

УДК 51-7

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОУВЯЗАННОЙ ДИНАМИКИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭПИДЕМИИ И ФОРМИРОВАНИЯ ОБЩЕСТВЕННОГО МНЕНИЯ ПО ВОПРОСУ ВАКЦИНАЦИИ

С.Б. Васильев

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

Россия, 101000, Москва, ул. Мясницкая, 20

E-mail: svasilev@hse.ru

Е.Е. Васильева

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

Россия, 119991, Москва, Ленинский проспект, 53

E-mail: serebryannikovae@lebedev.ru

А.В. Леонидов

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

Россия, 119991, Москва, Ленинский проспект, 53

E-mail: leonidovav@lebedev.ru

Ключевые слова: эпидемия, дискретный выбор, общественное мнение, игра Изинга.

Аннотация: Представлена модель взаимосвязанной динамики эпидемии SIRS и формирования общественного мнения о вакцинации. Базовая двухслойная сеть содержит слои, соответствующие физическим взаимодействиям в реальности и социальным коммуникациям. Слой, соответствующий физическим взаимодействиям, строится на основе данных реальной сети, представляющей коммуникации между старшеклассниками. Эволюция отношения людей к вакцинации описывается с помощью модели Изинга. Модель описывает нетривиальную зависимость результирующей динамики эпидемии от (1) амплитуды шума, (2) исходной структуры мнений и (3) влияния внешней информации.

1. Введение

Для построения количественной модели, описывающей взаимосвязанную эволюцию эпидемий и отношения к вакцинации, естественно использовать двухслойную сеть с взаимосвязанными слоями, содержащими сети, на которых происходит формирование соответственно эпидемий и отношения/мнения к вакцинации. Конкретная модель, которую мы строим, сочетает в себе изинговский механизм формирования бинарного мнения типа «да/нет», действующий в

сети социальных контактов, в сочетании с эпидемическим механизмом SIRS (восприимчивый-зараженный-выздоровевший-восприимчивый) (см. [1], [2] и ссылки в них), работающие в сети физических контактов в реальном пространстве. Таким образом, модель описывает два взаимосвязанных явления распространения, происходящих в двухслойной сети, в которой две сети склеены в узлах, представляющих агентов.

Поведенческие мотивы, лежащие в основе эпидемий, ранее анализировались в рамках теории игр в литературе по формированию решений о вакцинации (подробный обзор см. [3] и ссылки там). Однако, насколько известно авторам, эти модели в основном анализируют проблемы типа безбилетника, связанные с вакцинацией. Пандемия COVID-19 показала, что на ранних этапах распространения вируса решения о вакцинации в значительной степени основываются не на должном фактологическом анализе вероятности заражения с вакцинацией или без нее, а в большей степени на субъективном анализе мнения знакомых, информации из СМИ и т. д., так как фактические данные об эффективности вакцинации, распространении вируса и его опасности пока отсутствуют или кажутся недостаточно достоверными. Одним из возможных способов описания формирования общественного мнения в условиях бинарного выбора является использование модели изинговского типа [4–11]. Настоящий доклад, основан на работе [12], в которой представлена модель типа Изинга, описывающая решения, связанные с вакцинацией.

2. Сеть

Рассматриваемая двухслойная сеть включает слой, представляющий физические контакты, и слой социальных контактов, представляющий существующие каналы коммуникации. Обе составляющие сети имеют общие узлы, представляющие агентов. Первый слой представляет собой сцену распространения эпидемии SIRS. Второй уровень (социальная коммуникация) описывает коммуникативные взаимодействия, влияющие на решения о вакцинации.

Начнем с описания первого слоя. Общеизвестно, что топология контактной сети является одним из ключевых факторов, определяющих свойства процесса распространения эпидемии. Поэтому для построения реалистичного описания эпидемической динамики естественно использовать реальную контактную сеть в качестве базового блока для построения контактного слоя нашего двухслойного графа. Конкретной реальной контактной сетью, которую мы выбрали, является набор данных Contact High School из <https://www.cs.cornell.edu/arb/data/contact-high-school/> [13, 14]. На основе данной информации мы строим граф $G_0 = (V_0, E_0)$. Данный граф затем реплицируется и дополняется случайными связями, что имитирует набор тесных сообществ узлов и слабых связей между ними. Таким образом, мы получаем граф G^{cnt} .

Теперь перейдем к описанию слоя, содержащего сеть социальной коммуникации. Общеизвестно, что социальные сети на базе Интернета резко упрощают общение между людьми. Благодаря различным современным средствам коммуникации люди теперь могут делиться своим мнением, даже находясь на разных континентах. Этот аргумент показывает, что сеть социальной коммуникации включает в себя гораздо больше связей, чем сеть физических контактов. Для генерации графа социальных контактов G^{scl} на основе графа G^{cnt} мы пользуемся механизмом предпочтительного

присоединения [15].

3. Динамика

Предложенная модель описывает взаимосвязанную динамику заражения и вакцинации и отношения к ней, складывающуюся над двумя сетями, реальными космическими физическими контактами и социальным взаимодействием соответственно. Каждый узел/агент i участвует в обоих этих динамических процессах. Его состояние в каждый момент времени t характеризуется множеством (Ξ_t^i, v_t^i, b_t^i) , где Ξ соответствует одному из состояний S (восприимчивое), I (зараженный) или R (выздоровевший (выздоровевший)), $v = \pm 1$ соответствует вакцинированному/не вакцинированному узлу и $b = \pm 1$ является показателем положительного/отрицательного отношения к вакцинации так что $v_t^i = +1$, если узел i вакцинирован в момент времени t , и $v_t^i = -1$, если нет, и $b_t^i = +1$, если агент i привит, а $b_t^i = -1$ в противном случае. Связь между динамическими процессами, возникающими в двух стратах, заключается в вероятности подхватить вирус: как только агент получает вакцину ($v_t^i = +1$), вероятность заразиться падает. Поэтому динамика мнений напрямую влияет на распространение эпидемий.

Динамика распространения эпидемии в слое физических контактов описывается классической SIRS моделью на графе. Процесс формирования мнения о вакцинации управляется переходами $b_t^i \rightarrow -b_t^i$, описанными в рамках зашумленной бинарной игры выбора, характеризуемой полезностью выбора вида

$$(1) \quad U_i(b_t^i, t) = \chi_i H b_t^i + J \sum_{j \neq i} a_{ij}^{\text{scl}} b_t^i b_{t-1}^j + \varepsilon_{b_t^i},$$

где $H > 0$ описывает универсальное внешнее воздействие, например, призывы к вакцинации в СМИ, $\chi_i = \pm 1$ параметризует отношение агента i к этому влиянию, J – параметр, определяющий величину влияния убеждений соседей агента i , a_{ij}^{scl} – элемент матрицы смежности графа социальной коммуникации, $\varepsilon_{b_t^i}$ – идиосинкразический шум.

4. Результаты

В работе выявляется нетривиальная зависимость между амплитудой шума, влияющего на формирование мнения о вакцинации, и долей выздоровевших агентов (т.е. людей, заразившихся вирусом и впоследствии выздоровевших от него). Получается, что увеличение амплитуды шума вызывает два противоположно направленных эффекта. С одной стороны, формирование общественного мнения о вакцинации занимает больше времени и, следовательно, распространение эпидемий происходит быстрее. С другой стороны, выше вероятность достижения равновесия, при котором почти все люди вакцинированы и, следовательно, эпидемии прекращаются. Наложение этих разнонаправленных трендов приводит к существованию некоторой «оптимальной» амплитуды шума. Однако положение этого оптимума сильно зависит от значений параметров модели.

Кроме того, описан новый эффект, связанный с влиянием внешнего поля. В рассматриваемой модели внешнее поле представляет собой интенсивность

подачи официальной информации. Показано, что если первоначальные представления о вакцинации и отношение агентов к официальным источникам информации сильно коррелированы и кластеризованы, то рост интенсивности подачи официальной информации может привести к уменьшению вероятности достижения предпочтительного равновесия в отношении отношения к вакцинации и, следовательно, к потенциальному росту эпидемии.

5. Заключение

Представлена модель совместной динамики формирования мнения о вакцинации и эпидемии SIRS в двухуровневой сети. Модель описывает нетривиальную зависимость между свойствами динамики вакцинации и амплитудой шума, исходной кластеризацией мнений в обществе и величиной внешнего влияния. Предложенная модель может в будущем развиваться в нескольких направлениях. В частности, перспективно исследовать влияние мнения «хабов» на агрегированную динамику и ввести обратное влияние характера распространения эпидемии на процесс формирования мнения о вакцинации.

Список литературы

1. Hethcote H. The mathematics of infectious diseases // *SIAM Review*. 2000. Vol. 42, No. 4. P. 599.
2. Newman M. *Networks*. Oxford university press. 2018.
3. Wang Z., Bauch C., Bhattacharyya S., d'Onofrio A., Manfredi P., Perc M., Perra N., Salathé M., Zhao D. Statistical physics of vaccination // *Physics Reports*. 2016. Vol. 664, No. 1.
4. Brock W., Durlauf S. Discrete choice with social interactions // *The Review of Economic Studies*. 2001. Vol. 68, No. 2. P. 235.
5. Blume L., Durlauf S. Equilibrium concepts for social interaction models // *International Game Theory Review*. 2003. Vol. 5, No. 3. P. 193.
6. Ioannides Y. Topologies of social interactions // *Economic Theory*. 2006. Vol. 28, No. 3. P. 559.
7. Durlauf S., Ioannides Y. Social interactions // *Annual Review of Economics*. 2010. Vol 2, No. 1. P. 451.
8. Bouchaud J. Crises and collective socio-economic phenomena: simple models and challenges // *Journal of Statistical Physics*. 2013, Vol. 151, No. 3-4, P. 567.
9. Leonidov A., Savvateev A., Semenov A. Quantal response equilibria in binary choice games on graphs // *arXiv*. 2019. 1912.09584.
10. Leonidov A., Savvateev A., Semenov A. Qre in the ising game // *CEUR Workshop proc*. 2020.
11. Leonidov A., Savvateev A., Semenov A. Ising game on graphs. *arXiv*. 2021. 2108.00824.
12. Leonidov A.V., Vasilyev S.B., Vasilyeva E.E. Interconnected evolution of epidemic and public vaccination opinion // *JETP letters*. 2023. Vol. 117, No. 1. P. 83-89.
13. Mastrandrea R., Fournet J., Barrat A. Contact patterns in a high school: A comparison between data collected using wearable sensors, contact diaries and friendship surveys // *PLOS ONE*. 2015. Vol. 10, No. 9.
14. Benson A., Abebe R., Schaub M., Jadbabaie A., Kleinberg J. Simplicial closure and higher-order link prediction // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2018. Vol. 115, No. 48.
15. Barabási A., Albert R. Emergence of scaling in random networks // *Science*. 1999. Vol. 286, No. 5439. P. 509-512.