

**М. Ю. Сидляр, О. А. Ковалева, С. В. Ковалев,
В. В. Хлебников**

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЕСТЕСТВЕННОЙ СМЕРТНОСТИ И РОЖДАЕМОСТИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЭПИДЕМИЙ

Ключевые слова: агент-ориентированное моделирование, имитационное моделирование, распространение эпидемии, естественная смертность, рождение агентов в системе, демографические параметры системы.

В статье показана зависимость и значимость параметра «естественной смертности» и «рождаемости» на скорость развития эпидемии. Показана схема изменения состояния агентов, включающая в себя основные состояния модели SIR «здорового» (подверженного заболеванию агента), «больного» (инфицированного) агента, «выздоровевшего», а также состояния «естественной смертности» и временного «нейтрального» агента. В схеме указаны условия переходов между состояниями при наличии демографических характеристик, характеризующих естественный прирост и убыль населения. В приняты допущения модели, описывающие характеристики агента и его состояния, а также математическая модель, реализующая переходы из состояний болезни в состояния «рождения» и «естественной смертности» или «смертности от заболевания». В статье авторы показывают фрагмент программного кода с построчными комментариями, описывающего переход агентов в состояние «естественной смертности» с присвоением основных характеристик и зависимость перехода к различным типам демографической убыли населения от вероятностей и случайных чисел. Показано окно настроек рождаемости и смертности, описаны блоки вводов и добавление диаграммы, а также зависимость изменения демографических показателей при введении коэффициентов естественной смертности и рождения. На сравнительных графиках показано изменение скорости и величины «заболеваемости агентов» при наличии параметров «рождения» и «естественной смертности», скорость эпидемического процесса указанных графиков характеризуется кривыми инфицированных агентов в посуточном диапазоне, а также показателем общей смертности в системе, который характеризуется естественной убылью населения и умерших в результате заболевания. В статье представлен график инфицирования Covid-19 в Тамбовской области в первые 100 дней с начала заболевания при сравнении с моделируемыми данными при наличии сложной системы демографических вариантов и бессимптомных больных (при естественной смертности и рождении с учетом демографической убыли населения).

**M. Y. Sidlyar, O. A. Kovaleva, S. V. Kovalev,
V. V. Khlebnikov**

ANALYSIS OF THE IMPACT OF NATURAL MORTALITY AND FERTILITY IN EPIDEMIC MODELING

Keywords: agent-based modeling, simulation modeling, epidemic spread, natural mortality, birth of agents in the system, demographic parameters of the system

The article shows the dependence and significance of the parameter "natural mortality" and "birth rate" on the rate of epidemic development. The scheme of change of the state of agents is shown, including the main states of the SIR model of "healthy" (an agent susceptible to the disease), "sick" (infected) agent, "recovered", as well as the state of "natural mortality" and temporary "neutral" agent. The scheme specifies the conditions of transitions between states in the presence of demographic characteristics, characterizing the natural increase and decrease of the population. The article shows the assumptions of the model describing the characteristics of the agent and its state, as well as a mathematical model implementing transitions from disease states to the states of "birth" and "natural mortality" or "mortality from disease". In the article, the authors show a fragment of the program code with line-by-line comments describing the transition of agents to the state of "natural mortality" with the assignment of basic characteristics and the dependence of the transition to various types of demographic population decline on probabilities and random numbers. The window for setting up birth and mortality is shown, describing the input blocks and adding a diagram, as well as the dependence of changes in demographic indicators when entering the coefficients of natural mortality and birth. The comparative graphs show the change in the speed and magnitude of "morbidity of agents" in the presence of the parameters of "birth" and "natural mortality"; the speed of the epidemic process of these graphs is characterized by curves of infected agents in the daily range, as well as the overall mortality rate in the system, characterized by natural population decline and deaths as a result of the specified disease. In the article, the authors provide a comparative graph of Covid-19 infections in the Tambov region in the first 100 days from the onset of the disease with modeled data with a complex system of demographic variants and asymptomatic patients in the presence of natural mortality and birth rates, taking into account the demographic decline of the population.

Введение

Длительный эпидемический процесс в замкнутой системе агентов может измеряться днями, неделями, месяцами и даже годами. Для исследования подобных процессов на математических моделях необходима разработка специального программного и алгоритмического обеспечения. Программные комплексы позволяют анализировать ситуацию с учетом

итераций и частот в несколько лет (1-3 года), например, при количестве агентов от 10% заполнения на геоплоскости от 30x30 до 1000x1000 элементов. Допуская отсутствие положительных миграционных процессов (въезд) и отток агентов из зараженного пункта, необходимо рассматривать естественную убыль и рождаемость населения. Под естественной смертностью понимается смертность не от эпидемии

и заболевания и его возможных последствий, а от естественных причин, к которым можно отнести смертность от возраста, от дорожно-транспортных происшествий и других не связанных с эпидемией болезней. К естественной смертности также можно отнести «отрицательную» миграцию (выезд агентов из населенного пункта на весь период эпидемии). Естественная смертность может быть от всех агентов, но не может быть от агента в состоянии «летальность» (умерший).

Естественная смертность при развитии эпидемии влияет на процесс развития эпидемии. На самом деле «здоровый» агент, который внезапно «умер» от естественных причин не становится агентом для заболевания, и в последствие не будет распространять эпидемию. Аналогично, заболевший агент, внезапно умирающий от естественных причин, а не от эпидемии, в дальнейшем не распространяет эпидемию, приостанавливая процесс заражения.

Рождаемость же возобновляет численность населения и уже в зависимости от вариативности заболевания рассматриваемой модели, агент может являться переносчиком заболевания, так и болеть. В частности, в статьях [1]-[4] показаны случаи заражения COVID-19 в детском возрасте, на первой неделе от матери болевшей новой этой инфекцией. Показаны течение, характеристики и результаты, длительность лечения в специальных медицинских учреждениях. Утверждается положительная вероятность заражения от родителей, а также легкий характер течения при соответствующем наблюдении в красной зоне и быстром обнаружении болезни на ранней стадии. При наличии наблюдения болезнь контролируется, однако без наблюдения могут проходить и тяжелые случаи, переходящие в смертельные, что показывает общее течение заболеваемости с вариантом заражения от новорожденного. Однако, допуская ограничение движение при рождении, мы получим вариативный тип поведения и новый вариант заражения: «от матери к ребенку» при рождении.

Допуская непрерывную модель естественной смертности в модели, нами полагается, что изменение численного состава по рождению и естественной смертности идет ровно один раз в день. При этом, при рождении сразу определяется «новый» родитель агента и вместе с этим еще наличие или отсутствие заболевания. Таким образом, в нашей модели рассматривается вариант заражения от «агента-родителя» к «агенту-потомку».

В статье [5] показаны зависимости с учетом изменения популяции от естественной смерти и миграции, а также рассмотрен путь заражения от матери к ребенку при распространении СПИДа. В работе [6] прослеживается зависимость заражения от пола и возраста и от образа жизни. При отсутствии движения процесс заражения на биоплоскости вырождается в процесс роста популяции на плоскости, описываемый мультиагентной моделью.

В работах [7]-[10] отмечается применение моделирования распространения инфекционных заболеваний с использованием мультиагентных методов. С использованием большого количества состояний за-

болеваний, а также побочных заболеваний или образа жизни. К имеющимся агентам добавляется локационность, которую может посещать агент. А воздействие на агента заболевания характеризуется средом возрастной группы.

Важность рождаемости и естественной смертности показана в работах [8] и [9], в связи с тем, что анализируя длительный промежуток времени новорожденные попадают сразу в группу риска и могут передавать опасный контактный вирус в детских заведениях (при проведении эксперимента от 100-900 дней) новорожденный ребенок уже может посещать ясли, сад, в контактной среде заражая большое число подверженных заболеванию агентов.

Целью данной работы является разработка математической модели и допущений, описывающих естественную убыль населения с помощью механизма естественной смертности и частичного воспроизводства с помощью механизма рождения агентов. Задачи работы: 1) Предложить схему перехода в состояние естественной смертности, а также механизм рождения агента с автоматическим переходом в здоровое состояние подверженное заболеванию, а также в состояние инфицированности; 2) Разработать программный комплекс, реализующий указанную модель и схему переходов в простом и стадийном состоянии с примером обращения к дружескому интерфейсу пользователя; 3) Проверить адекватность разработанной математической модели при сравнении расчетных данных (по модели) и экспериментальных в реальном регионе (Тамбовская область).

Допущения модели

Рассмотрим вариант рождения и естественной смертности агентов без добавления новых агентов извне. Допуская такой вариант, при котором естественная смертность в системе больше, чем рождаемость.

На плоскости $M \times N$ клеток проходит эпидемический процесс.

Каждый агент может находиться только в одной точке-клетке этого гео-пространства. В одной клетке может быть несколько агентов. Количество агентов $|K|$ ограничено и вычисляется в стартовый момент от процента заполняемости и площади исходной фигуры. Агенты обозначаем a_i - i -й агент, у каждого агента имеется облако свойств. Свойства обозначаются $a_i[s_1, s_2, s_3, \dots, s_n]$, где s_n - свойства. Например, $a_n[myrad = 0]$ – показывает, что свойство максимального радиуса движения $0 \text{ myrad} = 0$.

Время дискретно. Время измеряется в итерациях. Имеется перевод итераций в дни, показывающий интенсивность взаимодействия агентов. По умолчанию устанавливается 60 итераций в одном дне. В каждую следующую итерацию агент может переместиться на клетку, расстояние Евклида до которой меньше максимального смещения.

Главным свойством агента является его состояние $a_n[sostoyan]$. Состояний у агентов – 6. $sostoyanie = 1$ - «здоровый» - подверженный заболеванию агент; $sostoyan = 2$ - агент «болен» (инфицирован); $sostoyan = 3$ - выздоровевший агент;

$sostoyan = 4$ - умерший агент (от заболевания);
 $sostoyan = 5$ - состояние полного иммунитета;
 $sostoyan = 6$ - состояние вакцинации. В состоянии 2 агент заражает соседей с некоторой вероятностью. Соседями агента являются те агенты, которые расположены на клетках гео-плоскости, расположенных в окрестности Неймана радиуса 1. У состояния 2 – имеются несколько вариантов протекания заболевания, выбор варианта осуществляется от возраста и пола агента и случайной вероятности. В выбранном варианте агент при болезни имеет до 7 стадий, характеризующихся разной длиной, а также сменой вероятности заражения других агентов, частотой и интенсивностью кашля, а также частотой наступления смертности агента.

После окончания заболевания по времени наступает состояние «выздоровления» (временного иммунитета), при котором агент уже не заражает других, но и сам не заражается. После окончания этого состояния по длительности агент попадает с некоторой вероятностью или в состояние 1 «здоровый» или в состояние 5 – «иммунитет», в котором агент уже окончательно никого не заражает. В состоянии 4 («умерший») агенты попадают с некоторой вероятностью на последней стадии длительности болезни.

Опишем подробно «рождение» и «естественная смертность» в нашей модели.

Математическая модель

1. В модели имеется «естественная смертность». При этом выбирается частота в днях и количество. Один раз в день у случайно выбранных агентов с состоянием отличным от «смертности» по эпидемической болезни переводятся в состояние естественной смертности. В состоянии «естественной смертности» агент не передвигается и не заражает. Имеется возможность указывать вариант, при котором естественная смертность зависит от возраста. А также имеется параметр, при котором «естественная смертность» будет учитываться ошибочно в качестве диагноза основного заболевания при раннем заражении агента.

2. В модели имеется опция рождения агента. Зависит от частоты в днях и количества рождений агентов в день. При рождении, агенту выбирается пол и устанавливается возраст, равный 1. При этом случайно, выбирается «родитель» среди уже существующих агентов. Рожденный агент перемещается к «родителю» и дальнейшее передвижение зависит от описания варианта «детского возраста». Сразу определяется состояние агента таким образом, что оно равно «здоровому», если «родитель» здоров. И выбирается вероятность, с которой «родившийся» будет «здоров», если родитель будет «болен».

Математическая модель естественной смертности и рождения агентов. В формулах используем функцию генерации случайных чисел $random(x)$, которая генерирует случайное целое число от 0 включительно до x не включительно.

Под $\Theta(x)$ мы понимаем функцию Хевисайда, определенную следующим образом

$$\Theta(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$$

1. Смертность по естественной причине. Допустим, что имеется частота естественной смертности ch_est_smert и количество агентов естественной смертности kol_est_smertn , которые при наступлении дня, делящегося на ch_est_smert переходят в состояние «естественной смертности» и в дальнейшей работе эпидемической системы не учувствуют. Генерируем SE случайных чисел e_1, e_2, \dots, e_{SE} , таких, что $SE = kol_est_smertn$.

Каждое число $e_i = random(|K|) + 1$. Если $a_{e_i}[sostoyan \neq 4]$ (если агент не в состоянии «смертности»), то установим ему состояние естественной смертности $a_{e_i}[sostoyan = 24]$ и $a_{e_i}[myrad = 0, Pzaraj = 0]$.

2. Дана диаграмма на плоскости, характеризующая вероятность естественной смерти от возраста все точки ее $WE(x, y)$, $1 \leq x, y, \leq 100$. Обозначим за множество W внутренняя область диаграммы зависимости естественной смертности от возраста. Для агента e_i с возрастом $V_i = a_{e_i}[vozrast]$ имеется дополнительное условие на его «естественную смертность». Если сгенерировано случайное число $RW = random(100) + 1$, полученная точка $ES_i(RW, V_i)$ на плоскости естественной смерти. Если $\chi_W(ES_i) = 1$, то агент e_i переходит в состояние естественной смертности. Иначе число e_i перегенерируется случайно $e_i = random(|K|) + 1$.

3. Рождение агента. Допустим, что имеется частота рождения $chastota_roj$ и количество рождения агентов $kol_rojdenia$, если день кратен $chastota_roj$ частоте рождения рождается $kol_rojdenia$ агентов. Рождающиеся агенты замещают выбывающие на этой же итерации агенты, умершие естественной смертью, поэтому наша модель допускает $kol_rojdenia < kol_est_smertn$ при равных или кратных частотах рождения и естественной смертности $chastota_roj \equiv 0 \pmod{ch_est_smert}$.

Для последовательности e_1, e_1, \dots, e_{SE} , выбираем подпоследовательность e'_k , что $e'_1, e'_2, \dots, e'_{RE}$, при $RE = kol_rojdenia$. Для этих агентов радиус шага и вероятность заразиться будут $a_{e_i}[myrad = radiys, Pzaraj = 0]$, где $radiys$ - максимально возможный радиус перемещения. Или с учетом вариантов здоровых агентов будет рассчитан радиус движения, а из соотношения больных и стадий будет рассчитываться вероятность заражения агента e'_i . $a_{e_i}[vozrast = 1]$. Состояние агента при рождении считается здоровым $a_{e_i}[sostoyan = 1]$.

4. Рождение больного агента. При рождении имеется положительная вероятность родиться больным. Этот метод заражения является наследственным: «от матери к плоду». Для его реализации найдем «родственника» родившегося агента. Пусть $R_ro = random(|K|) + 1$ – родственник родившегося агента, тогда координаты на плоскости $a_{e_i}[tekx = a_{R_ro}[tekx]]$ и $a_{e_i}[teky = a_{R_ro}[teky]]$, запоминая эти координаты как домашние для различных вариантов движения нового агента по геоплоскости. Вычислим состояние агента-родителя $RR =$

$a_{R_{ro}}[sostoyan]$. Если состояние родителя «здоровый», «выздоровел» или «иммунитет», то состояние потомка-родившегося агента – здоровый восприимчивый к болезни $a_{e_i}[sostoyan] = 1$. Если состояние больной или «смертность», то $a_{e_i}[sostoyan] = 2$. $a_{e_i}[sostoyan] = (a_{R_{ro}}[sostoyan] + 1) \bmod 2 + 1$. С учетом того, что $sostoyan = 6$ вакцинация – искусственное заражение, то формула верна и в этом случае.

5. Есть также дополнительная вероятность от больного агента родиться здоровым. Пусть $Proj_d_{zдор}$ - процент того, что от больного агента рождается здоровый потомок. Генерируем случайное число $Rroj_d_{bz} = random(100) + 1$. Тогда итоговая вероятность равна

$$a_{e_i}[sostoyan] = 2 - \Theta(Proj_d_{zдор} - Rroj_d_{bz}).$$

Теоретический анализ

Схема переходов из основных состояний, показана на рисунке 1. В схеме показаны основные состояния и опции рождение и естественная смертность с учетом того, что при рождении имеется положительная вероятность новорожденному агенту получить заболевание от предков – в первую очередь, от матери и других близких родственников.

Интерфейс окна рождаемости и естественной смертности показан на рисунке 2. Является частью глобальных параметров программного комплекса [11] с модулем учета социально-демографических групп [12], описаны в работах [13]-[14] о стадийностях заболевания, бессимптомном поведении и заражении в зависимости от демографических признаков.

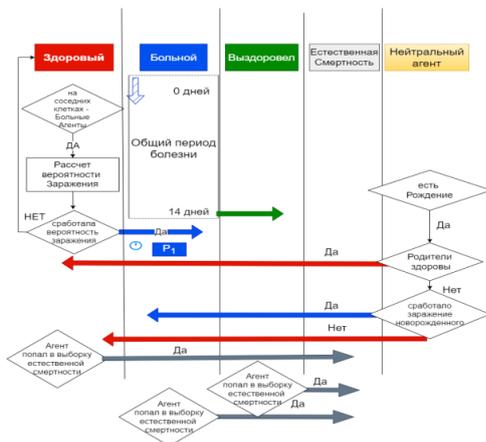


Рис. 1 – Схема перехода состояний агентов с моделями естественной смертности и рождения

Fig. 1 – A state transition diagram of agents with natural mortality and birth models

В указанном окне настроек имеются поля ввода для количества агентов, которые будут преобразовываться в положение «естественную смертность», а также редактор ввода для количества рождаемости в сутки. Допускается ввод также частоты в днях, при которых рождение и смертность пропускаются. Проверяются два варианта количество смертности

должно стать больше рождаемости, и частота смертности должно делить нацело частоту рождаемости. Эти условия замкнутой системы, без ярко выраженной миграции, допускают рождение как частный случай предварительной естественной смертности. Вместе с этим показывается вероятность естественной смерти от возраста. Ее вид – перевернутая статистика – по вертикали возраст (в самой верхней точке 0) – внизу 100, по горизонтали вероятность естественной смерти. На картинке, предложенной по умолчанию, показан случай увеличения вероятности смертности от возраста в виде линейной пропорциональности. Ключевым параметром является белый цвет – по нему осуществляется проверка.

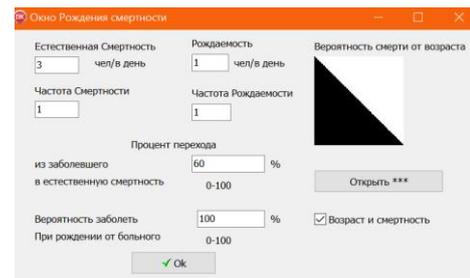


Рис. 2 – Интерфейс окна естественной смертности
Fig. 2 – Interface of the natural mortality window

Демографические изменения естественной смертности описываются квадратным пиксельным рисунком 100x100 с координатами (0;0) в левом верхнем углу. Черное поле характеризует вероятность наступления естественной смертности. Чем больше вниз – тем больше возраст, тем больше наступление вероятности. Указанную опцию можно отключить.

С учетом возраста стартовая диаграмма меняет конфигурацию, верхняя часть диаграммы загружается в верхней части. Чем старше агент, тем больше вероятность естественной смерти, тогда видно, что агенты из более верхней части возрастано-половой диаграммы начинают выбывать. При стартовой возрастано-половой диаграмме, соотношение естественной смертности от возраста сохраняется, визуально не определяется, однако, в статистике слоев на одинаковый диапазон возраста можно определить, что в верхней части удаляется большее число агентов.

Алгоритм и программная реализация

Рассмотрим фрагмент кода программы, описывающей переход агентов в состояние смерти по естественным причинам.

```

if estestw_smertnost=true then begin // при наличие
опции естественная смертность
    if numdayz mod ch_smertnoct=0 then // учитывая
частоту смертности. Один раз в несколько дней.
    if numtikz mod kol_tik_day=5 then begin // один раз в
день на 5 итерации в день происходит операция есте-
ственная смертность
        for tr:= 1 to kol_smertno_letu do begin // начинаем
цикл работы с каждым агентом, которому предстоит
пройти операцию естественная смертность
            repeat
    
```

```

qq:=random(kolagentz)+1; // генерируем номер
агента для естественной смерти
nbool:=false;
a1:= vseagenty[qq].sostojanie; // считаем состоя-
ние агента для естественной смерти
case a1 of // открывается конструкция
выбор, определяющая возможный выход из цикла по
его состоянию
1..3,5,6: nbool:=true; // в положениях «здоров»,
«выздоровел», «иммунитет» и «вакцинирован» агент
может умереть другим способом.
end; // конец конструкции выбор
if vozrast_and_smert=true then begin // если есть
смертность от демографии
ah:=random(100)+1; // находим случайный отступ
для проверки зависимости смертности от демогра-
фии
th:=vseagenty[qq].vozrast; // вычисляем возраст
текущего агента
colr:=myrojdenie.Imvozrast22.Canvas.Pixels[ah,th];
// проверяем цвет точки на диаграмме от возраста
агента и первоначального вероятностного сдвига
естественной смертности
if colr=cWhite then nbool:=false; // если цвет в
точке белый, то перейдем на новый номер итерации,
где пересчитываем номер агента с естественной
смертью
end; // конец условия по имеющейся зависимости
от демографии
until nbool=true; // оканчиваем цикл выбора агента
под удаление от естественной смерти
sostbyw:=vseagenty[qq].sostojanie; // определяем
бывшее состояние
rrand:=random(100);
if sostbyw <>2 then vseagenty[qq].sostojanie:=24; //
если агент не был болен от заболевания, то устанавли-
ваем состояние естественной смертности //смерт-
ность от вируса или от естественных условий
if (sostbyw =2)and(rrand <est_smertnost_bolnoy)
then // если агент болел и выполняется условие, при
котором заболевание точно описывается при смерт-
ности в смертность от заболевания
vseagenty[qq].sostojanie:=4; // состояние смертно-
сти от вируса
if (sostbyw =2) and(rrand >= est_smertnost_bolnoy)
then // если агент болел, но или в начальной стадии,
или смертность наступила четко от других, не свя-
занных с эпидемическими заболеваниями случаями
vseagenty[qq].sostojanie:=24; // устанавливаем со-
стояние естественной смертности
// установка характеристик, соответствующих лю-
бой смертности
vseagenty[qq].ttik:=0; // внутренне время устанавли-
ваем равным нулю
vseagenty[qq].myrad:=0; // радиус перемещения
агента устанавливаем равным 0 – агент не движется
vseagenty[qq].ya_zarajayu:=0; // вероятность зара-
жения от указанного агента 0. Агент не заражает по-
сле наступления естественной смерти или смерти от
заболевания.
end; // заканчиваем цикл работы с агентами, пере-
водимых в состояние естественной смертности

```

end; end; // заканчиваем условия работы с часто-
той дней и естественной смертностью.

Рассмотрим эксперименты

Эксперимент 1. Изменение параметра инфициро-
вания в зависимости от величины естественной
смертности.

На гео-плоскости размера 250x250. Без стадий.
Летальность наступает за 2 дня до окончания заболе-
вания. Параметры движения – случайное перемеще-
ние не превосходящее 5 пунктов. Вероятность зара-
жения 900/100000. След и кашель включены. Вероят-
ность иммунитета 200/1000. Вероятность летально-
сти 10/1000, частота проверки детальности 1 раз в 10
итераций. Длительность следа =15, максимальная
амплитуда кашля 250, при этом в зоне кашля возрас-
тает вероятность заболевания на 250 единиц в числи-
теле. Делитель кашля 1.5 – показывает, что ампли-
туда кашля падает с каждой итерацией в 1.5 раза.

На графиках синим цветом обозначается количе-
ство агентов в состоянии «больной» (заболевший). Се-
рым цветом показан график «общей смертности» (есте-
ственная смертность + смертность от заболевания).

На графиках (рис. 3) с наличием смертности
первые амплитудные всплески заболеваемости ниже,
а также скорость развития заболевания медленнее.
Максимумы кривых - здоровых меньше, а также
кривые иммунитета имеют участки убывания.
Кривая выздоровевших имеет меньшие значения
максимумов. Все кривые имеют меньшую скорость
возрастания и большую скорость убывания. Чем
больше естественная смертность – тем более
выражены указанные свойства.

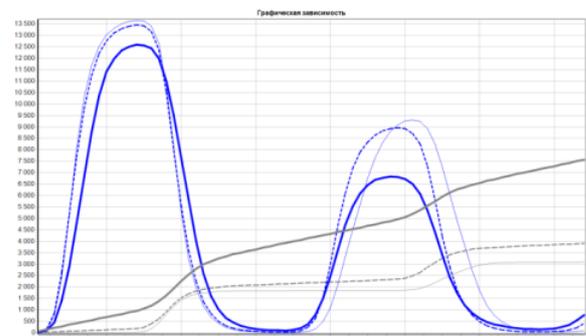


Рис. 3 – Графики заболеваемости и общей смерт-
ности при разных соотношениях параметров

Fig. 3 – Graphs of morbidity and total mortality at
different ratios of parameters

Тонкая сплошная кривая без рождаемости и без
смертности. Жирная кривая характеризует те же
входные условия и естественную убыль населения в
80 агентов каждый день и рождаемость в 25 агентов
один раз в два дня. Пунктирная кривая - характери-
зует естественную смертность в 15 агентов в день и
рождаемость 5 агентов раз в два дня.

Эксперимент 2. Изменение параметра инфици-
рования в зависимости от величины естественной
смертности при стадийном течении болезни и ее за-
висимости от вариантов, зависящих от демографиче-
ских параметров.

В следующем эксперименте есть стадийность при прохождении болезни, а также варианты с легким, средним, тяжелым и бессимптомным развитием заболевания. Тяжесть заболевания варьируется от возраста, в программе изначально задается в качестве глобальных параметров возрастная-половая пирамида. На рисунке 4 показано изменение графика заболеваемости и смертности в случае сложной вариативности и стадийности заболевания.

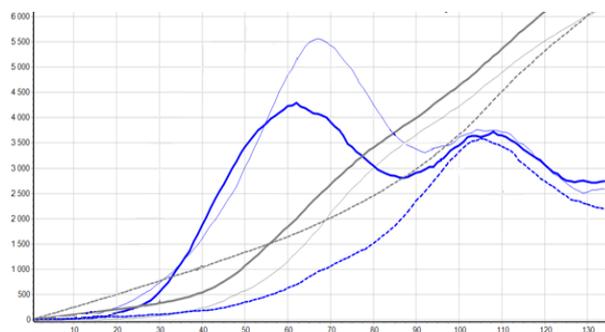


Рис. 4 – Графики заболеваемости и общей смертности при разных соотношениях параметров с учетом стадийности и демографии

Fig. 4 – Plots of morbidity and total mortality at different ratios of parameters taking into account staging and demography

Тонкие сплошные кривые на рисунке 4 показывают зависимость параметров в случае с отсутствием рождаемости и смертности. Жирные сплошные кривые показывают случай - смертность 10 агентов каждый день. Пунктирные кривые – смертность 25 агентов каждый день.

Эксперимент 3. При моделировании будем выводить аддитивный график официальной заболеваемости при тех же условиях на гео-плоскости 350x350 и плотности населения в 28%. Используем половозрастную пирамиду Российской Федерации, а также наличие стадийности заболевания и вариантов. Среди вариантов имеются бессимптомные агенты, которые передавая болезнь, остаются невидимыми для официальной статистики. В графиках официальной статистики модели, заболевшие агенты с бессимптомным течением заболевания не учитываются.

В 2015 году по данным Росстата [15] в Тамбовской области умерло 16991 (доковидный показатель), в 2014 – 17322, в 2013 – 17237 человек, от естественных причин умерло 1258 человек в 2015 году. Неестественными причинами названы смертность не из-за заболеваний. При общей численности Тамбовской области 1050.3 тыс. человек. Приводя к коэффициентам, получим 3 человека естественной смертности ежедневно, рождаемость 9.8 (на 1000)- итого 9800. При тех же коэффициентах получится 3 человека раз в два дня. В модели поставим указанные коэффициенты смертности и рождаемости.

Сравним полученный график с официальным графиком заболеваемости COVID-19 в Тамбовской области [16] в первые месяцы – первые 100 дней. На рисунке 5 показано взаимное расположение графика модели и официального статистического графика.

При коэффициенте $k=0.3900$ максимальная относительная погрешность достигает 8.9856%.

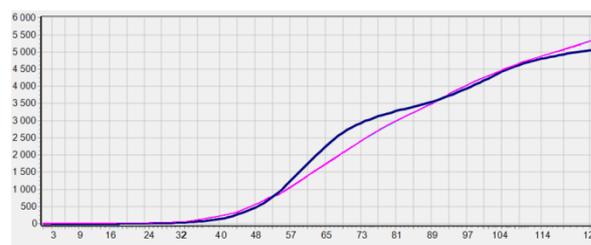


Рис. 5 – Сравнение графика официальных данных заболевших агентов с данными по Тамбовской области по заболеванию COVID-19

Fig. 5 – Comparison of the graph of official data of diseased agents with data on COVID-19 disease in Tambov region

Выводы

В статье рассмотрено влияние параметров наличия естественной смертности на тип и конфигурацию основных линий, характеризующих количество агентов каждого состояния при агентном моделировании. Показаны сравнительные графики развития заболеваемости с различными данными естественной смертности. Рассмотрено сопоставление официальных статистических данных по Тамбовской области с данными, моделируемыми средой мультиагентного моделирования (при коэффициенте $k=0.3900$ максимальная относительная погрешность (отклонение экспериментальных данных от модели) составляет 8.9856%).

Литература

1. К.А.Оганян, К.В. Шалепо, А.М.Савичева, О.Н. Беспалова, И.Ю. Коган *Журнал акушерства и женских болезней.* **69(6)**. 71-80 (2020).
2. Ю.С. Немтинова, А.Ю. Однолетко *Научная сессия ПГМУ им. академика Е.А. Вагнера.* (Пермь, Россия, апрель 19-20, 2023) материалы научно-практической конференции с международным участием студентов, ординаторов, аспирантов, молодых ученых (до 35 лет). Пермь, 2023. 376-379.
3. Ю.А. Павленко *Журнал инфектологии.* **14(3)**. 61-65, (2022).
4. Н.М. Голикова, С.В. Иванов *Российский педиатрический журнал.* **3(1)** 91 (2022).
5. А.В. Улыбин, А.А. Арзамасцев *Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки.* **15(2)** 614-619 (2010).
6. А.А. Арзамасцев, О.А. Соломина *Математическое моделирование.* **21(4)** 59-64 (2009).
7. Г.Н. Рыкованов, С.Н. Лебедев, О.В. Зацепин, Г.Д. Каминский, Э.В. Карамов, А.А. Романюха, А.М. Фейгин, Б.Н. Четверушкин *Вестник Российской академии наук.* **92(8)** 747-755 (2022).
8. М.А. Кондратьев *Компьютерные инструменты в образовании.* **4**. 32-36 (2011).
9. Т.А. Платонова, А.А. Голубкова, В.Н.Обабков, С.Ю. Колесникова, С.С.Смирнова *Эпидемиология и инфекционные болезни.* **23(5)**. 225-233. (2018).
10. V.L. Makarov, A.R. Bakhtizin, E.D. Sushko, A.F. Ageeva *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast* **13(4)**. 58–73 (2020). DOI: 10.15838/esc.2020.4.70.3 .
11. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2023.618.517 (2023).

12. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2023.668.416 (2023).
13. М.Ю. Сидляр *Седьмая Калининградская школа по гуманитарной информатике*. (Калининград, Россия, ноябрь 23-25, 2023), Сборник статей. Калининград, 2023. 114-118.
14. М.Ю.Сидляр, О.А.Ковалева, С.В. Ковалев *Информатика: проблемы, методы, технологии*. (Воронеж, Россия, февраль 14-15, 2024), Материалы XXIV Международной научно-практической конференции им. Э.К. Алгазинова. Воронеж, 2024. 494-503.
15. *Федеральная служба государственной статистики (Росстат)* URL: https://68.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/demograf_.pdf (дата обращения 12.10.2024).
16. COVID-19 Russia regions cases URL: <https://www.kaggle.com/datasets/kapral42/covid19-russia-regions-cases> (дата обращения 12.10. 2024).
5. A. V. Ulybin, A. A. Arzamastsev, Bulletin of Tambov University. Series: Natural and technical sciences. **15(2)** 614-619 (2010).
6. A. A. Arzamastsev, O. A. Solomina, Mathematical modeling. **21(4)** 59-64 (2009).
7. G. N. Rykovanov, S. N. Lebedev, O. V. Zatsepin, G. D. Kaminisky, E. V. Karamov, A. A. Romaniukha, A. M. Feigin, B. N. Chetverushkin, Bulletin of the Russian Academy of Sciences. **92(8)** 747-755 (2022).
8. M. A. Kondratyev, Computer tools in education. **4**. 32-36 (2011).
9. T. A. Platonova, A. A. Golubkova, V. N. Obabkov, S. Y. Kolesnikova, S. S. Smirnova Epidemiology and Infectious Diseases. **23(5)**, 225-233. (2018).
10. V. L. Makarov, A. R. Bakhtizin, E. D. Sushko, A. F. Ageeva, Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast **13(4)**, 58-73 (2020). DOI: 10.15838/esc.2020.4.70.3.
11. Computer program registration certificate 2023.618.517 (2023).
12. Computer program registration certificate 2023.668.416 (2023).
13. M. Y. Sidlyar Seventh Kaliningrad School on Humanitarian Informatics. (Kaliningrad, Russia, November 23-25, 2023), Collection of articles. Kaliningrad, 2023. 114-118.
14. M. Yu. Sidlyar, O. A. Kovaleva, S. V. Kovalev Informatics: problems, methods, technologies. (Voronezh, Russia, February 14-15, 2024), Proceedings of the XXIV International Scientific and Practical Conference named after E. K. Algazinov. Voronezh, 2024. 494-503.
15. Federal State Statistics Service (Rosstat) URL: https://68.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/demograf_.pdf (accessed 12.10.2024).
16. COVID-19 Russia regions cases URL: <https://www.kaggle.com/datasets/kapral42/covid19-russia-regions-cases> (date of reference 12.10. 2024).

References

1. K. A. Ohanyan, K. V. Shalepo, A. M. Savicheva, O. N. Beshpalova, I. Yu. Kogan Journal of obstetrics and women's diseases. **69(6)**. 71-80 (2020).
2. Y. S. Nemtinova, A. Y. Odnoletko Scientific session of the PGMU named after academician E. A. Wagner. (Perm, Russia, April 19-20, 2023) materials of scientific-practical conference with international participation of students, residents, postgraduates, young scientists (up to 35 years old). Perm, 2023. 376-379.
3. Yu. A. Pavlenko, Journal of Infectology. **14(3)**, 61-65, (2022).
4. N. M. Golikova, S. V. Ivanov, Russian Pediatric Journal. **3(1)** 91 (2022).

© **М. Ю. Сидляр** – старший преподаватель кафедры Математического моделирования и информационных технологий (ММИТ), Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина (ТГУ им. Г.Р. Державина), Тамбов, Россия, m1kmikl@yandex.ru; **О. А. Ковалева** – д.т.н., профессор кафедры ММИТ, ТГУ им. Г.Р. Державина, solomina-oa@yandex.ru; **С. В. Ковалев** – д.т.н., профессор кафедры ММИТ, ТГУ им. Г.Р. Державина, sseedd@mail.ru; **В. В. Хлебников** – к.ф.-м.н., доцент кафедры ММИТ, ТГУ им. Г.Р. Державина, khlebnikovvv@mail.ru.

© **M. Yu. Sidlyar** – Senior Lecturer, the department of Mathematical Modeling and Information Technologies (MMIT), Derzhavin Tambov State University (Derzhavin TSU), Tambov, Russia, m1kmikl@yandex.ru; **O. A. Kovaleva** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor of the MMIT department, Derzhavin TSU, solomina-oa@yandex.ru; **S. V. Kovalev** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor of the MMIT department, Derzhavin TSU, sseedd@mail.ru; **V. V. Khlebnikov** – PhD (Physical and Mathematical Sci.), Associate professor of the MMIT department, Derzhavin TSU, khlebnikovvv@mail.ru.