

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ИНФЕКЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АГЕНТНОГО ПОДХОДА

А. В. Улыбин, А. А. Арзамасцев (Тамбов)

Введение

Участившиеся случаи возникновения и распространения различных инфекций, затрагивающих значительные слои населения, требуют разработки специальных методов оценивания, прогнозирования и поиска управляющих воздействий. Указанные оценки могут быть выполнены с использованием специальных математических моделей, учитывающих механизмы развития инфекций, правила взаимодействия объектов, внешние условия и т.д.

Существующие на данный момент модели распространения инфекций, базируемые на использовании аппаратов обыкновенных дифференциальных уравнений, мало пригодны для практических целей в виду того, что: не учитывают стохастический характер явления, многие реальные свойства объектов, образующих систему, не позволяют выявить факторы, влияющие на скорость распространения, а, следовательно, и разработать методы, препятствующие дальнейшему распространению инфекции [3].

Ранее было показано, что успешным методом моделирования различных социальных объектов, к числу которых может быть отнесено и развитие инфекций, является имитационное моделирование с использованием агентного подхода [4].

В настоящей статье представлена математическая модель и результаты вычислительных экспериментов для имитационного моделирования динамики инфекции на примере распространения ВИЧ в России.

Мультиагентная модель распространения инфекции

Общие допущения, используемые при моделировании, перечислены ниже:

- Модель развития инфекции представляет сложную систему, состоящую из множества взаимодействующих элементов (агентов);
- Каждый агент имеет свойства, формируемые при его появлении: пол, возраст, максимальная продолжительность жизни, зараженность и т.п.
- Максимальная продолжительность жизни агента задается нормальным распределением вероятности при создании агента. Агент может погибнуть раньше в случае поражения инфекцией.
- Максимальная продолжительность жизни зараженного агента определяется в момент заражения.
- Агенты формируются в системе в начальный момент времени, их параметры задаются распределениями вероятности.

На рис. 1 представлена информационная модель распространения инфекции на ограниченной территории. Информационная модель применима ко всем видам инфекций, однако для каждой содержание блока «Пути заражения» и количественные показатели будут индивидуальными. Таким образом, количество инфицированных всегда можно рассчитать по формуле (1):

$$N_{\text{inf}} = K_v + K_i - K_e, \quad (1)$$

где N_{inf} – общее количество инфицированных, K_v – количество инфицированных в результате внутренних процессов, K_i – количество инфицированных иммигрантов, K_e – количество инфицированных эмигрантов.

Количество инфицированных в результате внутренних процессов находится по формуле:

$$K_v = P_1 + P_2 + \dots + P_n - U, \quad (2)$$

где P_1, P_2, \dots, P_n – количество инфицированных возможными путями заражения, U – количество умерших среди инфицированных.



Рис. 1. Информационная модель распространения инфекции на ограниченной территории

Для того, чтобы проверить работоспособность модели, необходимы статистические данные. Рассмотрим модель динамики ВИЧ инфекции [7].

Итак, на рис. 1 блок «Пути заражения» будет включать в себя 3 основных пути передачи инфекции: инъекционное употребление наркотиков, половой путь, вертикальный (от матери к ребенку). Формула (2) в данном случае выглядит так:

$$K_v = P_1 + P_2 + P_3 - U, \quad (3)$$

где P_1 – количество инфицированных половым путем, P_2 – количество инфицированных путем инъекционного потребления наркотиков, P_3 – количество инфицированных вертикальным путем.

Для моделирования системы в целом введем правила взаимодействия агентов, которые будут определять дальнейшее развитие инфекции.

В случае заражения половым путем вероятность порождения нового инфицированного агента возникает только в случаях, когда только один из взаимодействующих агентов инфицирован. В остальных случаях новая инфекция не зарождается.

При заражении путем потребления наркотиков новый случай инфекции может произойти только тогда, когда наркоман еще не заражен, а используемая игла обязательно содержит клетки вируса, способные передать инфекцию.

При вертикальном пути заражения вероятность того, что ребенок рождается инфицированным, возникает только в случае, когда его мать является носителем вируса.

В начальный момент времени необходимо задать набор агентов:

$$C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}, \quad (4)$$

где C – множество агентов системы, n – количество агентов в начальный момент времени. Параметры агентов в начальный момент времени выбираются согласно следующим выражениям:

$$C_k \{d_k^S, d_k^a, d_k^{Ma}, d_k^A, d_k^J, d_k^C\}, \\ d_k^S \in P(d_S), d_k^a \in P(d_a), d_k^{Ma} \in P(d_{Ma}), d_k^A \in P(d_A), d_k^J \in P(d_J), d_k^C \in P(d_C), \quad (5)$$

где k – индекс, указывающий на номер агента $0 \leq k \leq n$; d_k^S – пол, определяемый из распределения $P(d_S)$; d_k^a – возраст, определяемый из распределения $P(d_a)$; d_k^{Ma} – максимальная продолжительность жизни, определяемая из распределения $P(d_{Ma})$; d_k^A – зараженность инфекцией, определяемая из распределения $P(d_A)$; d_k^J – характеристика, определяющая употребление наркотиков, определяемая из распределения $P(d_J)$; d_k^C – количество контактов агентов, определяемое из распределения $P(d_C)$.

Изменение числа инфицированных агентов происходит согласно формулам (2) и (3). Возрастную характеристику агента будем изменять согласно выражению:

$$(C_k)_{t-1} \rightarrow (C_k) \{(d_k^a)_t = (d_k^a)_{t-1} + 1\} \quad (6)$$

Будем считать, что агент погибает, если выполняется условие (7):

$$(d_k^a)_t > d_k^{Ma} \Rightarrow C = C - \{C_k\} \quad (7)$$

Выражение (7) позволяет исключить агента из системы, если отведенный ему максимальный срок жизни истек. Максимальный срок жизни агента в системе может быть изменен в процессе развития системы, в соответствии с условиями:

$$d_k^{Ma} = d_k^a + H1(d_k^a), \text{ если } d_k^{Ma} > d_k^a + H(d_k^a), d_k^A = true \\ d_k^{Ma} = d_k^a + H2(d_k^a), \text{ если } d_k^{Ma} > d_k^a + H(d_k^a), d_k^J = true \\ d_k^{Ma} = d_k^a + H3(d_k^a), \text{ если } d_k^{Ma} > d_k^a + H(d_k^a), d_k^J = true \Rightarrow d_k^A = true, \quad (8)$$

где $H1(d_k^a)$ – продолжительность жизни агента при его положительной реакции на d_k^A , зависящая от его возраста; $H2(d_k^a)$ – продолжительность жизни агента при его поло-

жительной реакции на d_k^J , зависящая от его возраста; $H3(d_k^a)$ – продолжительность жизни агента при его положительной реакции на d_k^J и d_k^A , зависящая от его возраста.

Два агента k и m могут взаимодействовать друг с другом, если выполняется условие $d_k^S \neq d_m^S$. Здоровый агент подвергается риску заражения инфекцией, если $d_k^A \neq d_m^A$. Характеристики d_k^A, d_k^J агентов в ходе развития системы могут изменяться в зависимости от вероятности приобретения положительной реакции на d_k^A и на d_k^J соответственно.

Вышеописанная модель позволяет, задавшись начальными условиями, имитировать развитие инфекции. Данная модель программно реализована на языке Delphi, и по ней проведены следующие вычислительные эксперименты.

Вычислительные эксперименты

После параметрической идентификации модели были проведены вычислительные эксперименты. Начальные условия задавались распределениями с учетом реальных статистических данных. Количество инфицированных человек задавалось строго согласно статистике. Основным источником статистических данных – Федеральный научно-методический Центр по профилактике и борьбе со СПИДом [7]. Основные результаты, полученные в процессе моделирования, приведены на рис. 2, 3.

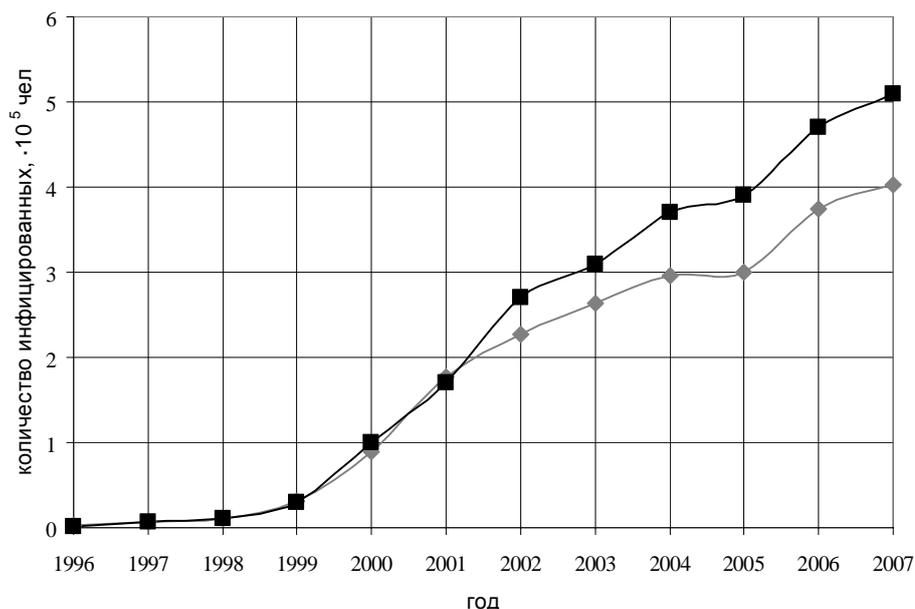


Рис. 2. Динамика ВИЧ-инфекции в России по годам (◆ – реальные данные [7], ■ – усредненные модельные результаты)

Из рис. 2 видно, что модельные результаты превосходят официально зарегистрированные случаи при одинаковом характере развития инфекции. На рис. 3 показано, что передача инфекции путем инъекционного потребления наркотиков уменьшается как по статистическим данным, так и согласно модели. Было установлено, что максимальное количество контактов ВИЧ-инфицированного агента в модели равно 4 контактам в год, а возраст вступления агента в половые связи, влияющий на передачу инфекции, равен 18 годам.

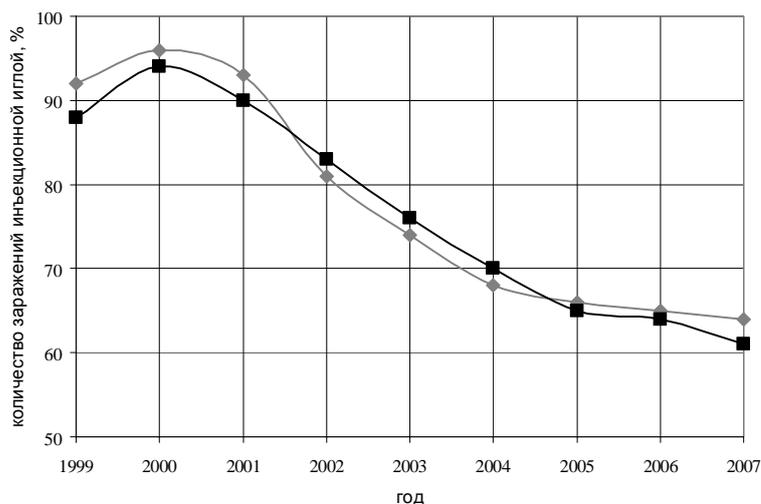


Рис. 3. Передача инфекции путем инъекционного потребления наркотиков (◆ – реальные данные [7], ■ – усредненные модельные результаты)

Выводы

Проведенные вычислительные эксперименты показали, что, задавшись начальными параметрами по каждому агенту и системой правил, можно просчитать динамику всей системы в целом. Характер динамики ВИЧ инфекции по реальным данным и по модели совпадают. Количественное превосходство ВИЧ инфицированных по модельным расчетам над статистическими данными позволяет сделать вывод о том, что общее количество ВИЧ инфицированных гораздо больше официально зарегистрированных случаев. Данное предположение подтверждается большинством экспертных оценок, а также данными Объединенной программы ООН по ВИЧ /СПИДу [6]. Данная модель позволяет не только прогнозировать динамику инфекции, но и, в отличие от других моделей, определять процентный вклад путей передачи инфекции в общую динамику, что позволяет разработать управляющие воздействия на конкретную группу лиц. Таким образом, данную модель можно считать пригодной для практических целей при изучении инфекции.

Литература

1. **Ferber J.** Multi-agent systems: An introduction to distributed artificial intelligence. // Addison-Wesley. 1999.
2. **GUO Zaiyi, HAN Hann Kwang, TAY Joc Cing.** Sufficiency Verification of HIV-1 Pathogenesis Based on Multi-Agent Simulation // GECCO. 2005. С. 305–312.
3. **Perelson A. S.** Modelling viral and immune system dynamics // Nature Reviews Immunology. 2002. № 1. С. 28–36.
4. **Арзамасцев А. А., Соломина О. А.** Моделирование роста биологической популяции на плоскости // Математическое моделирование. 2009. № 4. С. 59–64.
5. **Борщев А. В.** Практическое агентное моделирование и его место в арсенале аналитика // Exponenta Pro. 2004. № 3–4. С. 38–47.
6. Доклад о глобальной эпидемии СПИДа 2008 // UNAIDS. 2008
7. Федеральный научно-методический Центр по профилактике и борьбе со СПИДом [Электронный ресурс]. Электрон. Дан. Режим доступа: <http://www.hivrussia.ru>, свободный. Загл. с экрана.