

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОДВИЖНЫХ АГЕНТОВ НА РАЗВИТИЕ ЭПИДЕМИЙ В СЕТЯХ «ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО» ВИДА

© 2016 К.Е. Климентьев

Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 11.11.2016

Рассматриваются некоторые аспекты построения и использования имитационных моделей распространения эпидемий в сетях «геометрического» вида с подвижными узлами.

*Ключевые слова:* самовоспроизводящийся объект, компьютерный вирус, сетевой червь, распространение, взаимодействие, имитационная модель, случайная сеть, случайный граф, динамика, перемещение узлов, равномерное распределение, распределение Леви.

### ВВЕДЕНИЕ

Силами преподавателей и студентов на кафедре ИСТ Самарского национального исследовательского университета продолжается разработка инструментальной среды, предназначенной для моделирования распространения саморазмножающихся агентов, таких как компьютерных черви, биологические инфекции, лесные пожары и т.п. Настоящая статья является частью цикла работ, посвященных анализу факторов, влияющих на развитие эпидемий, и по этой причине целесообразных к моделированию средствами системы.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Моделями адресного пространства, в котором развиваются эпидемии мобильных червей (т.е. вредоносных программ, распространяющихся между устройствами при помощи интерфейсов типа Bluetooth или WiFi), обычно являются случайные графы типа Эрдеша-Реньи (они же графы Радо) и так называемые «геометрические» графы. «Геометрический» граф есть частный случай так называемого «дистанционного» (proximity) графа. Для него зависимость вероятности существования ребра между двумя узлами имеет «порогообразный» характер (см. рис. 1). В работе [2] статистические свойства этих графов исследованы с точки зрения практической реализуемости в системе моделирования. В работе [3] показано, что развитие эпидемий SIR-типа в сетях этих двух видов существенно различается (см. рис. 2), но вопрос об адекватности той или иной модели остается открытым.

Однако обе модели игнорируют один важный фактор, влияющий на распространение реальных эпидемий, а именно – непостоянство топологии графа. Действительно, в реальности носители

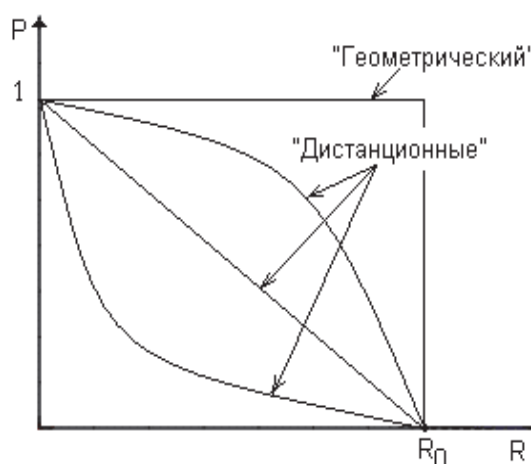


Рис. 1. Зависимость вероятности  $P$  существования ребра от расстояния  $R$  между узлами

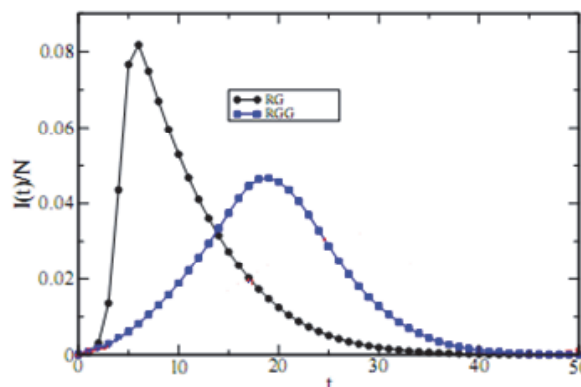


Рис. 2. SIR-эпидемии на случайных графах «геометрического» вида (RGG) и Эрдеша-Реньи (RG) (по М. Nekovee [3])

мобильных устройств (телефонов, планшетов и т.п.) постоянно перемещаются относительно друг друга, теряя и устанавливая новые связи. Представляется, что адекватной моделью пространства, в котором имеют место такие случайные блуждания, будут служить «динамические» графы [5]. Аналитические модели случайных блужданий на графах некоторых типов рассмотрены в [4],

Климентьев Константин Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем и технологий. E-mail: climentieff@ro.ru

однако «геометрические» графы среди них отсутствуют.

Данная работа посвящена моделированию влияния «динамики» узлов на протекание эпидемий в «геометрических» графах.

### АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ЭКСПЕРИМЕНТА

Исторически, на практике встречались, по крайней мере, три типа эпидемий компьютерных червей на мобильных устройствах [1].

1. Распространение червя на трибунах стадиона во время чемпионата мира по легкой атлетике в Финляндии. В этом случае взаимное расположение узлов сети оставалось практически постоянным, топология графа не менялась.

2. Распространение червя с витрины магазина сотовых телефонов в Санта-Монике (США). В этом случае небольшая группа инфицированных узлов оставалась неподвижной, но в радиус ее действия периодически попадали другие узлы.

3. Наконец, эпидемии червей в метро Москвы, Киева и Харькова. В этих случаях инфицированные и неинфицированные узлы постоянно перемещались относительно друг друга.

Разумеется, возможны и другие виды динамики графов, лежащих в основе сетевых моделей пространства.

### ЭКСПЕРИМЕНТЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

На каждом шаге дискретно-событийного моделирования вычисляется новое расположение узлов в пространстве, строится новый граф и выполняется очередной этап моделирования распространения мобильных агентов. В [2] обоснована целесообразность выполнения статистических имитационных экспериментов в единичном квадрате с тороидальной метрикой. Представляется, что все множество всевозможных вариантов поведения динамических графов лежит между двумя крайними сценариями.

Сценарий 1. Граф статичен, узлы неподвижны. Этот сценарий хорошо исследован [3], однако, рассмотрение обычно ограничивается лишь эпи-

демиями SIS- и SIR-типа. С целью расширения знаний о протекании эпидемий в рамках настоящей работы выполнены имитационные эксперименты для различных  $0 \leq R \leq \sqrt{2}$  на «геометрических» графах с  $K=200$  узлами. Основные выводы тривиальны: скорость распространения агента и «острота» эпидемии прямо пропорциональны «плотности» сети, то есть средней степени узлов графа  $\bar{k}$ , которая, в свою очередь, пропорциональна «радиусу действия»  $R$  (см. рис. 3). (Точнее, в соответствии с теорией, скорость должна быть пропорциональна  $\bar{k}^2$ ). Кроме того, чем «острее» протекает эпидемия (т.е. чем больший процент агентов оказывается инфицирован), тем быстрее эта эпидемия заканчивается.

Сценарий 2. Подвижность узлов графа максимальна, то есть, считается, что на каждом шаге дискретно-событийного моделирования каждый узел сети, сохраняя свое состояние (инфицированность, уязвимость, «возраст» и т.п.), перемещается в случайном направлении на случайное расстояние. Фактически, для графов «геометрического» типа это означает, что граф не подвергается последовательной трансформации, а мгновенно меняет свою «геометрию» случайным образом. Основные выводы: в результате моделирования выяснилось, что в этом случае при любых  $R$  протекание эпидемии полностью идентично случаю статичного графа с  $R = \sqrt{2}$ , что соответствует «полному» графу типа «каждый с каждым» (кривые «F» на рис. 3). То есть, обширность эпидемии в этом случае зависит, в первую очередь, от подвижности инфицированных агентов, а не от «радиуса заражения».

Сценарии группы 3. Наконец, промежуточные сценарии поведения эпидемий заслуживают отдельного рассмотрения. Рассмотрены следующие факторы, потенциально влияющие на развитие эпидемий:

- модель перемещения узлов сети в пространстве;
- количественная доля подвижных узлов сети;
- средняя скорость перемещения узлов.

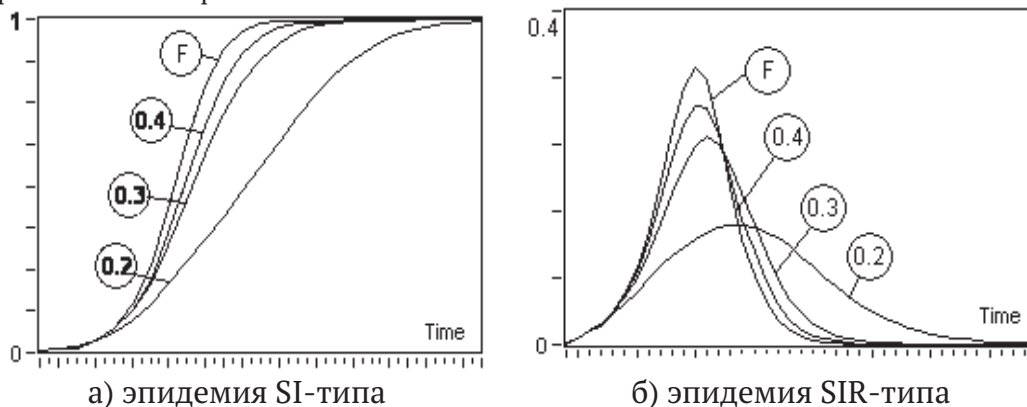


Рис. 3. Зависимость развития эпидемий от «радиуса действия»  $R$  на «геометрическом графе», по вертикали – доля инфицированных узлов

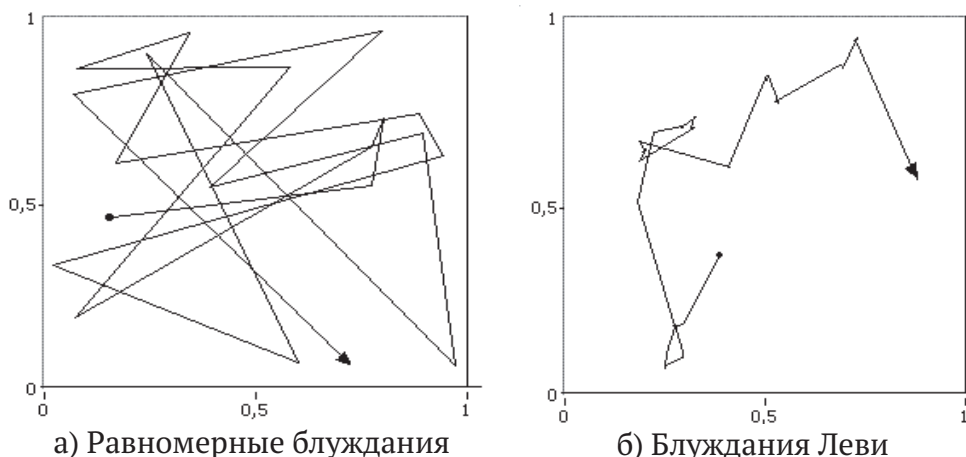


Рис. 4. Поведение точки при разных типах блужданий на плоскости

Модели перемещения узлов могут быть различными (см. рис. 4).

Модель 1. Равномерные блуждания на плоскости. На каждом шаге дискретно-событийного моделирования направление и скорость перемещения узла распределены в соответствии с законом равномерной плотности. Фактически, новое положение узла задается двумя случайными смещениями  $dx$  и  $dy$ , равномерно распределенными на интервале  $[0, \sqrt{2}]$  (см. рис. 4,а).

Модель 2. Блуждания Леви (Lévy Flight). Как показано в [6], эта модель наиболее адекватно отражает пространственные перемещения людей (см. рис. 4,б). В [7] продемонстрировано, что статистические характеристики результатов имитационного моделирования блужданий Леви близки к аналогичным характеристикам реальных блужданий и эта близость может быть еще увеличена путем введения в модель дополнительных факторов, таких как пауза между перемещениями, изменение направления перемещения после паузы и т.п. Однако в настоящей работе рассматривается «простая» модель. Новое положение узла после перемещения проще всего

описывается в терминах полярных координат [6]:

- направление перемещения  $\theta$  распределено равномерно на интервале  $[0, 2\pi]$ ;
- расстояние  $L$  распределено в соответствии с правосторонним, усеченным до  $\sqrt{2}$  законом Леви.

Распределение Леви относится к классу «устойчивых» и отличается так называемым «тяжелым хвостом» (heavy tail), то есть повышенной (по сравнению, например, с экспоненциальным и нормальным распределениями) вероятностью «больших» аргументов (см. рис. 5). Оно характеризуется двумя числовыми параметрами: 1)  $c$  – масштабом; 2)  $\mu$  – смещением. Метод генерации значений псевдослучайной величины, распределенной по Леви, приведен в [8]:

$$X = F^{-1}(U) = \frac{c}{(\Phi^{-1}(1-U/2))^2} + \mu,$$

где  $\Phi(\cdot)$  – функция распределения Гауссовской случайной величины с  $m_x=0$  и  $\sigma_x=1$ , а  $U$  – случайная величина, распределенная равномерно на интервале  $[0, 1]$ . С учетом симметричности нормального распределения относительно математического ожидания, метод генерации может быть упрощен:

$$X = \frac{c}{N^2(0,1)} + \mu,$$

где  $N(0,1)$  – случайная величина, сгенерированная в соответствии с  $\Phi(x)$ .

Наличие «усечения» оказывает влияние на статистические характеристики случайной величины, распределенной по закону Леви, поэтому на практике для построения моделей с желаемой скоростью перемещения узлов можно воспользоваться табл. 1. или рис. 6., полученными в ходе работы над настоящей статьей. Здесь приведены значения, достаточные для моделирования пеших передвижений со скоростями до 1 м/с=3.6 км/ч, например, сотрудника по помещениям офиса.

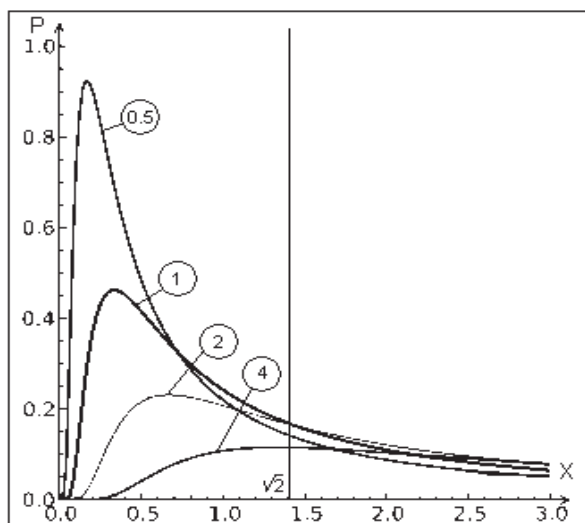
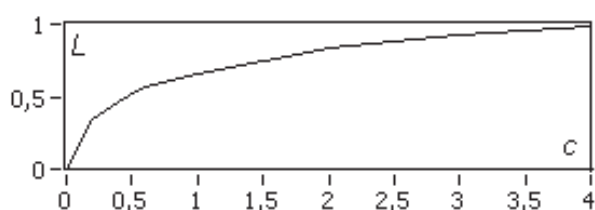


Рис. 5. Распределение Леви ( $\mu=0, c=0.5, 1, 2, 4\dots$ )

Таблица 1. Зависимость между масштабом  $c$  и средней дистанцией перемещения  $L$ 

$c$	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	2.0	3.0	4.0
$L$	0.0	0.35	0.47	0.56	0.61	0.66	0.83	0.93	0.98

Рис. 6. График зависимости  $L$  от  $c$ 

демий на динамически изменяющихся графах целесообразно рассматривать локальную величину  $v_i = \vartheta_i / k_i$ , где  $k_i$  - степень вершины,  $\vartheta_i$  - количество «инфицированных» соседей  $i$ -ой вершины; и вместе с ней среднюю величину  $\bar{v}$  для всего графа. Из самых общих соображений очевидно, что  $v_i = v_i(R, V, \eta)$ . Эта зависимость нуждается в дополнительном изучении.

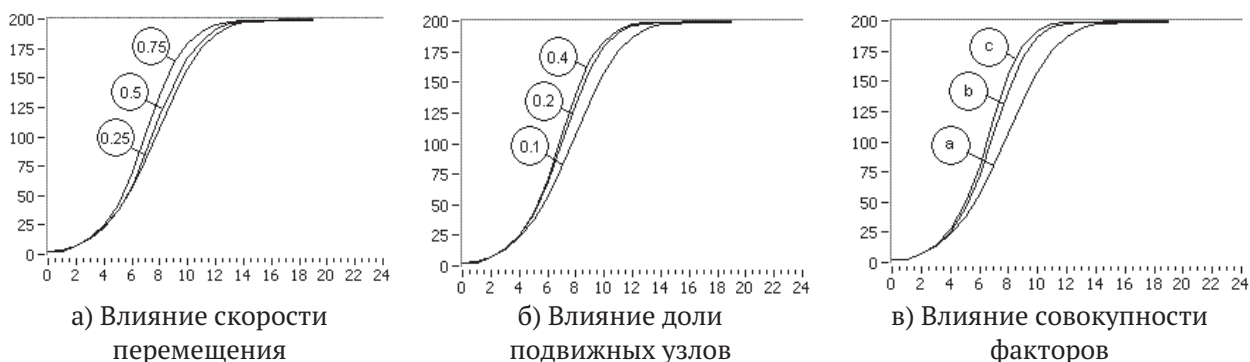


Рис. 7. Влияние различных факторов на протекание эпидемий

В настоящей работе приводятся результаты экспериментов, проведенных в условиях Модели 2, то есть в предположении о перемещениях узлов в соответствии с распределением Леви (см. рис. 7). Все эксперименты выполнялись на 100 прогонах с фиксированным коэффициентом размножения  $\beta=1$  шт/ед.вр, результаты оценивались с доверительной вероятностью  $P_{\text{дов}}=0.95$ , относительная ошибка не превысила  $\epsilon_0=0.08$ .

На рис. 7,а проиллюстрировано влияние на протекание SI-эпидемии средней скорости перемещения узлов  $V \in \{0.25, 0.5, 0.75\}$  при фиксированных параметрах: «радиусе действия»  $R=0.25$  и доле подвижных узлов  $\eta=0.1$ .

На рис. 7,б показано влияние доли подвижных узлов  $\eta \in \{0.1, 0.2, 0.4\}$  при фиксированных параметрах: «радиусе действия»  $R=0.25$  и средней скорости перемещения  $V=0.25$ .

На рис. 7,в изображено совместное влияние совокупности факторов. Кривая (а) соответствует случаю  $\eta=0.1$ ,  $V=0.25$ , кривая (б) случаю  $\eta=0.2$ ,  $V=0.5$  и кривая (с) случаю  $\eta=0.4$ ,  $V=0.75$ .

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Таким образом, все рассмотренные факторы оказывают влияние на протекание эпидемий в сетях «геометрического» вида и должны быть реализованы в системе моделирования.

Очевидно, скорость развития эпидемии тем выше, чем больше «здоровых» узлов сети окружают локальный «инфицированный» узел. Таким образом, при изучении протекания эпи-

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Климентьев К.Е. Компьютерные вирусы и антивирусы: взгляд программиста. М.: ДМК-Пресс, 2013. 656 с.
2. Климентьев К.Е. Случайные графы как модель среды распространения и взаимодействия саморазмножающихся объектов // Известия Самарского научного центра РАН. 2015. Т. 17. № 2(5). С. 1021-1025.
3. Nekovee M. Worm Epidemic in Wireless Ad-hoc Networks // New Journal of Physics, vol. 9, 2007. Pp. 189-200.
4. Draief M., Ganesh A. A random walk model for infection on graphs: spread of epidemics & rumours with mobile agents, - VALUETOOLS'09: Proc. of Fourth Intl. ICST Conf. On Performance Evaluation Methodologies and Tools, Art. 34. Brussels, Belgium, 2009.
5. Кочкаров А.А., Сенникова Л.И. Метрические характеристики динамических графов и их применение // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. 2015. Вып. 18.
6. Rhee I. et al. On the Levi Walk Nature of Human Mobility: Do Humans Walk Like Monkeys // IEEE/ACM Transaction on Networking, Vol. 20. No. 2, 2012. Pp. 630-643.
7. Привалов А.Ю., Царев А.А. Моделирование передвижения узлов DTN сети с использованием принципа наименьшего действия при выборе локаций посещения. Самара, ИТНТ-2015, 2015. С. 248-252.
8. Wikipedia. Lévy distribution. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Levy\\_distribution](https://en.wikipedia.org/wiki/Levy_distribution) (дата обращения 26.05.2016).

**SIMULATION THE EFFECT OF MOBILE AGENTS  
ON THE EPIDEMIC IN THE «GEOMETRICAL» NETWORKS**

© 2016 K.E. Klimentiev

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

Some types of agent mobility, such as Levy flight, are discussed. Also, some results of simulation are presented.

*Keywords:* selfreproductive object, computer virus, network, spreading, interaction, simulation, random graph, random geometrical graph, dynamic, node moving, uniform distribution, Lévy distribution, Lévy flight.