

УДК 004.5

DOI: [10.26102/2310-6018/2023.40.1.023](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.40.1.023)

## Исследование механизма распространения информации в мультиагентной системе во временном окне

А.В. Горшков<sup>1</sup>, О.Я. Кравец<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт вычислительных комплексов им. М.А. Карцева,  
Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup>Воронежский государственный технический университет, Воронеж,  
Российская Федерация  
[csit@bk.ru](mailto:csit@bk.ru)✉

**Резюме.** В работе исследуется процесс распространения информации, в котором каждый агент представлен цепочкой Маркова непрерывного времени с двумя состояниями: L и M. Состояние L относится к «дому», тогда как состояние M относится к «месту встречи». Когда два агента остаются вместе в M, они «встречаются» и формируют контакт. Это означает, что они могут обмениваться информацией, совершать торговые операции и так далее. Целью исследования является разработка эффективного способа вычисления времени распространения и исследование зависимости процесса распространения от таких параметров, как количество агентов, количество неосведомленных агентов в конце процесса и интенсивность контакта. Предполагается, что изначально все агенты находятся в состоянии L, и один из агентов точно обладает частью информации. Создана модель распространения с мобильными агентами в звездообразной сети, которая может быть сведена к сети с двумя узлами. Увеличение размера популяции имеет два противоречивых эффекта, которые заставляют время распространения сначала увеличиваться, затем уменьшаться и в конечном итоге увеличиваться с асимптотическим поведением, подобным гармонической сумме. В связи с этим ожидаемое время, необходимое для информирования дополнительного агента, сначала мало, затем увеличивается, а вероятность информирования всех агентов в течение заданного срока имеет S-образную форму. Также предоставлена информация о том, как на процесс может повлиять изменение параметров моделирования, таких как начальное и конечное количество информированных агентов и интенсивность контактов.

**Ключевые слова:** процесс распространения, мультиагентная система, время распространения, модель распространения, звездообразная сеть.

**Для цитирования:** Горшков А.В., Кравец О.Я. Исследование механизма распространения информации в мультиагентной системе во временном окне. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2023;11(1). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1323> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.40.1.023

## Investigation of the information dissemination mechanism in a multi-agent system in a time window

A.V. Gorshkov<sup>1</sup>, O.J. Kravets<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup>Research Institute of Computing Complexes named after M.A. Kartsev, Moscow,  
Russian Federation

<sup>2</sup>Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
[csit@bk.ru](mailto:csit@bk.ru)✉

**Abstract.** This article explores the process of information dissemination, in which each agent is represented by a continuous-time Markov chain with two states: L and M. L-state refers to the “home”

while M-state refers to the “meeting place”. When the two agents remain together, they “meet” and form a connection. This means that they can exchange information, conduct commercial transactions and etc. The aim of the research is to develop an effective way to calculate the propagation time and study the dependence of the propagation process on parameters such as the number of agents, the number of uninformed agents at the end of the process and the intensity of contact. It is implied that all agents are initially in L-state and one of them necessarily has some information. A distribution model with mobile agents in a star-shaped network has been created, which can be reduced to a network with two nodes. An increase in population size has two contradictory effects that cause the propagation time to increase at first, then decrease, and, eventually, increase with asymptotic behavior similar to a harmonic sum. In this regard, the expected time required to inform an additional agent is small at first, and then increases, and the probability of informing all agents within a given period has an S-shape. Additionally, information as to how changes in the modeling parameters, such as initial and ending number of the informed agents and the intensity of contacts, affect the process is given.

**Keywords:** distribution process, multi-agent system, propagation time, distribution model, star-shaped network.

**For citation:** Gorshkov A.V., Kravets O.J. Investigation of the information dissemination mechanism in a multi-agent system in a time window. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2023;11(1). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1323> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.40.1.023 (In Russ.).

## Введение

Сущность в процессе распространения, такая как, например, информация, передается между агентами по механизмам связи между ними. Литература о процессах распространения обширна и с ней можно ознакомиться с помощью, например, [1, 2].

В [3] исследован процесс распространения информации в мультиагентной системе, в котором каждый агент представлен цепью Маркова с двумя состояниями: L и M. Состояние L относится к «дому», тогда как состояние M относится к «месту встречи». Когда два агента остаются вместе в M, они «встречаются» и образуют контакт. Это означает, что они могут обмениваться информацией, осуществлять иные взаимодействия. Представлен эффективный способ нахождения ожидаемого времени распространения, который вытекает из специального представления диаграммы переходов состояний [3]. Показано, что вместо решения системы линейных уравнений  $O(N^2)$  достаточно решить  $N-1$  систему из  $N$  уравнений, что явно является улучшением, если для решения уравнений не существует алгоритма линейной сложности.

Настоящая статья продолжает исследования, представленные в [3], все определения и обозначения сохранены. В работе установлено, что вероятность того, что все агенты будут информированы ко времени  $t$  как функция от  $t$ , имеет S-образную форму. Более того, ожидаемое количество клиентов, проинформированных к данному моменту времени  $t$ , имеет S-образную форму. Этот вывод согласуется с теорией распространения инноваций, подробно описанной в [4]. Эта теория возникла из наблюдения, что в многочисленных исследованиях в различных областях скорость принятия инновации имеет S-образную форму.

С тех пор этот вывод был сделан во многих других исследованиях и подтвержден теоретическими моделями. Случайную выборку примеров в различных областях, демонстрирующих эмпирическое и теоретическое повсеместное существование S-образной кривой, можно увидеть в [5-10].

Также исследуются возможные зависимости процессов распространения, такие как зависимость времени распространения от интенсивности контакта; интенсивность контакта для достижения целевого времени распространения; эффект от увеличения начального размера графа, то есть количества агентов, которые изначально являются

проинформированными. Данный набор аналогичен проблеме максимизации влияния, рассмотренной в [11]. Изначальное количество проинформированных узлов оказывает сильное влияние, когда количество либо слишком мало, либо очень велико, а эффект довольно умеренный между узлами. В данном исследовании, в отличие от предшествующих, рассмотрена работа с информацией, актуальной не всюду, а только во временном окне.

**Целью исследования** является разработка эффективного способа вычисления времени распространения и зависимости процесса распространения от таких параметров, как количество агентов, количество неосведомленных агентов в конце процесса и интенсивность контакта.

### Распространение во временном окне

Рассмотрим информацию, которая актуальна только в пределах данного временного окна  $[0, t]$ , и после этого интервала агенты перестают распространять информацию. Интересует количество агентов, получивших информацию в течение временного окна, и вероятность того, что процесс завершится до  $t$  после того, как все агенты будут проинформированы.

### Кумулятивная функция распределения $T_{1,N-1}$

Теперь рассмотрим кумулятивную функцию распределения (CDF) времени распространения. Для  $t > 0$  мы вычисляем вероятность успеха; т. е. процесс завершается (информируются все) не позднее  $t$ . Пусть  $P(i, u, t)$  и  $\hat{P}(i, u, t)$  обозначают вероятности того, что процесс завершится не позднее, чем через  $t$  единиц времени с этого момента, при заданном текущем состоянии  $(i, u)$ , агенты в  $M$  информированы и не информированы соответственно. Эти вероятности меняются вместе с  $t$  следующим образом. Первоначально,  $P(i, u, 0) = 1$  при  $u = 0$  и  $P(i, u, 0) = 0$  при  $u > 0$ . Аналогично,  $\hat{P}(i, u, 0) = 0$  если  $i < N$  и  $\hat{P}(N, 0, 0) = P(N, 0, 0) = 1$ . Также, для всех  $t > 0$  и для всех  $i$ ,  $P(i, 0, t) = 1$ .

Для  $t > 0$  и  $i + u < N$  выполнено

$$\begin{aligned} P(i, u, t + dt) = & [1 - (i + u)\lambda dt - (N - i - u)\mu dt]P(i, u, t) + \\ & + i\lambda dt P(i - 1, u, t) \quad \text{при } i > 0 \\ & + u\lambda dt P(i, u - 1, t) \quad \text{при } u > 0 \\ & + (N - i - u)\mu dt P(i + 1, u, t) + o(dt) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \hat{P}(i, u, t + dt) = & [1 - (i + u)\lambda dt - (N - i - u)\mu dt]\hat{P}(i, u, t) + \\ & + i\lambda dt P(i - 1, u, t) \quad \text{при } i > 0 \\ & + u\lambda dt P(i, u - 1, t) \quad \text{при } u > 0 \\ & + (N - i - u)\mu dt \hat{P}(i, u + 1, t) + o(dt) \end{aligned}$$

Для  $t > 0$ ,  $i > 0$ ,  $u > 0$ , и  $i + u = N$  выполнено  $P(N, 0, t) = 1$  для  $t > 0$ , а при  $i < N$

$$\begin{aligned} P(i, u, t + dt) = \hat{P}(i, u, t + dt) = & (1 - N\lambda dt)P(i, u, t) + \\ & + i\lambda dt P(i - 1, u, t) \\ & + u\lambda dt \hat{P}(i, u - 1, t) + o(dt) \end{aligned}$$

На Рисунке 1 показан типичный график вероятности  $P(1, N-1, t)$  того, что все узлы проинформированы ко времени  $t$  (успешная вероятность). Заметим, что при  $\rho \rightarrow \infty$  процесс завершается, когда все агенты переходят в  $M$ . Вероятность того, что это происходит до  $t$ , является просто вероятностью того, что данный агент переместится в

М до того, как  $t$  возводится в степень  $N$ , т. е.  $(1-e^{-\lambda t})^N$ . Эта вероятность показана пунктирными кривыми на Рисунке 1 вместе с вычислением CDF для  $\mu=10$  и  $\mu=50$ , когда  $N \in \{5, 30\}$  и  $\lambda=1$ . Сверху  $N=5$ , снизу  $N=30$ .

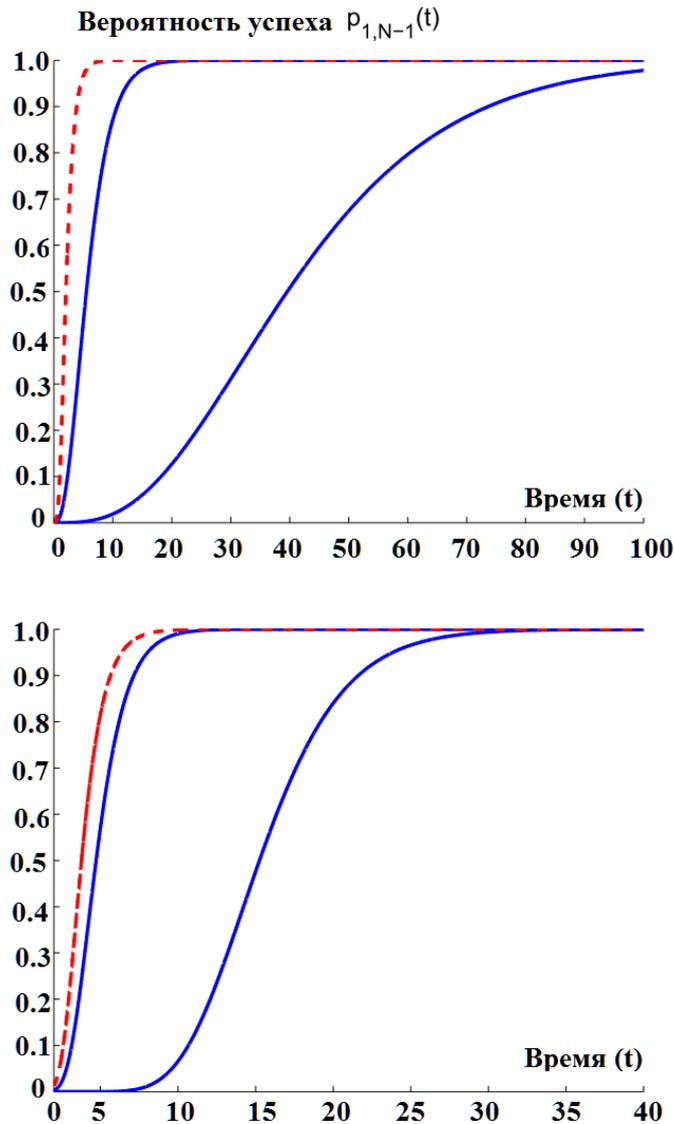


Рисунок 1 – Кумулятивные функции распределения для  $T_{1,N-1}$  при  $\mu \rightarrow 0$  (верхний пунктирный график),  $\mu=10$  (средний график), и  $\mu=100$  (нижний график)

Figure 1 – Cumulative distribution functions for  $T_{1,N-1}$  at  $\mu \rightarrow 0$  (upper dotted graph),  $\mu=10$  (middle graph), and  $\mu=100$  (lower graph)

Замечание 1. CDF имеет S-образную форму, аналогичную нормальному распределению. Действительно,  $T_{1,N-1}$  представляет собой сумму случайных величин, соответствующих времени, необходимому для увеличения числа информированных клиентов на одного. Однако эти случайные величины не являются независимыми; например, несколько агентов часто информируются одновременно. Также можем видеть, что распределение не сводится к нормальному распределению по формуле

$$T_{1,N-1} \rightarrow (1-e^{-\lambda t})^N \text{ при } \rho \rightarrow \infty.$$

Замечание 2. На Рисунке 2 показана чувствительность CDF к изменению  $N$ . С увеличением  $N$  уменьшаются вероятности как очень короткого, так и очень большого

времени распространения. Это можно объяснить тем, что, с одной стороны, при увеличении  $N$  требуется информирование большего числа агентов, и вероятность того, что это будет выполнено за короткий промежуток времени, уменьшается. С другой стороны, когда  $N$  увеличивается, быстро формируется зародыш информированных агентов, и с этого момента распространение происходит быстро. Здесь  $\lambda=1$ . Также  $N=2, 5, 10, 30$ , где  $N$  увеличивается сверху вниз вблизи  $t=0$  и снизу вверх при больших значениях  $t$ .

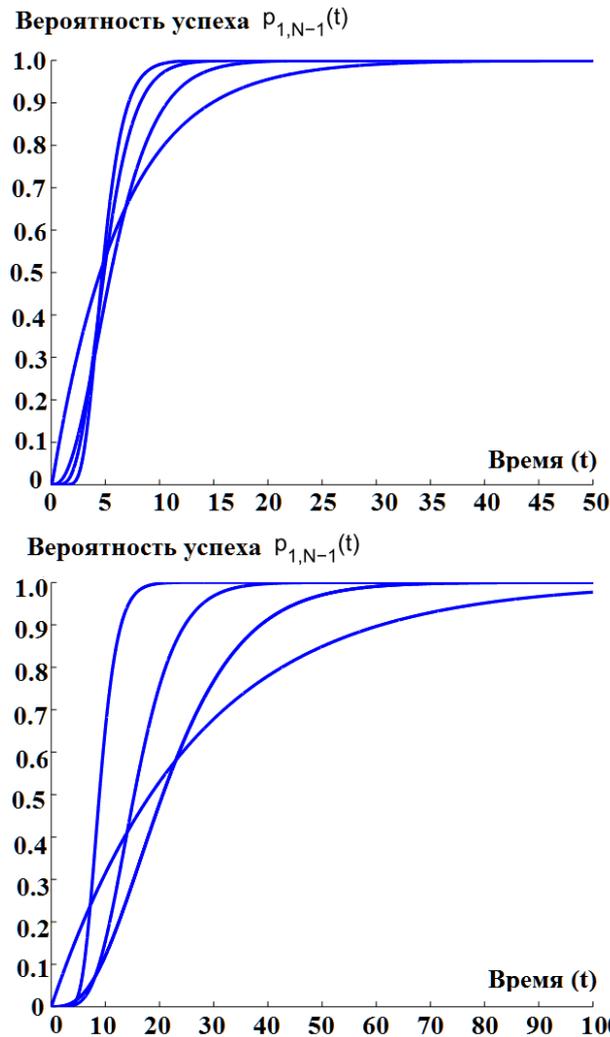


Рисунок 2 – Кумулятивные функции распределения для  $T_{1,N1}$  при  $\mu=10$  (верх) и  $\mu=50$  (низ)  
Figure 2 – Cumulative distribution functions for  $T_{1,N1}$  at  $\mu=10$  (top) and  $\mu=50$  (bottom)

### Число информированных агентов

Сколько агентов будет проинформировано через время  $t$  после начала процесса? Теперь вычислим вероятности состояний в момент времени  $t$  и, в частности, ожидаемое число информированных агентов.

Это число легко вычислить при  $\rho \rightarrow \infty$ . В этом случае узел информируется в момент времени  $t$ , если он является изначально информированным агентом, либо и этот агент, и первоначально информированный переместились из  $L$  в  $M$  до времени  $t$ . Следовательно, ожидаемое количество информированных агентов в момент времени  $t$  равно  $1+(N-1)(1-e^{-\lambda t})^2$ .

Опишем общее решение. Пусть  $Q(i,u,t)$  и  $\hat{Q}(i,u,t)$  обозначают вероятности соответствующих состояний в момент времени  $t$ . Первоначально, когда  $t=0$ ,  $Q(1,N-1,0)=1$  и, что эквивалентно,  $\hat{Q}(1,N-1,0)=1$ , тогда как все остальные состояния в момент времени  $t$  имеют нулевую вероятность. Тогда мы имеем следующие дифференциальные уравнения (с точностью до погрешности  $o(dt)$ ). Для  $i+u < N$ ,

$$\begin{aligned} Q(i,u,t+dt) = & [1 - (i+u)\lambda dt - (N-i-u)\mu dt]Q(i,u,t) + \\ & + (N-i-u+1)\mu dt Q(i-1,u,t) \quad \text{при } i > 0 \\ & + (i+1)\lambda dt Q(i+1,u,t) \\ & + (u+1)\lambda dt Q(i,u+1,t) \quad \text{при } i+u+1 < N \\ & + (i+1)\lambda dt \hat{Q}(i+1,u,t) \quad \text{при } i+u+1 < N \end{aligned} \quad (1)$$

(строгое неравенство в последней строке предотвращает дублирование с (1), когда  $i+u+1=N$ ). Поэтому, для  $i+u=N$  верно

$$\begin{aligned} \hat{Q}(i,u,t+dt) = & [1 - (i+u)\lambda dt - (N-i-u)\mu dt]\hat{Q}(i,u,t) + \\ & + (N-i-u+1)\mu dt \hat{Q}(i,u-1,t) \quad \text{при } u > 0 \\ & + (u+1)\lambda dt \hat{Q}(i,u+1,t) \end{aligned}$$

Вероятность того, что к моменту времени  $t$  будет проинформировано по крайней мере  $k$  агентов, равна

$$\sum_{\substack{u \leq N-k \\ i+u \leq N}} Q(i,u,t) + \sum_{\substack{i \geq k \\ i+u < N}} \hat{Q}(i,u,t)$$

Вероятности  $P(i,u,t)$  и  $\hat{P}(i,u,t)$  связаны с вероятностями  $Q(i,u,t)$  и  $\hat{Q}(i,u,t)$ .

Например,  $P(1,N-1,t)$  может быть вычислено как  $\sum_{i=0}^N Q(i,0,t)$ .

На Рисунке 3 показано поведение ожидаемого числа информированных агентов в зависимости от времени ( $\lambda=1$ , сверху вниз  $N=50$  и  $\mu=10, 50, 100$ ). Кривые имеют S-образную форму, аналогичную общепринятым эмпирическим данным и теоретическим моделям.

### Зависимость времени распространения от интенсивности контактов

Если исследуется распространение информации, одной из задач является ускорение процесса распространения. Напротив, если речь идет о распространении болезни, мы будем заинтересованы в ее замедлении. Естественной регулируемой переменной является интенсивность контакта,  $\rho$  которой можно управлять, изменяя  $\lambda$  или  $\mu$ . Рисунок 4 показывает зависимость ожидаемого времени распространения от  $\mu$  для различных размеров популяции и  $\lambda=1$ . Также  $N=2, 4, \dots, 20$  (верх) и  $N=10, 20, \dots, 100$  (низ). Возрастающие значения  $N$  прикрепляются к графикам снизу вверх вблизи нуля и сверху вниз для больших значений  $\mu$ .

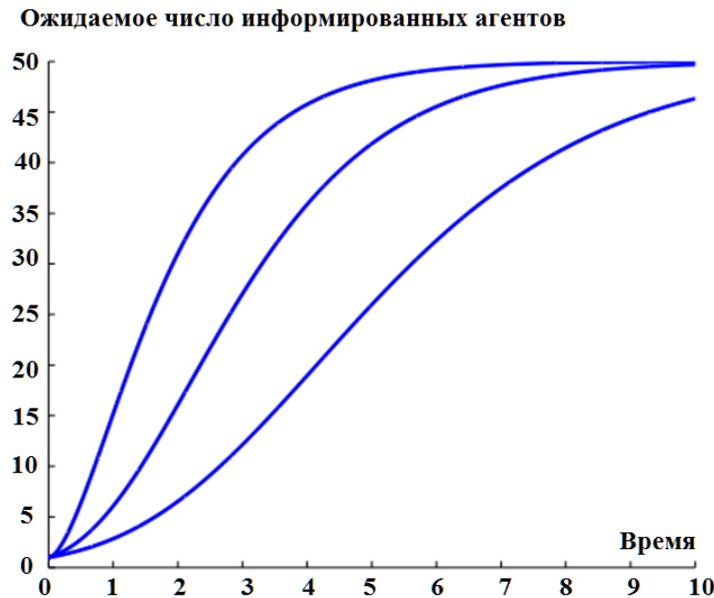


Рисунок 3 – Ожидаемое количество информированных агентов  
Figure 3 – Expected number of informed agents

### Достижение целевого времени распространения

Рисунок 5 (возрастающие значения  $T$  соответствуют графикам снизу вверх) показывает количество мест встречи, необходимое для достижения заданного  $T_{1,N-1}$ , как функции от  $N$ , где  $\lambda=1$ . Можно явно вычислить пересечения кривых с осями. Пересечение с осью  $\mu$  при  $N=2$ , с  $\lambda=1$ ,  $T_{1,1}=1.5+\mu/2$ ,  $\mu=2T_{1,1}-3$ . Пересечение с осью  $N$  при  $\mu=0$ , тогда целевое время распространения равно сумме гармоник  $H(N)$ . Например, как видно на Рисунке 5,  $H(30)\approx 4$ ; следовательно нижняя кривая, которая соответствует  $T_{1,N-1}=4$ , пересечет  $\mu=0$  около  $N=30$ . Аналогично, кривая выше, которая соответствует  $T_{1,N-1}=4.5$ , пересечет 0 в  $H(50)\approx 4.5$ .

Замечание 2. Кривые сначала уменьшаются при увеличении числа агентов с двух до трех, а затем растут, в конце концов уменьшаясь, пока не достигают нуля, где  $H(N)\approx T_{1,N-1}$ . Таким образом, когда  $N$  велико, нам нужно малое  $\mu$  для достижения заданного целевого времени распространения. Но и когда  $N$  мало, нам нужно относительно малое  $\mu$ .

### Выбор начального количества источников

Предполагаем, что процесс начинается с заданного числа  $k$  информированных агентов. Теперь исследуем влияние размера набора источников на время распространения (Рисунок 6). Когда  $\rho \rightarrow 0$ , учитывая начальный размер  $k$ , ожидаемое время, пока все агенты не будут проинформированы, определяется аналогично уравнению (6) [3]:

$$\sum_{i=k}^{N-1} \frac{1}{N} \left( \frac{1}{N-i} + \frac{1}{i} \right) = \frac{1}{N} \left( \sum_{j=1}^{N-k} \frac{1}{j} + \sum_{i=1}^{N-1} \frac{1}{i} \right) = \frac{1}{N} (H(N-k) + H(N-1)) \quad (2)$$

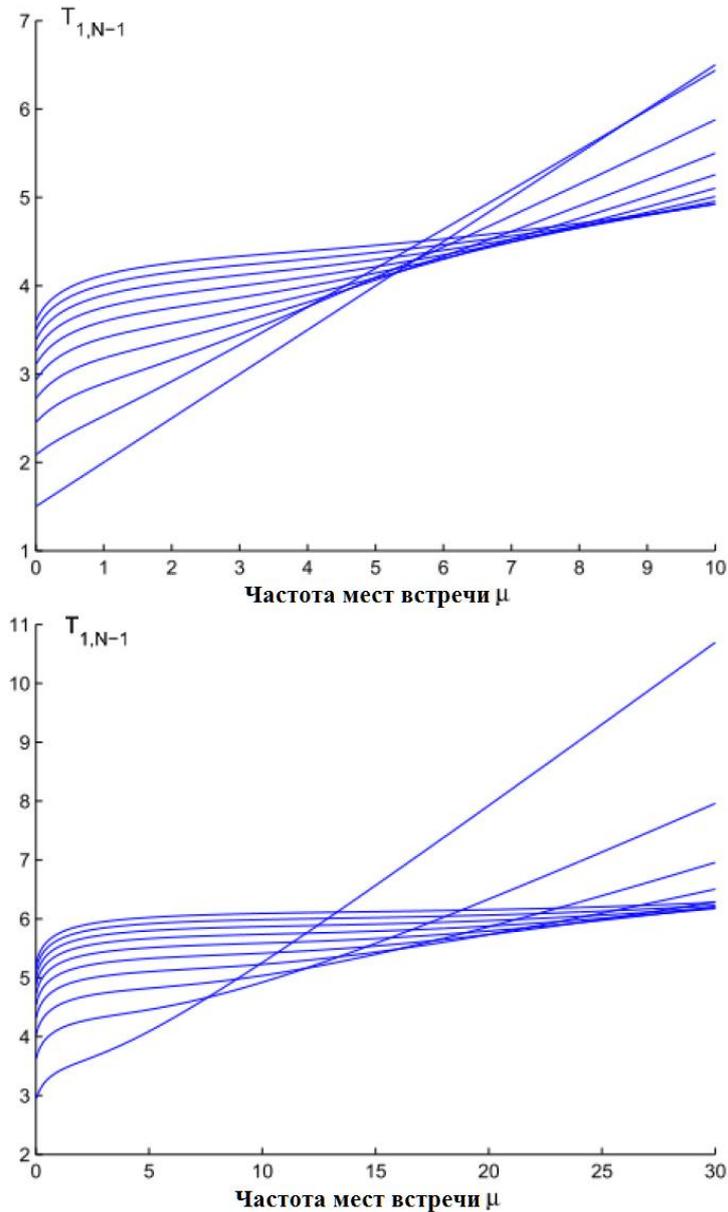


Рисунок 4 –  $T_{1,N-1}$  как функция частоты мест встречи  $\mu$   
 Figure 4 –  $T_{1,N-1}$  as a function of the frequency of meeting places  $\mu$

На Рисунке 6 показано ожидаемое время размножения для  $N=30$  и  $N=50$  и всех возможных размеров источников  $k=1, \dots, N$ . На верхнем рисунке  $N=30$ , а на нижнем рисунке  $N=100$ . Также  $\mu=1, 10, 50, 100$  с возрастающими значениями снизу вверх,  $\lambda=1$ .

**Замечание 3.** Из Рисунка 6 видно, что увеличение числа источников оказывает сильное влияние на сокращение времени размножения, когда число либо очень маленькое, либо очень большое, а промежуточный эффект весьма умеренный.

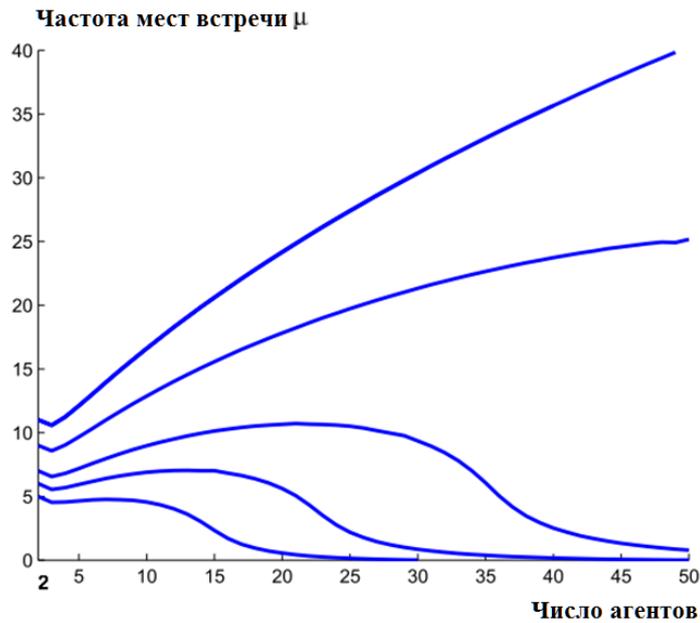


Рисунок 5 – Частота мест встречи  $\mu$ , необходимая для достижения заданного ожидаемого времени распространения  $T_{1,N-1}$ , в зависимости от числа агентов  $N$ , для  $T_{1,N-1}=4, 4,5, 5, 6, 7$  и  $\lambda=1$   
Figure 5 – Frequency of meeting points  $\mu$  required to achieve a given expected propagation time  $T_{1,N-1}$ , depending on the number of agents  $N$ , for  $T_{1,N-1}=4, 4,5, 5, 6, 7$  and  $\lambda=1$

### Обсуждение результатов

В статье рассматривается простая модель распространения с мобильными агентами в звездообразной сети, которая может быть сведена к сети с двумя узлами. Увеличение размера популяции имеет два противоречивых эффекта, которые заставляют время распространения сначала увеличиваться, затем уменьшаться и в конечном итоге увеличиваться с асимптотическим поведением, подобным гармонической сумме. В связи с этим ожидаемое время, необходимое для информирования дополнительного агента, сначала мало, а затем увеличивается, а вероятность информирования всех агентов в течение заданного срока имеет S-образную форму. Также предоставлена информация о том, как на процесс может повлиять изменение параметров моделирования, таких как начальное и конечное количество информированных агентов и интенсивность контактов.

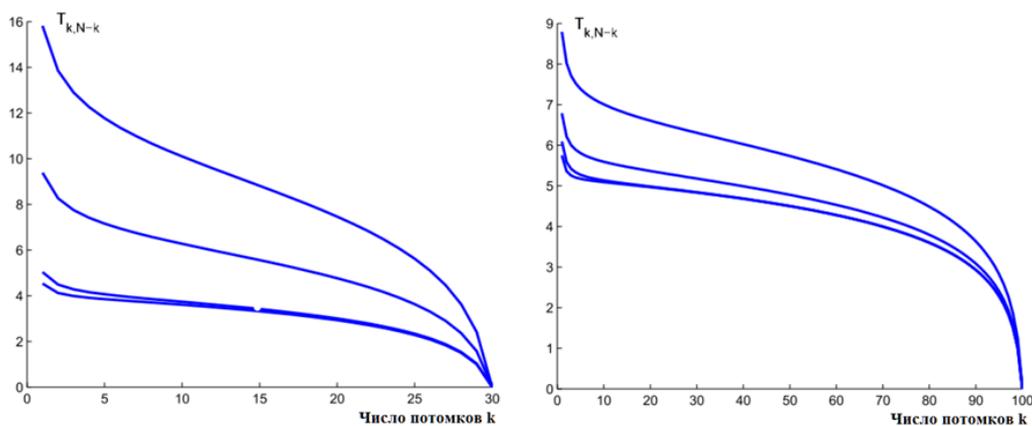


Рисунок 6 – Ожидаемое время распространения  $T_{k,N-k}$  в зависимости от начального числа  $k$   
Figure 6 – Expected propagation time  $T_{k,N-k}$  depending on the initial number  $k$

## Заключение

В работе предлагается эффективный способ вычисления времени распространения и исследуется зависимость процесса распространения от таких параметров, как количество агентов, количество неосведомленных агентов в конце процесса и интенсивность контакта. Создана модель распространения с мобильными агентами в звездообразной сети, которая может быть сведена к сети с двумя узлами. Увеличение размера популяции имеет два противоречивых эффекта, которые заставляют время распространения сначала увеличиваться, затем уменьшаться и в конечном итоге увеличиваться с асимптотическим поведением, подобным гармонической сумме. В связи с этим ожидаемое время, необходимое для информирования дополнительного агента, сначала мало, затем увеличивается, а вероятность информирования всех агентов в течение заданного срока имеет S-образную форму. Также предоставлена информация о том, как на процесс может повлиять изменение параметров моделирования, таких как начальное и конечное количество информированных агентов и интенсивность контактов.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Centola D. The spread of behavior in an online social network. *Science*. 2010;329(5996):1194–1197. DOI: 10.1126/science.1185231.
2. Nowzari C., Preciado V.M., Pappas G.J. Analysis and control of epidemics. *IEEE Control Systems Magazine*. 2016;36(1):26–46. DOI: 10.1109/MCS.2015.2495000.
3. Горшков А.В. Исследование механизма распространения информации в мультиагентной системе на основе марковских процессов. *Системы управления и информационные технологии*. 2022;90(4):42–48. DOI: 10.36622/VSTU.2022.90.4.009.
4. Feola G., Butt A. The diffusion of grassroots innovations for sustainability in Italy and Great Britain: An exploratory spatial data analysis. *Geographical Journal*. 2017;183(1):16–33. DOI: 10.1111/geoj.12153.
5. Jin M, Liu F, Zhou C. Rumor spreading: A survey. *2nd Int. Conf. on Artificial Intelligence Engng. Appl.*, 2017:263–269. DOI: 10.12783/dtcse/aiea2017/14942.
6. Isella L., Stehlé J., Barrat A., Cattuto C., Pinton J.-F. What’s in a crowd? Analysis of face-to-face behavioral networks. *Journal of Theoretical Biology* 2011;271(1):166–180. DOI: 10.1016/j.jtbi.2010.11.033.
7. Manzo G., Gabbriellini S., Roux V., M’Mbogori F.N. Complex contagions and the diffusion of innovations: evidence from a small-N study. *Journal of Archaeological Method Theory*. 2018;25(4):1109–1154. DOI: 10.1007/s10816-018-9393-z.
8. Rogers E.M. *Diffusion of Innovations*. New York, Free Press; 1995. 518 p.
9. Simpson G., Clifton J. Testing diffusion of innovations theory with data: Financial incentives, early adopters, and distributed solar energy in Australia. *Energy Research & Social Science*. 2017;29:12–22. DOI: 10.1016/j.erss.2017.04.005.
10. Xiong H., Wang P., Bobashev G. Multiple peer effects in the diffusion of innovations on social networks: a simulation study. *Journal of Innovation and Entrepreneurship*. 2018;7(2):1–18. DOI: 10.1186/s13731-018-0082-7.
11. Sun H., Cheng R., Xiao X., Yan J., Zheng Y., Qian Y. Maximizing social influence for the awareness threshold model. *Database Systems for Advanced Applications, Lecture Notes in Computer Science*. 2018;10827:491–510. DOI: 10.1007/978-3-319-91452-7\_32.

## REFERENCES

1. Centola D. The spread of behavior in an online social network. *Science*. 2010;329(5996):1194–1197. DOI: 10.1126/science.1185231.

2. Nowzari C., Preciado V.M., Pappas G.J. Analysis and control of epidemics. *IEEE Control Systems Magazine*. 2016;36(1):26–46. DOI: 10.1109/MCS.2015.2495000.
3. Gorshkov A.V. Investigation of the mechanism of information dissemination in a multi-agent system based on Markov processes. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii = Control systems and information technologies*. 2022;90(4):42–48. DOI: 10.36622/VSTU.2022.90.4.009.
4. Feola G., Butt A. The diffusion of grassroots innovations for sustainability in Italy and Great Britain: An exploratory spatial data analysis. *Geographical Journal*. 2017;183(1):16–33. DOI: 10.1111/geoj.12153.
5. Jin M, Liu F, Zhou C. Rumor spreading: A survey. *2nd Int. Conf. on Artificial Intelligence Engrg. Appl.*, 2017:263–269. DOI: 10.12783/dtcse/aiea2017/14942.
6. Isella L., Stehlé J., Barrat A., Cattuto C., Pinton J.-F. What’s in a crowd? Analysis of face-to-face behavioral networks. *Journal of Theoretical Biology* 2011;271(1):166–180. DOI: 10.1016/j.jtbi.2010.11.033.
7. Manzo G., Gabbriellini S., Roux V., M’Mbogori F.N. Complex contagions and the diffusion of innovations: evidence from a small-N study. *Journal of Archaeological Method Theory*. 2018;25(4):1109–1154. DOI: 10.1007/s10816-018-9393-z.
8. Rogers E.M. *Diffusion of Innovations*. New York, Free Press; 1995. 518 p.
9. Simpson G., Clifton J. Testing diffusion of innovations theory with data: Financial incentives, early adopters, and distributed solar energy in Australia. *Energy Research & Social Science*. 2017;29:12–22. DOI: 10.1016/j.erss.2017.04.005.
10. Xiong H., Wang P., Bobashev G. Multiple peer effects in the diffusion of innovations on social networks: a simulation study. *Journal of Innovation and Entrepreneurship*. 2018;7(2):1–18. DOI: 10.1186/s13731-018-0082-7.
11. Sun H., Cheng R., Xiao X., Yan J., Zheng Y., Qian Y. Maximizing social influence for the awareness threshold model. *Database Systems for Advanced Applications, Lecture Notes in Computer Science*. 2018;10827:491–510. DOI: 10.1007/978-3-319-91452-7\_32.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Горшков Алексей Владиславович, Alexey Vladislavovich Gorshkov**, Head of начальник ИТЦ-5, Научно-исследовательский институт вычислительных комплексов им. М.А. Карцева, Москва, Российская Федерация. STC-5, Research Institute of Computing Complexes named after M.A. Kartsev, Moscow, Russian Federation.

**Кравец Олег Яковлевич, Oleg Jakovlevich Kravets**, Доктор технических наук, профессор, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация. Doctor of Technical Sciences, Professor at Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation.  
e-mail: [csit@bk.ru](mailto:csit@bk.ru)

*Статья поступила в редакцию 18.02.2023; одобрена после рецензирования 28.02.2023; принята к публикации 15.03.2023.*

*The article was submitted 18.02.2023; approved after reviewing 28.02.2023; accepted for publication 15.03.2023.*