УДК 530

01.00.00 Физико-математические науки

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭПИДЕМИЙ НА ОСНОВЕ АГЕНТНОГО ПОДХОДА

Утакаева Ирина Хайрлыевна
к.ф.-м.н., доцент
SPIN-код: 9185-4692, AuthorID: 589215
utakaev@yandex.ru
Северо-Кавказская государственная гуманитарно-технологическая академия, Черкесск, Россия

Сегодня инфекционные болезни остаются одной из ведущих причин преждевременной смерти людей на Земле. Агентное моделирование может сыграть важную роль в прогнозировании распространения болезни и в оценке мер по локализации. Целью работы является построение имитационной мультиагентной модели распространения эпидемии для формирования мер по эффективному снижению уровня заболеваемости. Использование имитационного мультиагентного подхода в моделировании эпидемий обусловлено тем, что подход позволяет рассматривать много факторов влияющих на эпидемический процесс, дает возможность проводить численные эксперименты. Процессы пространственного распространения и временного изменения этих двух групп эпидемий автор называет *инфекционной динамикой*. Обычно трудно реализуемые пространственные составляющие динамики в предлагаемых моделях берёт на себя топология предфрактального графа, которая наращивается объёмными графами - затравками, а динамика наращения предфрактального графа, называемая его *распознаванием*, отвечает за временную составляющую процесса. Под агентом понимается элементарный участник исследования. Агент активен, находится в некотором состоянии, которое может меняться при влиянии факторов. К свойствам агента отнесятся характеристики, формирующие уровень иммунитета: рост, вес, пол, доход, семейное положение, образование, география

Ключевые слова: МОДЕЛЬ, АГЕНТ, ЭПИДЕМИЯ, РАСПРОСТРАНЕНИЕ, ГРАФ

UDC 530

Physics and Math

SIMULATION MODELING OF DISTRIBUTION OF EPIDEMICS ON THE BASIS OF AGENT APPROACH

Utakaeva Irina Hairlievna
Cand.Phys.-Math.Sci., associate professor
SPIN-code: 9185-4692, AuthorID: 589215
utakaev@yandex.ru
North-Caucasian State Humanities and Technology Academy, Cherkessk, Russia

Today, infectious diseases remain a leading cause of premature deaths in the world. Agent-based modeling can play an important role in predicting the spread of disease and to assess the containment measures. The aim is to construct a multi-agent simulation model for the formation of epidemic measures to reduce effectively their incidence. Using the multi-agent simulation approach to modeling of epidemics due to the fact that the approach allows us to consider a number of factors influencing the epidemic process, makes it possible to carry out numerical experiments. The processes of the spatial distribution and temporal variation of these two groups of epidemics of infectious the author calls dynamics. Usually hard-implemented spatial components of the dynamics in the proposed model can be substituted by predfractal topology of the graph, which is built up by voluminous graphs - primers, and the dynamics of compounding prefractal graph, called its recognition, is responsible for the timing of the process component. Under the term of agent, we consider an elementary study participant. An agent is active; it is in a state that may change under the influence of factors. The properties of the agent are attributed characteristics that form the level of immunity: height, weight, gender, income, marital status, education, geography

Keywords: MODEL, AGENT, EPIDEMIC, SPREAD, GRAPH

Doi: 10.21515/1990-4665-121-085

По данным Всемирной организации здравоохранения ежегодно на земном шаре переносят инфекционные заболевания свыше 1 млрд. человек. Целью предупреждающих мероприятий является воздействие на источник инфекции, чтобы уменьшить обсеменение внешней среды, локализовать распространение микробов, повысить устойчивость населения к заболеваниям. Основными возбудителями инфекционных болезней являются вирусы, бактерии и простейшие. Заболевший становится источником возбудителей болезни. Он может заразить окружающих при контакте или путем обсеменения возбудителями различных объектов внешней среды. Особенно опасны больные, которые своевременно не обращаются за медицинской помощью. Выявить инфекционного больного - задача медицинских работников.

Механизм заражения имеет эпидемиологическое значение и положен в основу классификации инфекционных болезней: кишечные, инфекции дыхательных путей, кровяные инфекции, инфекции наружных покровов, инфекции с различным механизмом передачи. Различают воздушный, водный, пищевой и контактно-бытовой пути передачи инфекции. Есть немало моделей, описывающих процесс распространения инфекционных заболеваний, но они не учитывают демографическую структуру мегаполиса и систему контактов между жителями. Имитация эпидемиологической ситуации позволяет проверить эффективность. Зная пути передачи инфекции, власти могут воздействовать на сети с помощью закрытия заведений, введение карантина, изоляция и лечение.

Рассмотрим ситуацию, когда в городе началось распространение эпидемии и власти должны принять меры по предотвращению. Проводить массовую вакцинацию, ввести карантин, назначить антибиотики? Если отправить в город запасы противовирусных препаратов, то страны-доноры не смогут защитить население от инфекции. От выбора властей зависит не только жизнь людей, но экономическое и социальное благополучие страны. Чтобы выбрать оптимальную стратегию управления, нужно смоделировать сценарии развития событий. Имитация эпидемиологической ситуации позволяет проверить на модели эффективность мероприятий в борьбе со вспышками инфекционных заболеваний. Моделирование путей перемещения жителей города даёт динамическую картину *социальной сети* – аналогичную цепь контактов использует возбудитель инфекции, распространяясь в популяции. Техника *социометрии* впервые предложена Дж. Морено. Термин «социальная сеть» введен в 1954г. социологом Дж. Барнсом. В настоящее время ощущается дефицит систематического изложения методов и алгоритмов сетевого анализа, пригодных для современных прикладных исследований. Агентное моделирование может сыграть важную роль в прогнозировании распространения болезни, а также в оценке мер по локализации. Целью работы является построение имитационной мультиагентной модели распространения эпидемии для формирования мер по эффективному снижению уровня заболеваемости. Использование имитационного мультиагентного подхода в моделировании эпидемий обусловлено тем, что подход позволяет рассматривать много факторов влияющих на эпидемический процесс, дает возможность проводить численные эксперименты. Под социальной *сетью* на качественном уровне понимается структура, состоящая из множества *агентов* (субъектов индивидуальных или коллективных, например индивидов, семей, групп и организаций) и определённого на нём множества отношений (совокупности *связей* между агентами, например, знакомство, дружба, сотрудничество). Формально социальная сеть представляет граф $G=(V,E)$, в котором V - множество вершин (агентов) и E - множество рёбер, соответствующих взаимодействию агентов. Итак, в эпидемиологии, под агентом будем понимать элементарного участника исследования. Агент активен, находится в некотором состоянии, которое может меняться при влиянии факторов. К свойствам агента можно отнести следующие характеристики, которые формируют в совокупности уровень иммунитета: рост h, вес w, пол s, доход d, семейное положение q, образование e, география g.

В модели целый искусственный город агентов, обладающих одинаковым набором свойств, но разных по значениям, т.е. некоторая БД агентов. Эти данные необходимы не только для моделирования на существующих эпидемиях, но мы должны обладать такого рода БД и для внезапных появлений новых вирусов. Обозначим через вершины $v_i \in V, i = \overline{1,n}$ отдельно взятых членов семьи, состоящей из n человек, которые проживают вместе. Соединим вершины v_i $(i = \overline{1,n})$ и v_j $(j = \overline{1,n})$ $i \neq j$ ребром $e = (v_i, v_j)$ в случае, когда между членами семьи i и j имеется тесный бытовой контакт, достаточный для заражения исследуемым инфекционным заболеванием. В случае заражения одного из членов семьи, от него инфекционным заболеванием, передающимся воздушно-капельным путём, могут заразиться остальные члены семьи. Модель контактов между членами семьи, состоящей из 4 человек, будет представлять граф $H_1 = (W_1, Q_1)$ из 5 человек 5-вершинный полный граф $H_2 = (W_2, Q_2)$:

Рис. 1. Модели контактов $H_1 = (W_1, Q_1)$ и $H_2 = (W_2, Q_2)$

В графе-модели увеличится число вершин и рёбер, но останется удивительно стабильной его структура, состоящая из разномасштабных самоподобных частей с разным числом вершин в этих частях. Осталось назвать части затравками, а графовую модель – предфрактальным графом.

Таким образом, на этапе $l = 1$ модель, описывающая контакты в семье, будет представлять собой n_1-вершинный полный граф $G_1 = (V_1, E_1)$. На этапе $l = 2$ модель, описывающая контакты семей, проживающих на одной лестничной площадке, представляется графом $G_2 = (V_2, E_2)$, который можно получить из графа $G_1 = (V_1, E_1)$, применяя операцию ЗВЗ к каждой её вершине.

Причем операцию ЗВЗ можно производить случайным образом графами $H_1=(W_1,Q_1)$ или $H_2=(W_2,Q_2)$. Продолжая процесс, можно описать контакты многоэтажного дома, жилого квартала, города и т.д.

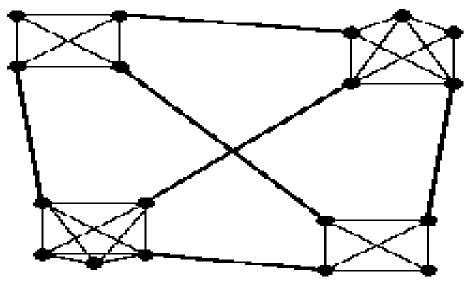

Рис. 2. Модель бытовых контактов людей, живущих на одной лестничной площадке в квартирах под номерами №1-№4.

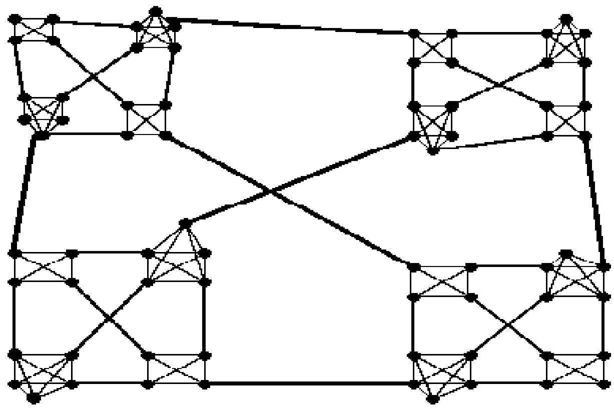

Рис. 3 – Модель более сложных связей жителей одного подъезда

Повторяя этот процесс при $l\to\infty$, структура контактов будет представлять собой фрактальный граф $G=(V,E)$, порождённый двумя полными затравками $H_1=(W_1,Q_1)$ и $H_2=(W_2,Q_2)$. Если семьи состоят из другого числа людей, то затравки будут других типов. Всякий предфрактальный граф $G_l=(V_l,E_l)$, $l=1,2,...$ из траектории построения фрактального графа $G=(V,E)$ является структурой контактов на l-м этапе. Процесс построения фрактального графа $G_l=(V_l,E_l)$ можно обобщить на случай, когда операция ЗВЗ производится множеством затравок $H=\{H_1,H_2,..,H_s\}$, $s\in Z$. Полученная модель будет более адекватной, если дополнительно учесть ряд факторов:

1. Важной особенностью является то, что контакты человека с членами семьи оказываются более частыми, тесными и продолжительными, чем с

соседом, а контакты с жителями соседних подъездов ещё слабее и т.д. Эти характеристики с течением времени меняются пропорционально, поэтому логично всем рёбрам предфрактального графа $G_l=(V_l,E_l)$, $l=\overline{1,L}$ в зависимости от их ранга определить вес по правилу $w_r(e_{s_r})\in(k^{r-1}a,k^{r-1}b)$, где $r=\overline{1,l}$ - ранг ребра, s_r - номер ребра r-го ранга; $k(k>1)$ - коэффициент пропорциональности, влияющий на изменение веса ребра.

2. Из теории эпидемий известно, что каждый человек обладает определённым уровнем иммунитета от инфекционного заболевания: часть людей делает прививки от инфекционных заболеваний и становятся неподверженными инфицированию и обладают максимальным уровнем иммунитета; люди с ослабленной иммунитетом более подвержены инфицированию. Чтобы учесть этот факт, присвоим вершинам графа $G=(V,E)$, представляющего модель бытовых контактов, веса $w(v_i), v_i\in V, i=\overline{1,n}$, $0\le w(v_i)\le 1$. Под весом вершины $w(v_i)$ будем понимать коэффициент, пропорциональный степени защищённости от инфекционного заболевания. Если человек входит в контакт с инфицированным, в математической интерпретации он заражается заболеванием с некоторой вероятностью $w(v_i)=\beta$, $0\le\beta\le 1$. Возможны случаи:

- $w(v_j)=1$ - человек не подвержен заболеванию, ему сделана прививка или уже переболел определённым заболеванием и больше не подвержен;
- $w(v_j)=0$ - человек обязательно будет инфицирован при осуществлении бытовых контактов, достаточных для инфицирования;
- $0<w(v_j)<1$ - человек подвержен заболеванию и при осуществлении бытовых контактов, возможно заражение.

Для социальных сетей ключевым показателем в процессе инфицирования является **«эпидемический порог»** (порог перколяции)- λ_c - критическая вероятность заражения соседа, при превышении которой «инфекция» распространяется по всей сети. Если социальную сеть представить случайным предфрактальным графом, то инфекция с вероятностью заражения, выше эпидемического порога, экспоненциально размножается; вирус с вероятностью заражения, ниже порога перколяции, экспоненциально «вымирает». Предположим, что если человек, обладающий вероятностью заражения исследуемым инфекционным заболеванием $\beta > \lambda_c$ имеет некоторый бытовой контакт с инфицированным, то становится инфицированным, если же $\beta < \lambda_c$, контактируемый остаётся здоровым. Для простоты исследования с учётом общей случайности заражения веса $w(v_i), v_i \in V, i = \overline{1,n}$, $0 \le w(v_i) \le 1$ вершинам графа приписываются произвольным образом генератором случайных чисел.

В теории перколяции рассматриваются процессы протекания слева-направо либо снизу-вверх, определим понятие *«протекания»* (*«просачиваемости»*) на предфрактальном графе со взвешенными вершинами, которые необходимо принять за *исток* и *сток*. Будем считать, что существует *протекание* между различными фиксированными затравками одного ранга $S_1 = H_1 = (W_1, Q_1)$ и $S_2 = H_2 = (W_2, Q_2)$, представляющими *исток* и *сток*, если существует маршрут (u_i, v_j) из вершин $w(v) > \lambda_c$, соединяющий две вершины, где $u_i \in W_1$ и $v_j \in W_2$, $u_i, v_j \in I \cup R$, $i, j = \overline{1,n}$.

Алгоритм поиска порога перколяции предфрактального графа;

1 $\beta_1 := 1$;

2 Осуществляется поиск всевозможных маршрутов, соединяющих исток и сток при β_1; если существует такой маршрут, то возвращаемся к началу шага 2 при $\beta_1 := \beta_1 / 2$, в противном случае $\beta_2 := \beta_1$ и переходим к шагу 3;

3 $\beta_1 := \frac{\beta_1 + \beta_2}{2}$. Если $|\beta_2 - \beta_1| < \xi$, полагаем $\beta := \beta_1$ и алгоритм прекращает свою работу, в противном случае возвращаемся к шагу 2.

Полученное значение β обозначим через λ_c - *порог перколяции*.

Чтобы выявить связи, которые необходимо блокировать для исключения дальнейшего развития эпидемии, необходимо задать ранг рассматриваемой затравки и указать процент заражённых узлов, при котором возможно применение мер по карантину. Как только в затравке указанного ранга достигается процент инфицированных, производится блокирование всех рёбер, инцидентных инфицированным вершинам.

Предположим, что задана модель в виде предфрактального графа, взвешенного по всем вершинам и рёбрам. Рассмотрим структуру распространения инфекционного заболевания, если задан первичный источник инфекции. С математической точки зрения на этапе $l=1$ структура распространения инфекции представляет собой (n_1+1)-вершинную звезду $H_1=(W_1,Q_1)$. В терминологии теории графов вершина, обозначающая первичный источник инфекции, является корнем.

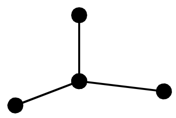

Рис.4. Структура распространения инфекции в виде дерева

Предположим, что на этапах $l>1$ распространения инфекции каждый «новый» источник в состоянии породить ещё n_l источников инфекции. Процесс распространения инфекции в смысле замещения одного источника инфекции (n_l+1) источниками, соответствует процессу порождения фрактального графа $G=(V,E)$, порождённого множеством затравок $H=\{H_1,\ldots,H_l,\ldots,H_s\}$, каждая из которых представляет собой (n_l+1)-вершинную звезду степени $n_l, l=\overline{1,s}$. Ставя в соответствие математическое описание словесному, дальнейший переход к следующему уровню $r+1$ распространения будем производить по следующим правилам:

1 В построении графа участвует множество затравок $H=\{H_1,\ldots,H_l,\ldots,H_s\}$, $T\geq 2$, что соответствует произвольному числу заражаемых индивидов уровня r;

2 Если вершина $v\in V_r$ не является висячей, то она не замещается;

3 Замещаемая затравкой вершина $v \in V_r$ выбирается из подмножества висячих вершин, а само е ребро становится инцидентным центру звезды;

4 Если какая-либо висячая вершина $v \in V_r$ оказалась не замещённой затравкой, то она называется «замороженной» и по отношению к ней операция ЗВЗ не применяется ни на каком из последующих этапов.

Таким образом, из графа $H_1=(W_1,Q)$, применяя к висячим вершинам операцию ЗВЗ $H_2=(W_2,Q)$, получим граф $G_2=(V_2,E_2)$, который является структурой распространения инфекции на следующем этапе $l=2$. Всякий предфрактальный граф $G_l=(V_l,E_l)$, $l=1,2,$. из траектории фрактального графа оказывается структурой распространения инфекции на l-м этапе. На рис. 5 предфрактальный граф $G_3=(V_3,E_3)$, порождённый множеством различных затравок-звёзд. Произведя L переходов, получим предфрактальное корневоедерево $G_L=(V_L,E_L)$, являющееся деревом распространения инфекционного заболевания и обозначим $D_L=(V_L,E_L)$.

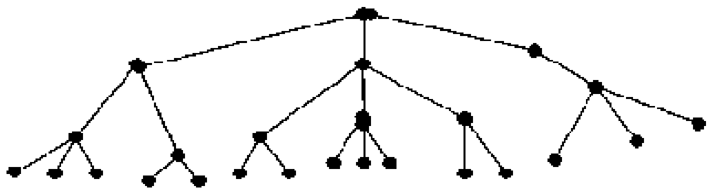

Рис. 5 – Конструкция в виде корневого дерева

Разработан программный продукт в среде FreePascal для имитационного моделирования с применением агентного подхода, который позволяет моделировать эпидемиологическую ситуацию, рассчитать эпидемический порог, порог перколяции, выбрать меры по карантину, чтобы разрушить сеть распространения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жиганова Л.П. Биотерроризм и агротерроризм–реальная угроза безопасности общества.

2. Бароян О.В., Рвачев Л.А. Математика и эпидемиология. – Москва, «Знание», 1977г.

3. Бейли Н. Математика в биологии и медицине. – Москва, «МИР», 1970 .

4. Боев Б.В. Современные этапы математического моделирования процессов развития и распространения инфекционных заболеваний // Эпидемиологическая кибернетика: модели, информация, эксперименты. Москва, 1991.
5. Воробьев А.А., Боев Б.В., Бондаренко В.М., Гинцбург А. Л. Проблема биотерроризма в современных условиях// ЖМЭИ.-2002.-№3.
6. Горелик А.Л., Скрипкин В.А.Методы распознавания. Москва,2004.
7. Емеличев В.А. и др. Лекции по теории графов. Москва, 1990.
8. Кочкаров А.М. Распознавание фрактальных графов: Алгоритмический подход. Нижний Архыз, 1998г.
9. Мандельброт Б. Фракталы, случай и финансы. Москва,2004.
10. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. Москва, 2002.
11. Онищенко Г.Г., Сандахчиев Л.С., Нетесов С.В., Щелкунов С.В. Биотерроризм как национальная и глобальная угроза //ЖМЭИ. -2000 №6.
12. Сапрыкин В. Биотерроризм: страшная реальность наших дней//Южный регион. Компетентно.
13. Сорокин Ю.Д. Биологический терроризм – мифы и реальность// Проблемы местного самоуправления
14. Тарасевич Ю.Ю. Перколяция: теория, приложения, алгоритмы. Москва,2002.
15. Утакаева И.Х., Кочкаров Р.А. К вопросу об алгоритмах распознавания предфрактального графа . НТВ СПбГПУ. Санкт-Петербург, 2010.
16. Шредер М. Фракталы, хаос, степенные законы. Москва,2005.
17. http://tehnic.by
18. http://armscontrol.ru/course
19. https://publications.hse.ru/articles/97267128.

References

1. Zhiganova L.P. Bioterrorizm i agroterrorizm–real'naja ugroza bezopasnosti obshhestva.
2. Barojan O.V., Rvachev L.A. Matematika i jepidemiologija. – Moskva, «Znanie», 1977g.
3. Bejli N. Matematika v biologii i medicine. – Moskva, «MIR», 1970 .
4. Boev B.V. Sovremennye jetapy matematicheskogo modelirovanija processov razvitija i rasprostranenija infekcionnyh zabolevanij // Jepidemiologicheskaja kibernetika: modeli, informacija, jeksperimenty. Moskva, 1991.
5. Vorob'ev A.A., Boev B.V., Bondarenko V.M., Gincburg A. L. Problema bioterrorizma v sovremennyh uslovijah// ZhMJeI.-2002.-№3.
6. Gorelik A.L., Skripkin V.A.Metody raspoznavanija. Moskva,2004.
7. Emelichev V.A. i dr. Lekcii po teorii grafov. Moskva, 1990.
8. Kochkarov A.M. Raspoznavanie fraktal'nyh grafov: Algoritmicheskij podhod. Nizhnij Arhyz, 1998g.
9. Mandel'brot B. Fraktaly, sluchaj i finansy. Moskva,2004.
10. Mandel'brot B. Fraktal'naja geometrija prirody. Moskva, 2002.
11. Onishhenko G.G., Sandahchiev L.S., Netesov S.V., Shhelkunov S.V. Bioterrorizm kak nacional'naja i global'naja ugroza //ZhMJeI. -2000 №6.
12. Saprykin V. Bioterrorizm: strashnaja real'nost' nashih dnej//Juzhnyj region. Kompetentno.
13. Sorokin Ju.D. Biologicheskij terrorizm – mify i real'nost'// Problemy mestnogo samoupravlenija

14. Tarasevich Ju.Ju. Perkoljacija: teorija, prilozhenija, algoritmy. Moskva,2002.
15. Utakaeva I.H., Kochkarov R.A. K voprosu ob algoritmah raspoznavanija predfraktal'nogo grafa . NTV SPbGPU. Sankt-Peterburg, 2010.
16. Shreder M. Fraktaly, haos, stepennye zakony. Moskva,2005.
17. http://tehnic.by
18. http://armscontrol.ru/course
19. https://publications.hse.ru/articles/97267128.