

Оптимизация структуры событий для агентного моделирования эпидемического процесса

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

Рассмотрена актуальная задача моделирования эпидемического процесса. Описано состояние теории моделирования эпидемий на её современном этапе. В качестве основы для дальнейших исследований было выбрано имитационное мультиагентное моделирование с применением событийного подхода. Представлена и описана в математической постановке разработанная имитационная модель эпидемического процесса. Предложено упрощение рассмотрения процесса инфицирования, что позволило оптимизировать структуру событий и дало возможность рассматривать значительно большие выборки агентов за то же расчётное время. Проведена проверка общей адекватности предложенной модели путём сравнения с классическими моделями.

Ключевые слова: мультиагентное моделирование, моделирование эпидемического процесса, дискретно-событийный подход.

Введение

Проблема распространения инфекционных заболеваний имеет большое социальное и экономическое значение для общества в целом. Одним из современных средств, позволяющих формально описать выявленные факторы и выполнить прогноз относительно эпидемического состояния в обществе, является моделирование.

В настоящее время получила развитие та точка зрения, что наиболее адекватно реальному поведению больших систем соответствует использование агентного подхода для математического и имитационного моделирования, поскольку он позволяет кардинально уменьшить количество ограничений. Построение имитационных моделей сложных систем, в частности, для моделирования распространения инфекций, – актуальная проблема.

Наличие адекватной математической модели представляет собой необходимое условие для достижения качественного прогноза относительно уровня распространения заболевания. Континуальным эпидемическим моделям типа SIR, теория которых берёт своё начало с первой половины XX века [1], присуще наличие допущений типа однородности популяции, равномерности географического распределения, что снижает точность прогнозов.

1. Моделирование эпидемического процесса

Первое исследование, которое позволило сделать шаг вперёд по сравнению с классическими моделями, представлено в работе [2] (модель Барояна–Рвачёва). Фактически эта модель так же, как и классические модели, была основана на системе дифференциальных уравнений. Однако в ней использовано понятие модельного времени и учитывалась длительность пребывания в том или ином состоянии. Тем не менее, описанные недостатки данной модели в полной мере не были устранены.

Для устранения этих недостатков получило развитие имитационное моделирование, которое позволяет рассматривать большое количество факторов,

влияющих на эпидемический процесс [3, 4]. Данное направление и его использование применительно к эпидемическому процессу было описано в работах [5,6].

Адекватность имитационной модели в большой степени зависит от количества агентов в системе. Использование больших популяций и детализация свойств агентов приводит к необходимости применения наиболее современных информационных средств и технологий, в частности – алгоритмов, оптимальных по количеству выполняемых машинных операций. При мультиагентном подходе процесс моделирования основывается на построении и обработке очереди событий, которые можно разделить на два типа:

1. изменение состояния агента с точки зрения внешней среды (физическое положение агента);
2. изменение внутреннего состояния агента. События этого типа возникают в результате взаимодействия агента с другими агентами, а также с внешней средой.

Задачей является поиск и использование такого набора свойств и методов агентов как объектов, который позволил бы в наибольшей степени использовать преимущества мультиагентного подхода.

2. Математическая постановка имитационной модели

В общем виде предложенная имитационная модель эпидемического процесса описана в [7-9]. В данной работе предлагается формальное описание модели. Рассмотрим агента как набор свойств:

$$a = \langle s, s_t, c, t_a, l \rangle, \quad a \in A, s \in S, c \in C, t_a \in T_a, \quad (1)$$

где s_t – время пребывания в состоянии s ;

l – продолжительность жизни;

A – множество всех агентов;

S – множество различных состояний агентов;

C – множество ячеек рабочей области;

T_a – множество типов, к которым могут принадлежать агенты.

Множество состояний агента определено предварительно и является постоянным:

$$S = \{Susceptible, Exposed, Infected, Convalescent, Recovered, Dead\}. \quad (2)$$

Использование такого набора состояний основывается на идее разделения всей популяции на подмножества исходя из их состояний по эпидемическим признакам (классическая модель типа SIR [10]). Предложенный набор характеризует модель как аналог расширенной модели типа SEIRS [11].

На рис. 1 показаны переходы между состояниями:

- *Susceptible* – агент здоров (может быть подвержен заражению).
- *Exposed* – агент подвергся заболеванию. Данное состояние представляет собой инкубационный период. В течение этого времени агент ещё не является заболевшим, но уже имеет шансы передавать инфекцию.
- *Infected* – агент болен. Агенты в этом состоянии являются наиболее вероятными источниками инфекции для других агентов.
- *Convalescent* – агент выздоравливает. Данное состояние характеризует период, когда исчезли клинические симптомы заболевания, но агент по-прежнему

может быть носителем заболевания. Наличие такого состояния характерно для определённых инфекционных заболеваний.

- Recovered – агент выздоровел (приобрёл иммунитет). Агенты в этом состоянии более не подвержены возможности заболеть.
- Dead – агент мёртв от старости или вследствие заболевания.

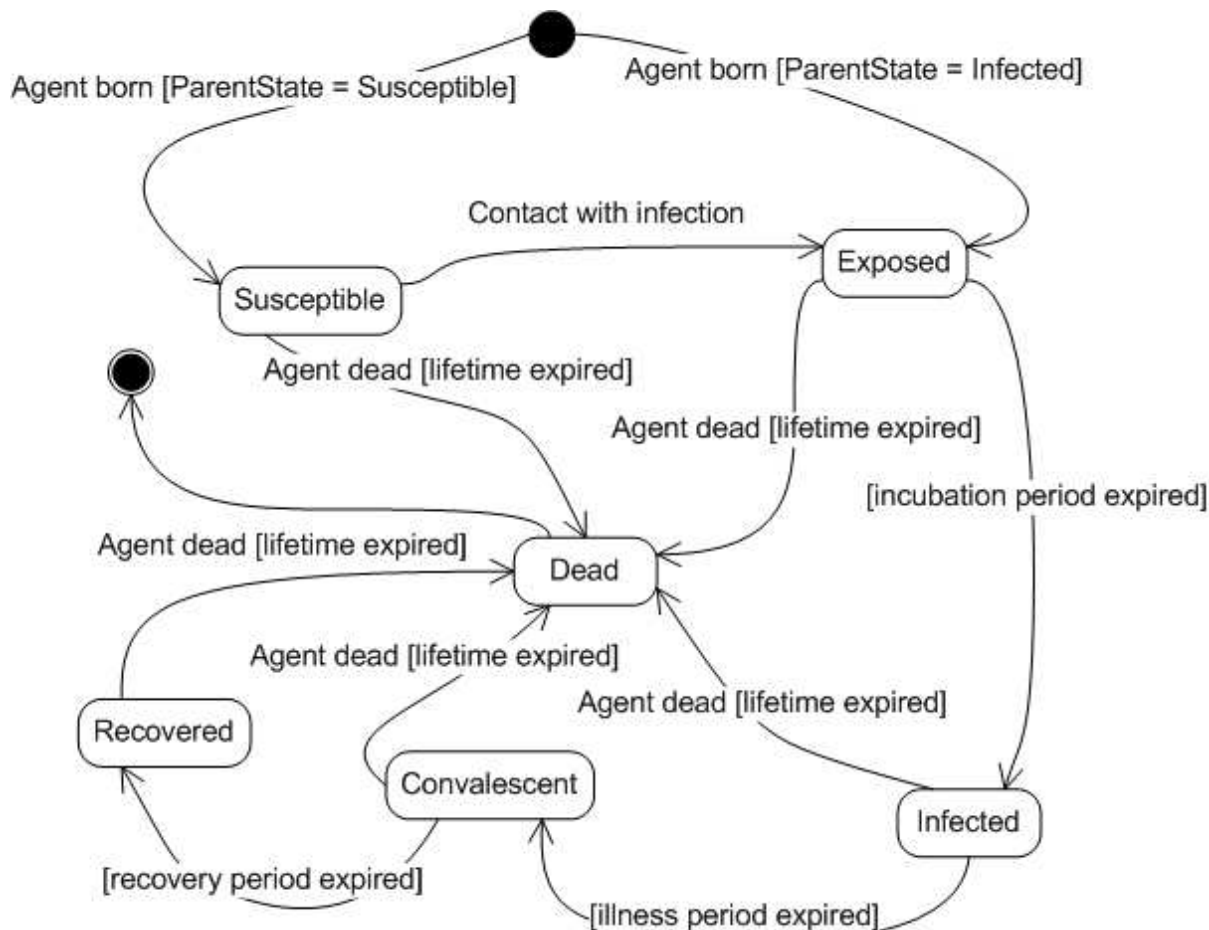


Рис. 1. Схема, описывающая изменения состояний агента

Декомпозиция рабочей области приводит к возникновению множества ячеек как условных абстрактных объектов. Предполагается, что одна ячейка одновременно может содержать в себе множество агентов, а также один объект–переносчик инфекции (назовём его инструментом). Поэтому ячейку можно описать следующим образом:

$$c = \langle z, \tilde{A}, i \rangle, z \in Z, \tilde{A} \subset A, i \in I, \quad (3)$$

где Z – множество всех рабочих областей;

I – множество всех инструментов.

Среди событий имеются события–пересечения границ ячеек, образующие поток событий первого рода. События этого типа представлены возрастающей последовательностью моментов времени, обрабатывающихся как переход из одной ячейки в другую.

Специфика широкого круга заболеваний связана с инфицированием между людьми. Чтобы учесть такую особенность, используя мультиагентный подход, необходимо определить, что является взаимодействием. В работе [5] агентов рас-

смаатривают как физические частицы, а их взаимодействия – это события столкновения. Обработка такого рода событий довольно сложна, что приводит к замедлению процесса моделирования. В данной работе предлагается упростить рассмотрение момента инфицирования путём установления принадлежности агентов одной ячейке. Это позволяет учесть возможность взаимодействия агентов и существенно снизить потерю производительности.

Рабочая область может быть описана следующим образом:

$$z = \langle \tilde{C}, t_z \rangle, \tilde{C} \subset C, t_z \in T_z, \quad (4)$$

где T_z – множество типов, к которым могут относиться области. Предполагается, что в зависимости от типа области, в которой находится агент, изменяется специфика эпидемического процесса.

В данной модели под инструментом подразумеваются различные предметы, которые так или иначе способны переносить инфекцию от одного человека к другому (шприцы, ножницы и др.). Они в разной степени могут быть подвергнуты обеззараживающему воздействию. С целью избежать чрезмерного усложнения модели описанные выше особенности сводятся к продолжительности жизни инструмента l . Таким образом, инструмент может быть описан как набор:

$$i = \langle s, c, l \rangle. \quad (5)$$

Типы агента, которые можно выделить для увеличения детализации популяции с точки зрения его принадлежности к условным социальным группам, представлены следующим образом:

$$t = \langle \bar{P}_t, \bar{\tau}_t \rangle, \quad (6)$$

где \bar{P}_t – вектор вероятностей, которые характерны для типа агента;

$\bar{\tau}_t$ – вектор констант модельного времени.

Имитационную модель можно представить в виде функции

$$\bar{R}_\tau = \text{sim}(l_{mean}, |A|_0, \bar{P}, T), \quad (7)$$

где \bar{R}_τ – вектор результатов в момент модельного времени τ , элементами которого являются значения количества агентов, находящихся в каждом из состояний;

l_{mean} – средняя продолжительность жизни;

$|A|_0$ – начальная мощность множества агентов;

\bar{P} – вектор вероятностей, которые учитываются в имитационной модели.

Построенная модель допускает расширение, связанное с увеличением размерностей векторов. В рамках данной задачи ограничимся следующим набором:

$$\bar{P}_t = (P_b, P_{hr}, P_{hh}, P_{sr}, P_{sh}), \quad (8)$$

где P_b – вероятность рождения агента с заданным типом;

P_{hr} – вероятность того, что агент в здоровом состоянии перейдёт в область риска;

P_{hh} – вероятность того, что агент в здоровом состоянии перейдёт в область "Больница";

P_{sr} – вероятность того, что агент в больном состоянии перейдёт в область риска;

P_{sh} – вероятность того, что агент в больном состоянии перейдёт в область "Больница".

В данном случае под здоровым следует понимать агента, который является восприимчивым к заболеванию моделируемого эпидемического процесса. Соответственно, под больным следует понимать агента, который был подвержен рассматриваемому заболеванию.

$$\bar{\tau}_t = (\tau_h, \tau_r, \tau_m), \quad (9)$$

где τ_h – количество модельного времени, которое агент текущего типа проводит, пребывая в области "Дом";

τ_r – количество модельного времени, которое агент текущего типа проводит, пребывая в области риска;

τ_m – количество модельного времени, которое агент текущего типа проводит, пребывая в области "Больница".

$$\bar{P} = (P_i, P_r, P_d, P_s, P_a), \quad (10)$$

где P_i – вероятность передачи инфекции от больного агента или посредством заражённого инструмента (назовём это "вероятностью заражения");

P_r – вероятность передачи инфекции от агента, находящегося на стадии инкубационного периода или на стадии спада заболевания (назовём это "сниженной вероятностью заражения");

P_d – вероятность того, что у агента в больнице будет обнаружено заболевание, находящееся на стадии инкубационного периода;

P_s – вероятность того, что при взаимодействии два агента вступят в половой контакт;

P_a – вероятность случайной передачи инфекции здоровому агенту от агента-носителя.

3. Проверка адекватности модели

Адекватность полученной модели проверена путём сравнения с результатами использования классической модели SIR. Графики на рис. 2 отражают количество агентов, находящихся в определённом состоянии, в конкретный момент модельного времени.

Характер графиков позволяет сделать вывод, что общее поведение рассматриваемой модели совпадает с поведением классической модели. Можно также убедиться в этом, если сравнить с поведением классической модели, представленной в [12–14].

Для агентов было определено два типа, которые можно условно назвать как "благоразумные" и "рискующие". Характеристики, определённые для каждого из типов, представлены в табл. 1. Для экспериментов были определены три области:

- Домашняя область. В этой области допускаются только контакты между агентами.

- Область риска. В данной области, помимо контактов между агентами, возможно заражение от инфицированного инструмента.

- Область "Больница". В данной области возможен частичный контакт между агентами и инфицирование от инструмента. При попадании в эту область агент подвергается лечению, что снижает длительность заболевания.

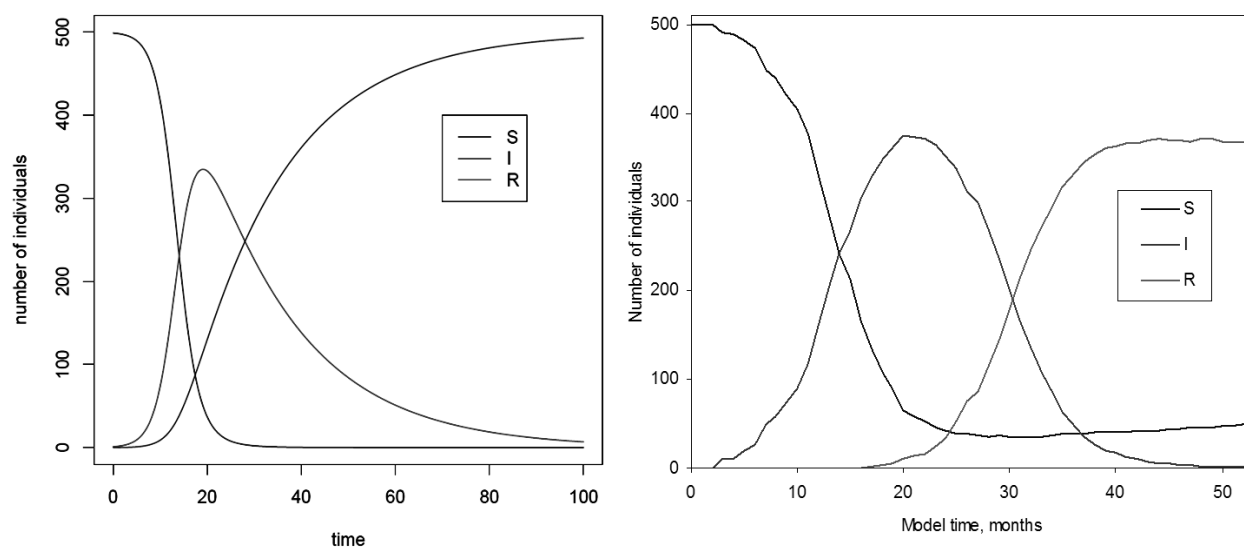


Рис. 2. Сравнение результатов полученной модели (справа) с результатами классической модели (слева [10]).

Таблица 1

Описание использованных типов агентов

Название типа	Благоразумные	Рискующие
Вероятность рождения, %	80,0	20,0
Вероятность перехода в область риска в здоровом состоянии, %	1,0	10,0
Вероятность перехода в больницу в здоровом состоянии, %	0,7	0,1
Вероятность перехода в область риска в больном состоянии, %	0,5	5,0
Вероятность перехода в больницу в больном состоянии, %	80,0	25,0
Длительность пребывания в домашней области в модельных часах	20	15
Длительность пребывания в области риска в модельных часах	2	8
Длительность пребывания в области "Больница" в модельных часах	2	1

Таблица 2

Вероятности, использованные для проверки адекватности модели

Описание	Значение
Вероятность заражения, %	1,0
Сниженная вероятность заражения, %	0,5
Вероятность обнаружения заболевания, %	5,0
Вероятность полового контакта, %	5,0
Вероятность случайной передачи, %	1,0

Вектор вероятностей \bar{P} , который был использован для получения результатов, описан в табл. 2.

4. Экономическая эффективность использования модели

Задача борьбы с заболеваемостью (на модельном уровне) сводится к изменению параметров, описанных в табл. 1 и 2. В идеале эти параметры могут быть выбраны так, чтобы заболеваемость отсутствовала. Однако это требует больших экономических затрат от общества в целом: стерилизация инструментов, профилактические осмотры, немедленное и эффективное лечение в стационарных учреждениях и т.п. Следует также отметить потери, связанные с уменьшением работоспособной части населения в связи с заболеванием.

Для повышения экономической эффективности противоэпидемических мероприятий необходим удобный, нетрудоемкий инструмент для расчета затрат на проведение вакцинации населения и полученной экономической выгоды. Главная проблема при этом – недостаточная информационная поддержка, что усложняет и замедляет процесс оценки эффективности проводимых мероприятий. Известно, что основой для выбора стратегии и тактики принятия управленческих решений в социально-экономических системах является автоматизация, с помощью которой можно провести сбор объективной информации, измерение и оценку изменений эпидемического процесса, своевременную разработку регулирующих воздействий на компоненты эпидемического процесса и другие необходимые действия.

Для параметров модели (в частности, приведенных в табл. 1 и 2) существует связь со статистическими данными, однако эту связь проблематично установить в точном виде. Например, при отсутствии лечения вероятности переходов в область "Больница" будут равны нулю; контроль учреждений за соблюдением санитарных норм оказывает влияние на вероятность заражения.

Данная модель позволяет формализовать вычисление экономических затрат как функцию от параметров модели. Одной из целей является минимизация потерь путём управления вектором параметров.

Автоматизация оценки экономической эффективности противоэпидемических мероприятий и объективизация полученных выводов способствуют правильному и рациональному распределению трудовых, материальных и финансовых ресурсов учреждений здравоохранения.

Выводы

Использование имитационного мультиагентного моделирования в применении к эпидемическому процессу позволяет учитывать множество факторов, носящих случайный характер. Более того, при таком подходе упрощается процесс изменения модели в ходе её детализации.

Сравнение результатов применения предложенной имитационной модели с результатами, полученными при использовании классических моделей эпидемического процесса, доказывает её общую адекватность.

Оптимизация структуры событий в модели приводит к результатам:

1. Сохранение адекватности по сравнению с имевшимся базовым вариантом [5].
2. Возможность использования выборок большого объёма (порядка 100 тыс.) за то же расчётное время.

3. Перспектива для последующих шагов оптимизации. Например, вместо пересчёта попарных событий оказывается возможным проводить вычисление вероятностей перехода в новое состояние в зависимости от уровня инфицированности данной расчётной ячейки.

Список литературы

1. Kermack, W. O. Contributions to the mathematical theory of epidemics [Text] / W. O. Kermack, A. G. McKendrick // Proceedings of the Royal Society. Series A. – 1927. Volume 115, issue 772. – P. 700 – 721.
2. Об одном подходе к прогнозированию эпидемиологической обстановки по гриппу–ОРВИ с использованием временных рядов [Текст] / В.И. Вьюн, Т.К. Еременко, Г.Е. Кузьменко, Ю.А. Михненко // Математические машины и системы. — 2011. — №2. — С. 131 – 136.
3. Моделювання епідемічного процесу вірусного гепатиту В [Текст] / Т.О. Чумаченко, О.С. Коваленко, Д.І. Чумаченко та ін. // Науково-практичний журнал «Медицина сьогодні і завтра». – 2011. – №4(53). – С. 145 – 149.
4. Введение в математическое моделирование [Текст]: учеб. пособие / В.Н. Ашихмин, М.Б. Гитман, И.Э. Келлер и др.; под ред. П. В. Трусова. — М.: Логос, 2004. – 440 с.
5. Chernyshev, Yu. Multiagent simulation of contact disease distribution based on event approach [Text] / Yu. Chernyshev, O. Sokolov // Proceedings of the International Conference on Modelling and Simulation 2010, 22 – 25 June 2010, Prague, Czech Republic. – P. 172 – 175.
6. Кондратьев, М.А. Применение агентного подхода к имитационному моделированию процесса распространения заболевания [Текст] / М.А. Кондратьев, Р.И. Ивановский, Л.М. Цыбалова // Научно–Технические Ведомости СПбГПУ. Серия «Наука и образование». – 2010. – № 2–2 (100). – С. 189 – 195.
7. System of Simulation of Epidemic Diseases Spreading [Text] / Yu. Chernyshev, T. Chumachenko, D. Chumachenko, A. Tovstik // Proceedings of East West Fuzzy Colloquium 2012 (19th Zittau Fuzzy Colloquium), 5 – 7 September 2012, Zittau, Germany, 2012. – P. 154 – 161.
8. Товстик, А.В. Разработка среды имитационного мультиагентного моделирования эпидемического процесса гепатита В [Текст] / А.В. Товстик // Технологический аудит и резервы производства. – 2012. – №6/4 (8). – С. 43 – 44.
9. Информационная технология имитационной системы эпидемического процесса [Текст] / А.В. Товстик, Д.И. Чумаченко, Т.А. Чумаченко, Ю.К. Чернышев // Научно–методический журнал «Клиническая информатика и телемедицина». – Х., 2012. – Т.8. Вып.9. – С. 129 – 132.
10. D´ebarre, F. SIR models of epidemics, Level 1 module in “Modelling course in population and evolutionary biology” [Electronic resource] / F. D´ebarre – Access mode: <http://www.tb.ethz.ch/education/model/SIR/sir.pdf> – 12.03.2013.
11. Hethcote, H.W. A thousand and one epidemic models [Text] / H.W. Hethcote // Frontiers in Mathematical Biology, Lecture Notes in Biomathematics. – Vol. 100, Springer–Verlag, Berlin., 1994. – P. 504 – 515.
12. Hethcote, H.W. The mathematics of infectious diseases [Text] / H.W. Hethcote // Society for Industry and Applied Mathematics (SIAM review). – 2000. – Vol. 42, No. 4. – P. 599 – 653.

13. Plemmons, R. A Mathematical Study Of Malaria Models Of Ross And Ngwa [Text] / R. Plemmons // Master's thesis in Department of Mathematics in the College of Sciences at the University of Central Florida. 2006. – P. 1 – 63.

14. Emrich, S. Fully agent based modeling of epidemic spread using AnyLogic [Text] / S. Ermich, S. Suslov, F. Judex // Proceedings of the 6th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation (EUROSIM 2007), Ljubljana, Slovenia, 9 – 13 Sep. 2007. P. 1 – 7.

Рецензент: д-р техн. наук, профессор Угрюмов М.Л.,
НАКУ им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

Поступила в редакцию 29.03.13

Оптимізація структури подій для агентного моделювання епідемічного процесу

Розглянуто актуальність задачі моделювання епідемічного процесу. Подано стан теорії моделювання епідемій на її сучасному етапі. Як основу для подальших досліджень було вибрано імітаційну моделювання із застосуванням подійного підходу. Імітаційна модель епідемічного процесу, що була розроблена, наведено і описано у математичній постановці. Було запропоновано спрощення розгляду процесу інфікування, що дозволило оптимізувати структуру подій та дало змогу розглядати значно більші вибірки агентів за такий самий розрахунковий час. Здійснено перевірку загальної адекватності запропонованої моделі шляхом порівняння із класичними моделями.

Ключові слова: мультиагентне моделювання, моделювання епідемічного процесу, дискретно-подійний підхід.

Optimization of the structure of events for agent-based simulation of epidemic process

The relevance of epidemic process simulation problem is considered. The status of epidemic simulation theory at it's present stage is presented. Multiagent simulation modeling with the event-driven approach is chosen as a basis for further research. The developed simulation model for epidemic process is presented and described in mathematical statement. Proposed simplification of infection process consideration allowed to optimize structure of events and provided an opportunity to work with much larger number of agents for the same simulation time. Verification of general adequacy of proposed model is performed by comparison with classical models.

Keywords: agent-based simulation, epidemic process simulation, event-driven approach.