальным числом связей, см. рис. 2(б), а также [2].

Основные уравнения Гейзенберга-Ланжевена для соответствующих операторов получаются с помощью (1) стандартным к квантовой теории способом, см., напр., [12]. Далее рассмотрим приближение среднего поля, пренебрегая квантовыми корреляциями. В результате можно прийти к системе уравнений в виде

$$\dot{E}(t) = (-i\omega - \kappa)E(t) - ig \sum_{j=1}^N p_j(t) + P(t); \quad (3a)$$

$$\dot{p}_j(t) = (-i\omega_j - \Gamma_j)p_j(t) + igk_j E(t)\sigma_j^z(t); \quad (3б)$$

$$\dot{\sigma}_j^z(t) = \frac{1}{\tau_j}(\sigma_{j,0}^z - \sigma_j^z(t)) + 2igk_j (p_j(t)[E(t)]^* - [p_j(t)]^* E(t)), \quad (3в)$$

где точка над буквой означает дифференцирование по времени, $\sigma_j^z = \langle \hat{b}_j^\dagger \hat{b}_j - \hat{a}_j^\dagger \hat{a}_j \rangle$ есть средняя инверсия населенности для j -го АПР ($j = 1, 2, \dots, N$); $\sigma_j^z = 1$, если агент занимает состояние $|e\rangle$, и $\sigma_j^z = -1$, если $|g\rangle$, соответственно, $\sigma_{j,0}^z$ – значение инверсии для ментальных состояний в начальный момент времени, созданное информационной накачкой, $p_j = \langle \hat{a}_j^\dagger \hat{b}_j \rangle$ – средняя поляризация j -го АПР, $E = \langle \hat{f}_j \rangle$ – когерентное среднее поле, циркулирующее в социальной среде, см. рис. 2(а). В (3) τ_j – время спонтанных переходов для j -го АПР, Γ_j – характерная скорость спада возбуждения, κ характеризует скорость потерь квантов s -поля из области РИС.

Далее, в (3) целесообразно убрать эволюцию системы на частоте $\omega \simeq \omega_j$, так что $E(t) = E e^{-i\omega t}$, $P(t) = P e^{-i\omega t}$ и $p_j(t) = p_j e^{-i\omega t}$. Кроме того, полагаем неизменной во времени среднюю населенность j -го АПР σ_j^z , после чего из (3) получаем

$$\dot{E} = -\kappa E - ig \sum_{j=1}^N p_j + P; \quad (4a)$$

$$\dot{p}_j = -\Gamma_j p_j + ig k_j E \sigma_j^z; \quad (4б)$$

$$\dot{\sigma}_j^z = \sigma_{j,0}^z + 2i\tau_j g k_j (p_j E^* - p_j^* E). \quad (4в)$$

Система уравнений (4) допускает значительное упрощение, если предположить, что все АПР в эхо-камере внутренне близки друг к другу, т.е. выполняются условия

$$\Gamma_j = \Gamma, \tau_j = \tau. \quad (5)$$

Далее, решаем (4) методом последовательных приближений (см. [12]), полагая в нулевом приближении $\sigma_j^z \approx \sigma_{j,0}^z$ и $\dot{p}_j = 0$. После несложных вычислений в результате приходим к замкнутому уравнению для поля в виде (ср. с [10])

$$\dot{E} = -\left(\kappa - \sum_{j=1}^N \frac{g^2 k_j \sigma_{j,0}^z}{\Gamma}\right) E - \sum_{j=1}^N \frac{4g^4 k_j^3 \tau \sigma_{j,0}^z}{\Gamma^2} |E|^2 E + P. \quad (6)$$

Стационарное решение (6) приводит к алгебраическому уравнению

$$AE - BE^3 + P = 0, \quad (7)$$

где коэффициенты A, B определяются как

$$A = \frac{g^2 \langle k \rangle \sigma_z}{\Gamma} - \kappa, \quad B = \frac{4g^4 \langle k^3 \rangle \tau \sigma_z}{\Gamma^2}. \quad (8a,б)$$

В (8) $\sigma_z \equiv \sum_j \sigma_{j,0}^z \simeq N \sigma_0^z$ есть макроскопическая инверсия населенности; $\sigma_0^z = \frac{1}{N} \sum_j \sigma_{j,0}^z$ – нормированная коллективная инверсия (мнений) агентов ПР, $\langle k \rangle$ – средняя степень узлов, $\langle k^3 \rangle$ – третий момент степеней узлов.

Порог генерации информационного поля определяется из (7) условием $A = 0$, что дает

$$\sigma_{z,thr} = \frac{\kappa \Gamma}{g^2 \langle k \rangle}. \quad (9)$$

Выражение (9) является одним из ключевых результатов работы. В частности, РИС демонстрирует зависимость $\sigma_{z,thr} \propto 1/\langle k \rangle$, что подразумевает переход к усилению в РИС в условиях исчезающе малого порога ($\sigma_{thr} \rightarrow 0$), когда $\langle k \rangle$ растет, что соответствует области $1 < \gamma < 3$ для изменения показателя степени γ в (2), ср. с [2]. С другой стороны, для заданной инверсии населенности σ_z уравнение (8) определяет пороговую среднюю степень узла $\langle k \rangle_{thr}$ в виде

$$\langle k \rangle_{thr} = \frac{\kappa \Gamma}{g^2 \sigma_z}. \quad (10)$$

В окрестности пороговой точки, т.е. когда $\langle k \rangle \rightarrow \langle k \rangle_{thr}$ из (7) при $P = 0$ для параметра порядка получаем

$$E = \sqrt{\frac{A}{B}} \propto \sqrt{\frac{\langle k \rangle}{\langle k \rangle_{thr}} - 1}. \quad (11)$$

Выражение (11) демонстрирует фазовый переход второго рода для РИС, который приводит к установлению некоторого не нулевого информационного поля E в сети РИС, соответствующей

значениям средней степени узлов выше порога, т.е. при $\langle k \rangle \geq \langle k \rangle_{thr}$, что также достигается в условиях ненулевой поляризации сообщества АПР в виде

$$p = \sum_{j=1}^N \frac{igk_j \sigma_{j,0}^z}{\Gamma} \left(1 - \frac{4g^2 k_j^2 \tau}{\Gamma} |E|^2 \right) E. \quad (12)$$

В окрестности $\langle k \rangle \simeq \langle k \rangle_{thr}$, в присутствии параметра вброса информации P из (7), (8) получаем

$$E \simeq \left(\frac{P\Gamma}{4g^2 \tau \langle k \rangle_{thr}^2} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (13)$$

где также полагаем γ большим.

Зависимость (13) для информационного поля, формируемого агентами РИС показывает, что дополнительная инжекция информации в сеть играет решающую роль и способствует возникновению фазового перехода в системе РИС, который зависит от топологических свойств (социальной) сети.

2. Диффузия информации в РИС

Современные социальные сети, а также РИС создают беспрецедентные возможности для агентов ПР влиять друг на друга. Этому способствуют и различные приложения для обмена интернет-ресурсами (например, YouTube), блоги и микроблоги (например, LiveJournal, и т.д.), социальные сети (например, Facebook, Myspace, ВКонтакте), способные также на предоставление (извне) актуальной информации, описываемую параметром P . В этом смысле информационное поле E , характеризующее коллективное влияние АПР друг на друга, не может рассматриваться как постоянная во времени величина. Некоторая информация, опубликованная пользователем, может почти сразу стать «вирусной» и доступной для миллионов людей. Это может спровоцировать быстрый рост так называемых информационных каскадов. В частности, из (6) для переменных среднего числа s -квантов $n_{ph} = E^2$ (что соответствует, например, количеству ретвитов) мы имеем

$$\dot{n}_{ph} = 2An_{ph} - 2Bn_{ph}^2 + 2P(t)\sqrt{n_{ph}}, \quad (14)$$

где полагаем медленной зависимость параметра $P \rightarrow P(t)$ от времени. Аналогичное уравнение (с $P = 0$) характеризует так называемую модель эпидемии SIS, которая описывает распространение информации в социальных сетях на основе роста популяции инфицированных агентов РИС, см. [2]. Порог генерации в этом случае соответствует эпидемическому порогу. В пределе $P = 0$, уравнение (14) допускает простое аналитическое решение

$$n_{ph} = \frac{Ar e^{2At}}{1 + Br e^{2At}}, \quad (15)$$

где $r = \bar{n}/(A - B\bar{n})$; \bar{n} – среднее число s -фотонов в начальный момент времени $t = 0$.

На рис. 3 приведена временная зависимость для среднего числа s -квантов при различных формах информационного воздействия $P(t)$. Синяя кривая на рис.3 соответствует типичному поведению S-образной формы, которое соответствует модели SIS и характеризует (экспоненциальный) рост n_{ph} выше порога ($A > 0$).

Предел $P = 0$ соответствует растущему информационному каскаду, который начинается со «спонтанно» опубликованного сообщения. Затем, при наличии требуемой инверсии в системе АПР, или при соответствующей средней степени узлов $\langle k \rangle$, это сообщение вызывает лавину сообщений (s -квантов) в сети, созданной другими агентами ПР в результате социально стимулируемых явлений эмиссии информационного поля, см. рис. 1(д). В частности, такой каскад может быть описан в рамках функции генерации каскада, которая характеризует детали микроскопической динамики каскада, ср. с [13]. В то же время информационный каскад, показанный на рис. 3, может быть объяснен в рамках парадигмы распространения вирусной информации [14]. Наличие внешнего информационного поля приводит к ускорению распространения информации, см. красную кривую на рис. 3. Для черной и пурпурной кривых предполагается, что информационный вброс носит периодический характер, т.е. $P(t) = P_0 \sin[\nu t]$, где P_0 – амплитуда поля, а ν – частота. В адиабатическом приближении ($\nu \ll \omega$) агенты ПР следуют за эволюцией поля P , что хорошо видно по поведению черной и пурпурной кривых, показанных на рис. 3, соответственно. В пределах установленного временного окна зеленая кривая может быть связана со степенным затуханием информационного каскада. Напротив, черная линия на рис. 3 характеризует экспоненциальный спад каскада $P(t) = P_0 e^{-\nu_e t}$. В пределах большого

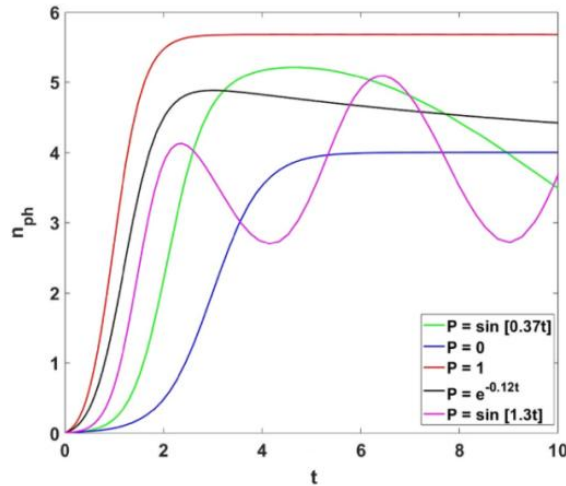


Рис. 3. Зависимость среднего числа s -фотонов n_{ph} от времени (в безразмерных единицах) для $A = 1$ и $B = 0.25$ при $P = 0$ (синяя кривая), $P = 1$ (красная кривая), $P(t) = \sin(0.37t)$ (зеленая кривая), $P(t) = \sin(1.3t)$ (пурпурная кривая) и $P(t) = e^{-0.12t}$ (черная кривая), соответственно

временного окна она приближается к синей кривой, полученной при $P = 0$. Таким образом, графики на рис. 3 могут воспроизводить различные свойства информационного каскада, полученные экспериментально, в зависимости от действия внешнего информационного поля $P(t)$.

Если условие достижения порога генерации не выполняется ($A < 0$), свойства величины n_{ph} строго зависят от параметра P . В частности, в этом пределе можно получить

$$n_{ph} = \frac{(e^{At} (A\sqrt{\bar{n}} + P) - P)^2}{A^2}. \quad (16)$$

При $A < 0$ это уравнение обеспечивает критическое поле $P_c = A^2 \bar{n}$, когда $n_{ph} = \bar{n}$. При $P > P_c$, n_{ph} растёт со временем экспоненциально. В этом случае (15) обеспечивает характерный временной масштаб t_k , необходимый для достижения доли $1/e$ всех «восприимчивых» агентов ПР

$$t_k \propto \frac{1}{\langle k \rangle} \simeq \frac{1}{2A}. \quad (17)$$

Результат, полученный в (16), (17) играет важную роль для описания диффузии информации в РИС, демонстрирующих степенное распределение степеней узлов (2), пусть даже и на ограниченных временных интервалах. Фактически, характерный временной масштаб t_k обратно пропорционален скорости, при которой вирусное сообщение распространяется через структуру РИС; она тем больше, чем больше A . Эхо-камеры обеспечивают усиление информационного обмена и социального возбуждения АПР. Для сетей со степенным распределением степеней это означает кластеризацию и появление хабов, см. рис. 2(б). Скорость передачи информации чрезвычайно возрастает (t_k стремится к нулю) в области сложной сети $1 < \gamma < 3$, что соответствует росту $\langle k \rangle$. Примечательно, что такой эффект более почти не зависит от k . Этот режим соответствует так называемому сверхсильному режиму связи между АПР, составляющими РИС и информационным полем, формируемым РИС. Таким образом, в условиях внешней инъекции социально значимой информации формирование сильного социального поля влияния в виде коллективного мнения в РИС формируется за счет эхо-камер, а также необходимой сетевой коммуникативной топологии РИС.

3. Заключение

Современные социальные сети имеют довольно сложную структуру и предоставляют различные технические возможности для усиления социально значимой информации агентами принятия решений. В этой связи чрезвычайно важно понимать, какие механизмы объективно влияют на скорость распространения информации. В работе рассмотрена эта проблема с позиций квантовой физики, учитывающей на микроскопическом уровне различные элементарные процессы переходов в двухуровневой системе в присутствии поглощения и испускания квантов (информационного) поля. В этой связи впервые предложена модель РИС в виде социального лазера (солазера), который по аналогии с обычным лазером в квантовой оптике, учитывает поглощение, испускание и усиление

социально значимой s-информации, которой обмениваются АПР. Эта модель способна объяснить такие социальные явления, как эхо-камеры, усиление и рост информационных каскадов, усиление социальных действий при даже небольшой внешней инъекции информации. Для выявления сложности распространения информации в РИС предложены методы и подходы статистической теории сетей, а также принцип оптимального (максимального) распространения социального влияния, предполагающий использование гамильтониана взаимодействия излучения с агентами принятия решений, определенного на сложных графах. Такая модель РИС демонстрирует фазовый переход второго рода в состояние, для которого средняя степень узлов превосходит некоторое пороговое значение, определяемое разностью населенностей АПР. Показано, что скорость передачи социально значимой информации в РИС существенно возрастает ближе к аномальной области сложной сети, моделирующей РИС. Проводя аналогию с моделью Изинга [7], можно утверждать, что для формирования в РИС сильного социального поля необходимо иметь эхо-камеры, обладать необходимой сетевой коммуникативной топологией, а также предоставлять агентам принятия решений своевременную и контекстуально актуальную информацию извне.

Литература

1. *Chkhartishvili A.G., Gubanov D.A., Novikov D.A.* Social networks: models of information influence, control and confrontation. – Kindle Edition: Springer, 2019. – 271 p.
2. *Barabási A.-L., Pósfai M.* Network science. – Cambridge: Cambridge University Press. 2016. – 475 p.
3. *Easley D., Kleinberg J.* Networks, crowds, and markets: reasoning about a highly connected world. – Cambridge: Cambridge University Press, 2010. – 744 p.
4. *Galam S.* Sociophysics. – NY: Springer New York, 2012. – 439 p.
5. *Guleva V., Shikov E., Bochenina K., Kovalchuk S., Alodjants A., Boukhanovsky A.* Emerging complexity in distributed intelligent systems // Entropy. – 2020. – Vol. 22, N 12. – P. 1437-1–1437-26.
6. *Suchecki K., Hołyst J. A.* Ising model on connected complex networks // Order, disorder and criticality. Advanced problems of phase transition theory: сб. науч. тр. World Scientific, 2012. – Vol. 3, – P. 167–200.
7. *Chen W., Lakshmanan L., Castillo C.* Information and influence propagation in social networks, – Springer Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2022. – 161 p.
8. *Maleki M., Arani M., Buchholz E., Mead E., Agarwal N.* Applying an epidemiological model to evaluate the propagation of misinformation and legitimate COVID-19-related information on Twitter// Proc. of the 14th International Conference, SBP-BRiMS, – Virtual event, 2021. – P. 23–34.
9. *Tsarev D., Trofimova A., Alodjants A., Khrennikov A.* Phase transitions, collective emotions and decision-making problem in heterogeneous social systems // Scientific Reports. – 2019. – Vol. 9, – P. 18039-1–18039-13.
10. *Alodjants, A.P., Bazhenov A.Yu., Khrennikov, A.Yu., Bukhanovsky A.V.* Mean-field theory of social laser // Scientific Reports. – 2022. – Vol. 12, – P. 8566-1–8566-17.
11. *Lucas A.* Ising formulations of many NP problems // Frontiers in Physics. – 2014. – P. 5-1–5-15.
12. *Хакен Г.* Лазерная светодинамика. – М.: Мир, 1988. – 350 с.
13. *Ghosh R., Lerman K.* A framework for quantitative analysis of cascades on networks // Proc. of the Fourth ACM International conference on Web search and data mining. – Hong Kong, 2011. – P. 665–674.
14. *Cota W., Ferreira, S.C., Pastor-Satorras R., Starnini M.* Quantifying echo chamber effects in information spreading over political communication networks // EPJ Data Science. – 2019. – Vol. 8. – N. 1. – P. 1–13.
15. *Quattrociocchi W., Scala A., Sunstein C. R.* Echo chambers on Facebook // SSRN. – 2016. – Vol. 2795110. – P. 1–15.
16. *Bessi A., Petroni F., Del Vicario M., Zollo F., Anagnostopoulos A., Scala A., Caldarelli G., Quattrociocchi W.* Homophily and polarization in the age of misinformation // The European Physical Journal Special Topics. – 2016. – Vol. 225. – N. 10. – P. 2047–2059.