

Правительство Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Санкт-Петербургский государственный университет»

Кафедра Системного Программирования

Быкова Юлия Сергеевна

# Мультиагентный подход в имитационном моделировании распространения эпидемии

Дипломная работа

Допущена к защите.  
Зав. кафедрой:  
д. ф.-м. н., профессор Терехов А. Н.

Научный руководитель:  
ст. преп. Сартасов С. Ю.

Рецензент:  
к. ф.-м. н., доцент Графеева Н. Г.

Санкт-Петербург  
2015

SAINT-PETERSBURG STATE UNIVERSITY

Chair of Software Engineering

Iuliia Bykova

# Multi-agent approach to imitational modelling of epidemic spread

Graduation Thesis

Admitted for defence.

Head of the chair:  
professor A. Terekhov

Scientific supervisor:  
assistant professor S. Sartasov

Reviewer:  
associate professor N. Grafeeva

Saint-Petersburg  
2015

# Оглавление

<b>Введение</b>	<b>4</b>
<b>1. Мультиагентный подход к моделированию</b>	<b>6</b>
<b>2. Анализ исходных данных</b>	<b>8</b>
2.1. Лихорадка Эбола . . . . .	8
2.2. Статистика по местности . . . . .	9
2.3. Существующие подходы по моделированию лихорадки .	10
<b>3. Мультиагентная модель распространения</b>	<b>12</b>
3.1. Объекты и их параметры . . . . .	12
3.2. Базовая модель . . . . .	12
3.2.1. Процесс протекания заболевания . . . . .	12
3.2.2. Вероятность контакта. Передача инфекции . . . . .	15
3.2.3. Общая структура событий в модели . . . . .	16
3.3. Модель с возрастными группами. Первая модификация .	18
3.4. Модель с различными локациями. Вторая модификация	18
3.4.1. Перемещение агентов между локациями . . . . .	19
3.5. Входные и выходные данные модели . . . . .	20
<b>4. Реализация компьютерных моделей распространения за- болевания</b>	<b>21</b>
4.1. Выбор среды моделирования . . . . .	21
4.2. Структура компьютерной имитационной модели распро- странения . . . . .	23
4.2.1. Стохастический эксперимент . . . . .	24
4.2.2. Оптимизационный эксперимент . . . . .	25
<b>5. Тестирование и анализ разработанных моделей</b>	<b>27</b>
<b>Заключение</b>	<b>31</b>
<b>Список литературы</b>	<b>33</b>

# Введение

Сохранение и укрепление здоровья населения — важная социально-экономическая проблема, неотъемлемым аспектом которой является снижение инфекционной заболеваемости. В решении этой задачи предупредительные меры имеют ключевое значение. Прогнозирование динамики распространения заболевания позволяет разработать и применить адекватные меры противодействия, обеспечить рациональное использование материальных и людских ресурсов.

Качественный прогноз распространения заболевания достижим только на основе адекватных математических моделей. Формирование точных, проработанных моделей является в настоящее время вполне реализуемой задачей, с учетом последних достижений в области математического и имитационного моделирования, в частности, агентного и дискретно-событийного моделирования.

Идеально проработанная модель включает в себя множество различных параметров, таких как возраст агентов, социальное и расовое разделение и т.п. Их учет требует увеличения вычислительных и временных ресурсов, затрачиваемых на расчет модели. Следовательно, для того, чтобы модель была практически применима, требуется найти оптимальное соотношение между детализацией модели и временем счёта.

Целью исследования является создание различных моделей распространения инфекционных заболеваний на примере лихорадки Эбола, позволяющей выполнить прогноз изменения уровня заболеваемости на основе текущих статистических данных. Для этого необходимо решить следующие задачи:

- собрать, проанализировать и структурировать информацию о процессе заражения вирусом Эбола;
- выбрать среду моделирования для реализации моделей;
- реализовать базовую модель, внутреннее состояние агентов;

- на основе базовой модели создать модели более высокой детализации;
- провести тестирование и быстрое действие.

Для решения поставленных задач использовались методы теории вероятностей и математической статистики. Разработанная модель основана на методах имитационного моделирования, в частности, агентного и дискретно-событийного моделирования, ее реализация — на принципах объектно-ориентированного программирования.

Практическая ценность результатов работы: созданный программный комплекс позволяет построить краткосрочный прогноз развития эпидемической обстановки в городе. За счет использования агентного подхода, в предложенных моделях могут быть учтены любые характеристики (возраст агентов, территориальное разделение, социальная структура и проч.). Разработанная система позволяет количественно оценить эффективность тех или иных характеристик и выбрать наиболее подходящие, исходя из ресурсов системы.

# 1. Мультиагентный подход к моделированию

Эпидемии всегда являлись одной из первостепенных проблем медицины [16] [22]. Неожиданное возникновение эпидемий приводит к формированию сложной, быстро изменяющейся обстановки. В условиях чрезвычайной ситуации поспешные или хаотичные действия специалистов различных служб (органов здравоохранения, администрации, аптечных сетей) могут негативным образом повлиять на организацию и реализацию мер борьбы с заболеванием. Одним из способов предотвращения ущерба здоровью населения являются предупредительные меры. Если по текущим статистическим данным осуществлен адекватный прогноз ожидаемого уровня заболеваемости на несколько дней вперед, существует возможность заранее выявить даже приближение эпидемии. Тогда специалисты могут заблаговременно продумать меры борьбы с вирусом, провести действия, предотвращающие развитие пандемии, мобилизовать медперсонал, подготовить и доставить необходимые медикаменты и т. д.

Для решения данной проблемы можно эффективно использовать имитационное моделирование. Имитационное моделирование (далее ИМ) – это подход, для которого характерен перевод процессов реального мира в некоторое математическое описание или упрощённое физическое представление.

ИМ насчитывает большое количество различных подходов к построению моделей [19] [22]. Часто используется агентный подход. Главной идеей агентного моделирования является выделение агентов – некоторых сущностей с автономным поведением. Агенты способны сами принимать решения и взаимодействовать с другими агентами и окружающей их средой в соответствии с неким набором правил.

При моделировании распространения заболевания агентом стоит выбрать человека, который может быть болен, и который может при выполнении некоторых условий заражать других агентов. Условия заражения, как и время и форма протекания болезни будут определяться

видом заболевания.

Стоит заметить, что агентные модели распространения заболевания (далее МРЗ) децентрализованы. Каждый агент как активный объект самостоятельно порождает все события, связанные с его перемещениями между различными локациями (в каждый момент модельного времени агент находится в одной определенной контактной группе), распространением заболевания (т. е. самими контактами, включающими расчет вероятности передачи инфекции от агента к агенту), развитием заболевания (события перехода болезни с одной стадии на другую) и проч. Каждое такое событие включает в себя набор несложных действий, однако даже при небольших популяциях агенты порождают множество событий, обработка которых требует значительного объема вычислительных ресурсов.

Агентные модели позволяют наиболее естественным и простым образом передать социальную структуру моделируемой популяции. Каждый агент обладает своими собственными переменными состояниями и поведением, что позволяет почти неограниченно детализировать модель. Нет необходимости в формировании сложных формул расчета вероятности передачи заболевания, вероятности распространения инфекции определяются параметрически (хоть и требуют обоснования и калибровки).

## 2. Анализ исходных данных

Как упоминалось ранее, от вида заболевания зависит очень много факторов моделирования. Поэтому выбор подходящей эпидемии играл далеко не последнюю роль. Во-первых, подходили только хорошо изученные заболевания, с известной формой его протекания и способом передачи вируса.

Во-вторых, важно было наличие реальных статистических данных по заболеванию, чтобы проверить корректность построенной модели и произвести калибровку.

Вирус должен иметь ярко выраженные симптомы, т.к. в этом случае выборка получается наиболее репрезентативной и в статистике по данному заболеванию будет меньше ошибок. Например, обычная простуда или грипп А в данном исследовании рассматриваться не могут, т.к. их симптомы проявляются и во многих других заболеваниях. Многие люди вообще не обращаются в больницы, а лечатся на дому, что также влияет на реалистичность статистики.

### 2.1. Лихорадка Эбола

С учетом всего перечисленного интерес представляет эпидемия лихорадки Эбола. Геморрагическая лихорадка Эбола — острое вирусное высококонтагиозное заболевание с уровнем смертности до 90%. Этому заболеванию подвержены люди и другие приматы. С января 2014 года происходят вспышки эпидемии в Центральной и Западной Африке. По официальной информации ВОЗ на 30.04.2015 от вируса Эбола пострадало 26312 человек, 10899 случая закончились летальным исходом. Надежной вакцины на данный момент не существует [20].

Инфицирование происходит при прямом контакте (через повреждения кожи или слизистую оболочку) с кровью или другими биологическими жидкостями или выделениями (стул, моча, слюна, сперма) зараженного человека. Также может происходить при прямом контакте с зараженной средой (грязная одежда, постельное белье или использованные иглы).



Типичными признаками инфекции является повышение температуры, крайняя слабость, боли в мышцах, головная боль и боль в горле. В дальнейшем наблюдаются тошнота, диарея, сыпь, нарушение функции почек и печени и в некоторых случаях внутренние и внешние кровоизлияния.

Во время вспышки заболевания к числу лиц, подверженных большему риску, относятся:

- медработники;
- члены семьи или другие лица, тесно контактирующие с инфицированными;
- лица, участвовавшие в похоронах и в ходе церемонии погребения, имевшие непосредственный контакт с телами скончавшихся;
- охотники, занимающиеся охотой во влажном тропическом лесу, которые имели контакты с обнаруженными в лесу трупами животных.

## **2.2. Статистика по местности**

Лихорадка Эбола является актуальной проблемой человечества на данный момент и многие мировые научные организации [9] [6] [15] занимаются исследованием вируса. Вследствие этого данные по заболеванию были выложены в открытый доступ [8]. Данные предоставлены министерствами стран Западной Африки.

Наиболее полная статистика предоставлена страной Сьерра-Леоне. Данные представлены с 23 мая 2014 года по 12 декабря 2014 года. Сведения предоставлялись по каждому району (город с прилегающими деревнями) и по стране в целом. Интерес представляла статистика числа зараженных и умерших людей с начала периода.

Стоит заметить, что населенные пункты в Сьерра-Леоне достаточно удалены друг от друга, что является естественным препятствием распространения болезни. Города имеют небольшое число жителей (около

20 тыс. человек), что решает проблему вычислительных ресурсов в моделировании.

После подробного изучения статистических данных было выделено два города, наиболее пострадавших от лихорадки: Кайлахун (Kailahun) и Кенема (Kenema). Наши дальнейшие исследования будут основаны на данных по этим городам.

### **2.3. Существующие подходы по моделированию лихорадки**

Несмотря на то, что вспышка эпидемии лихорадкой Эбола произошла не так давно, на эту тему уже опубликован ряд работ. Рассмотрим уже реализованные модели.

FRED (A Framework for Reconstructing Epidemiological Dynamics) – основа для реконструкции эпидемиологических заболеваний. Это система моделирования, которая поддерживает исследования по динамике эпидемий инфекционных заболеваний. FRED был разработан не конкретно для заболевания вирусом Эбола, а для моделирования любой инфекции. В него встроены реальные синтетические населения на основе данных Бюро по переписи населения США. Т.о. система не обладает данными по другим странам мира и не дает возможности моделирования на какой-либо другой территории. [11]

Похожую систему создали и в Российском Государственном научном центре Вирусологии и Биотехнологии. Система моделирует динамику локальных вспышек и эпидемий. Разработана универсальная модель для расчета любого патогенного вируса. К сожалению, как и в случае FRED моделирование происходит на ограниченной территории. В данном случае охватывается область РФ. [10]

Во второй половине 2014 года Центр по контролю и профилактике заболеваний США [4] опубликовал свое исследование на тему МРЗ, его влияния и вмешательства на общество. Модель позволяет оценить число пострадавших от болезни людей в обществе. Составляет прогноз распространения эпидемии на 300 дней. Реализована модель в элек-

тронных таблицах Excel, что затрудняет восприятие. Также в реализации не ведется статистика смертности населения, что является большим недостатком моделирования, т.к. уровень смертности населения от лихорадки Эбола крайне высок.

## **3. Мультиагентная модель распространения**

### **3.1. Объекты и их параметры**

Как уже упоминалось ранее, в данном исследовании важно не столько построение максимально реалистичной МРЗ, а нахождение «золотой середины» между затратами вычислительных ресурсов и уровнем детализации модели. Для решения этой задачи было разработано три модели с различной степенью проработанности. Построим данные имитационные мультиагентные модели распространения вируса Эбола на территории одного города. В соответствии с выбранным агентным подходом агентами системы являются локации и люди. Поведение людей, подверженных заболеванию, занимает ключевое место. В модели именно агенты отвечают за порождение событий, связанных с протеканием заболевания, передачей инфекции и проч. Окружающая среда — локация определяет местонахождение агента.

### **3.2. Базовая модель**

В базовой модели есть два типа агентов:

Агент – Человек: Каждый агент моделирует поведение одного человека.

Агент – Локация: Локация служит для агентов окружающей средой и моделирует некоторое местонахождение, в котором инфекция может быть передана от одного агента другому.

Вся динамика модели определяется совокупными действиями агентов и порождаемыми ими событиями. В базовой модели определяется только динамика протекания заболевания у каждого агента.

#### **3.2.1. Процесс протекания заболевания**

Это событие, определяющие стадию болезни агента. Сегодня предлагается много различных вариантов моделей протекания заболевания. В данном случае была выбрана модель SIR, как наиболее гибкая и обла-

дающая широкой применимостью. Модель была предложена Кермаком и Мак-Кендриком в 1927 г [3].

Вся популяция делится на группы:

- «Susceptible» — здоровые люди, восприимчивые к заболеванию (далее S);
- «Infectious» — инфекционные больные (далее I);
- «Recovered» — переболевшие моделируемым заболеванием люди, более к нему не восприимчивые (далее R).

Учитывая, что общее число индивидов в популяции остается неизменным, приращение числа людей в каждой из выделенных групп можно описать с помощью следующей системы уравнений:

$$\frac{dS}{dt} = -\beta SI, \frac{dI}{dt} = \beta SI, \frac{dR}{dt} = \gamma I,$$

где  $\beta$  — интенсивность контактов между людьми,  $\gamma$  — интенсивность выздоровления агентов.

Главное достоинство модели типа SIR — возможность достаточно точно описывать протекание заболевания по популяции.

Существует огромное количество модификаций модели SIR. Все модификации производятся в основном для уточнения особенностей конкретного заболевания. Так для лихорадки Эбола будет использоваться модель SEIFDR. Она получается из модели SIR путем добавления трех дополнительных состояний:

- «Expose» — люди, находящиеся в инкубационном периоде (далее E);
- «Funeral» — погибшие люди, но все еще являющиеся источником заражения (далее F);
- «Died» — погребенные люди (далее D).

Тогда система уравнений, описывающая приращение числа больных индивидов будет [12]:

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= -\beta_I SI + \beta_F SF \\ \frac{dE}{dt} &= \beta_I SI + \beta_F SF - \alpha E, \\ \frac{dI}{dt} &= \alpha E - [\gamma_I(1 - \delta_1) + \gamma_D \delta_1] I, \\ \frac{dF}{dt} &= \gamma_D \delta_1 I - \gamma_F F, \\ \frac{dR}{dt} &= \gamma_I(1 - \delta_1) I + \gamma_F F, \end{aligned}$$

где  $\beta_I$  и  $\beta_F$  — интенсивность контактов между людьми и на похоронах,  $\frac{1}{\alpha}$  — интенсивность инкубационного периода,  $\gamma_I$  — интенсивность выздоровления,  $\gamma_D$  — интенсивность умирания агентов,  $\gamma_F$  — интенсивность похорон,  $\delta_1$  — вероятность смертности.

Для представления процесса протекания заболевания в модели использован конечный автомат. Конечные автоматы (UML Statecharts) являются распространенным формализмом, используемым в средах ИМ для задания последовательности событий.

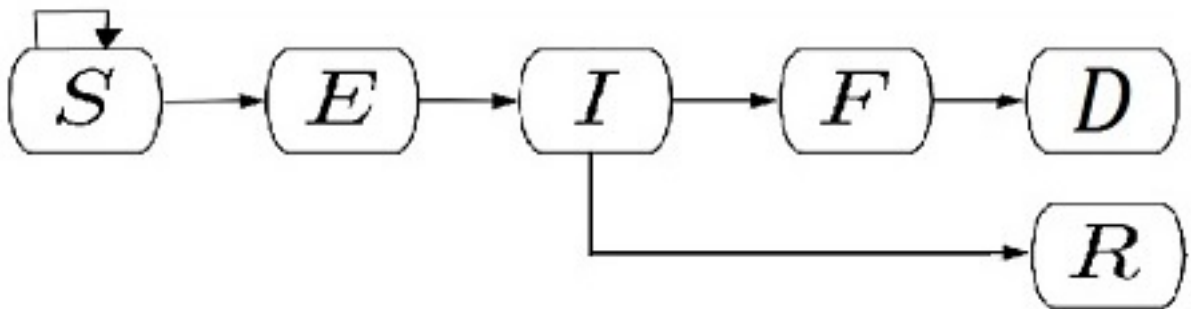


Рис. 1: Конечный автомат агентной модели

Большая часть агентов в модели (что полностью соответствует реальности) находится в состоянии «Susceptible», это состояние является начальным для всех агентов.

В том случае, если у агента в состоянии «Susceptible» происходит контакт с больным или умершим агентом (в состоянии «Infectious» или «Funeral»), он с определенной вероятностью может заболеть. При этом он переходит в состояние «Exposed». Продолжительность инкубационного периода вирусом Эбола равномерно распределена на интервале от 8 до 12 дней.

По истечении инкубационного периода агент считается заболевшим (состояние «Infectious»). Важной особенностью данного состояния является способность агента с некоторой вероятностью заражать других агентов в случае возникновения между ними контакта.

Из стадии «Infectious» агент может попасть как в состояние «Funeral» — умер (около 10 дней), так и в состояние «Recovered» — выздоровел (примерно через 20 дней).

До момента погребения тела (4,5 дня) агент способен так же, как и в случае «Infectious» передавать болезнь. После агент попадает в состояние «Died».

«Died» и «Recovered» — конечные состояния. На момент окончания болезни у человека вырабатывается иммунитет к вирусу Эбола.

Переходы между всеми состояниями, кроме перехода из «Susceptible» в «Exposed», осуществляются по таймауту. События переходов генерируются агентом. Параметры средней длительности всех перечисленных состояний, а также вероятности заболевания в случае контакта с больным агентом согласованы с данными из исследований [12] и дополнительно подстроены под нашу модель. Такая модель протекания болезни подойдет для многих заболеваний (достаточно простой параметрической настройки).

### **3.2.2. Вероятность контакта. Передача инфекции**

Находясь в одной локации, агенты контактируют между собой. Результатом контакта между больным и здоровым агентом может стать передача инфекции здоровому агенту. Рассмотрим, как для каждого агента рассчитывается вероятность заболевания и формируется достаточный контакт для передачи инфекции.

Вероятность перехода агента из состояния «Susceptible» в состояние «Infectious» зависит от многих факторов. Передача заболевания от одного агента к другому может произойти только в случае контакта между агентами. Контакт между агентами в модели — это событие, вызываемое с определенной интенсивностью агентами, находящимися в состоянии «Infectious» или «Funeral». Промежутки модельного времени

между событиями «контакт» для каждого «больного» агента определяются по экспоненциальному закону распределения вероятности, интенсивность ( $\lambda$ ) при этом характеризуется возрастной группой агента и его текущим местом пребывания (см. формулы выше).

В случае возникновения события «контакт» агент, находящийся в состоянии «Infectious» или «Funeral» выбирает некоторого агента, находящегося в текущий момент модельного времени в той же самой локации, что и агент, породивший событие. Если выбранный агент находится в состоянии «Susceptible», вычисляется вероятность передачи заболевания, в противном случае событие «контакт» оканчивается без последствий.

Вероятность передачи заболевания больным агентом — внутренняя переменная каждого агента. Также существует вероятность получения заболевания здоровым агентом, который участвует в событии «контакт». Но из-за особенностей вируса Эбола эта вероятность пренебрежимо мало отличается от единицы, так что в данной модели учтена не будет.

Таким образом, инфицирование агентов в модели зависит от:

- численности и состояний агентов, находящихся в локации;
- стадии заболевания зараженного агента.

### **3.2.3. Общая структура событий в модели**

Описанная модель распространения вируса Эбола формируется как множество потоков событий различного типа, порождаемых разными частями модели.

Схема взаимодействия компонентов модели, ее параметры и их числовые значения выбраны в соответствии с уже проведенными исследованиями [12]. Модель представляет собой иерархическое дерево активных объектов, вложенных друг в друга. Объект, являющийся корнем этого дерева (корневой объект), представляет самый верхний уровень абстракции модели. Основа динамики модели — взаимодействие



агентов «Person» и локаций «Location» с помощью корневого объекта «Main». Ранее упоминалось, что система децентрализована, поэтому Main – это всего лишь пассивный контейнер. Он не является центром всей модели.

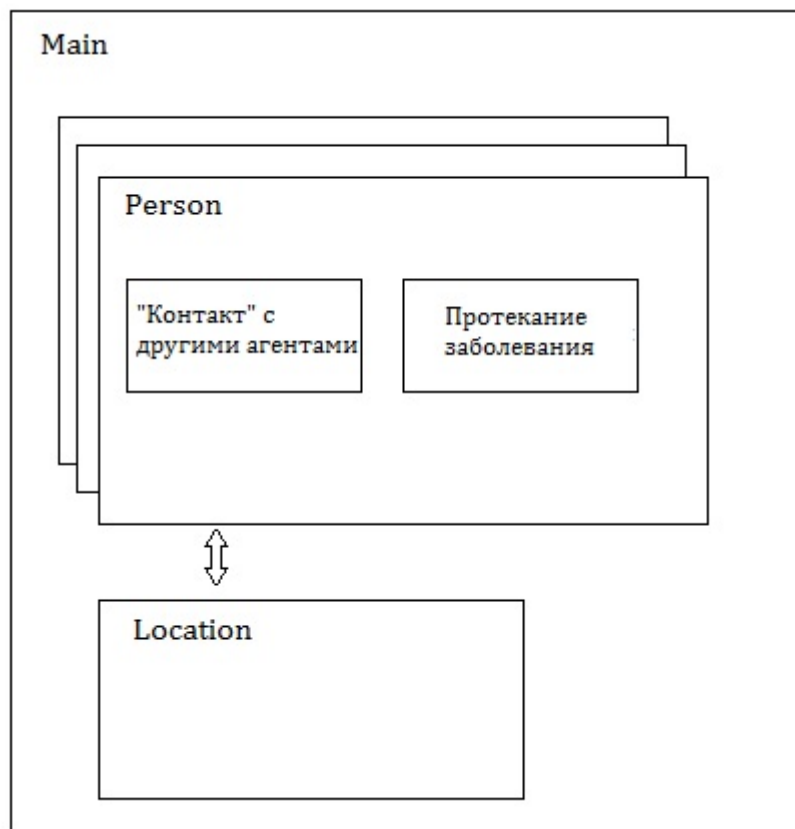


Рис. 2: Структура агентной модели

Перечислим основные виды событий (динамики) в модели, формирующие эпидемическую обстановку:

- события, связанные с протеканием заболевания у агента;
- событие «контакт», порождаемое больным агентом.

Данная модель являлась основой для построения двух более детализированных. Добавится новый функционал и дополнительные параметры для уточнения.

### **3.3. Модель с возрастными группами. Первая модификация**

Две оставшиеся модели основывались на базовой. Добавлялся новый функционал и дополнительные параметры для уточнения.

Первой модификацией базовой модели стало введение возрастного параметра у популяции людей.

В соответствии с рекомендациями специалистов НИИ гриппа [21] выбрано 5 возрастных групп агентов:

- дети до 4 лет;
- подростки 5 – 14 лет;
- молодежь 15 – 24 года;
- взрослые 25 – 54 лет;
- люди преклонного возраста от 55 лет.

Возрастная группа человека характеризует интенсивность контактов с другими людьми. Маленький ребенок, ровно как и пожилой человек общается в среднем меньше, чем взрослый или студент. Таким образом, вероятность передачи заболевания больным агентом в первой модифицированной модели естественным образом зависит от возрастной группы агента.

Число агентов каждой возрастной группы в модели определяются демографическими данными по моделируемой территории [5] [17].

### **3.4. Модель с различными локациями. Вторая модификация**

Вторым расширением стало введение большого количества областей передачи инфекции. Теперь окружающая среда будет состоять из множества локаций, каждый из которых обладает собственными характеристиками и служит одним из возможных местонахождений агента.

Каждой локации соответствует определенное количество агентов, которое может в ней находиться. Количество этих областей напрямую зависит от общего числа агентов. Оно вычисляется автоматически так, чтобы не возникло переполненных и, наоборот, малопосещаемых локаций.

Распределение агентов по всем локациям фиксировано, т.е. агент каждый день посещает конкретные локации как если бы он ходил домой – в свой дом, в школу – в конкретный класс и на работу – на свое рабочее место.

### **3.4.1. Перемещение агентов между локациями**

В динамику модели добавляется очень важный компонент — ежедневное перемещение агентов между различными местами пребывания.

Напомним, что один агент может передать инфекцию другому, только находясь с ним в одной и той же локации. Каждый агент в каждый момент модельного времени находится в одной локации. Перемещения агентов между локациями мгновенны и атомарны.

Процесс перемещения агентов между локациями носит циклический характер с периодом в 24 часа. Событие, связанное с окончанием пребывания агента в текущем месте порождается самим агентом в соответствии с его «распорядком дня». Выбор следующей локации производится также самим агентом.

Таким образом, при всех модификациях инфицирование агентов в модели теперь от:

- возрастной группы агента;
- места пребывания агента;
- численности и состояний агентов, находящихся в той же самой локации;
- стадии заболевания зараженного агента.

Дальнейшая детализация производиться не будет.

### 3.5. Входные и выходные данные модели

Почти все процессы в модели настраиваются параметрически. Часть значений параметров модели определяется в ходе ее настройки и калибровки.

Очевидно, что в том случае, если в начальный момент модельного времени все агенты будут находиться в состоянии «Susceptible» (т. е. будут здоровы), распространения заболевания происходить не будет, и работа модели будет лишена всякого смысла. То есть для нормального функционирования модели в начальный момент модельного времени должны присутствовать «больные» агенты (находящиеся в состоянии «Infectious» или «Exposed»).

Будем в начальный момент времени вызывать для нескольких индивидов «контакт» как бы с больным агентом. Таким образом на начальный момент времени в модели будут агенты, находящиеся в состоянии «Susceptible» или «Exposed». И в нашей системе появляется еще один параметр, отвечающий за начальное число инфицированных.

Распределение агентов по различным локациям изменяется циклически с периодом в один день. Поэтому нет никакой необходимости вычислять и настраивать его при запуске модели.

Результатом работы МРЗ будет уровень заболеваемости: процент больных, умерших и выздоровевших индивидов в каждый момент времени.

## 4. Реализация компьютерных моделей пространства заболевания

### 4.1. Выбор среды моделирования

Представленная в предыдущем разделе мультиагентная модель пространства лихорадки Эбола требует для своей реализации платформы, обеспечивающей:

- построение многоагентных моделей;
- возможность моделирования непрерывных элементов для возможной детализации модели локальных процессов протекания заболевания в организме человека;
- создание большого количества вычислительных экспериментов различного типа;
- эффективное создание графического интерфейса пользователя любой сложности для работы с системой.

Конечно, возможно построение такой платформы на языке программирования высокого уровня, однако она представляет собой отдельную сложную задачу и времени на ее разработку ушло бы несравнимо больше.

Мультиагентное моделирование сегодня очень популярно. За последние году разработан не один десяток сред агентного моделирования. Кратко посмотрим наиболее известные из них, используемые для МРЗ.

#### **NetLogo**

NetLogo [13] [2] – это кроссплатформенная среда моделирования, основанная на языке Logo. Но несмотря на это NetLogo позволяет использование сторонних процедур, написанных на других языках программирования, например, Java. Язык Logo создавался с целью обучать детей с помощью компьютера. Так и NetLogo остается средой моделирования, ориентированной на обучение, поэтому пригодна для построения

преимущественно не сложных моделей, хотя и позволяет проводить их полноценный анализ с помощью сторонних средств.

Этот язык моделирования не удобен для работы со сложными структурами данных, а нестандартные вычислительные эксперименты с моделью необходимо формировать вне среды NetLogo на определенном языке программирования, что также вызывает неудобство.

## **SOARS**

SOARS (Spot Oriented Agent Role Simulator) [14] — это достаточно новая кроссплатформенная среда мультиагентного визуального моделирования. Была разработана в Японии. С помощью нее можно строить мультиагентные модели на специальном графическом языке моделирования. В модели ключевое место играют: агенты — agent, места — spot, и правила — role. Места моделируют в модели окружающую среду для агентов. Правила определяют поведение каждого агента и окружающей среды. Время в модели среды SOARS движется дискретно, и измеряется по шагам — step. В каждый шаг агенты и места действуют в соответствии со своими правилами. Таким образом определяется общее состояние моделируемой системы.

В данной работе не может быть использована как среда моделирования, т.к. не предусматривает использование непрерывных элементов. В нашем случае непрерывными являются системы дифференциальных уравнений.

## **AnyLogic**

Среда разработана на кафедре распределенных вычислений и компьютерных сетей СПбГПУ (Санкт-Петербургский Политехнический Университет) на основе последних [1]. AnyLogic — профессиональный инструмент имитационного моделирования нового поколения, в настоящее время он активно применяется для разработки моделей сложных систем.

AnyLogic изначально создавался как инструмент для мультиагентного моделирования. Программный инструмент AnyLogic основан на объектно-ориентированной концепции. Эта концепция позволяет разработчикам моделей в среде AnyLogic организовать мышление, струк-

турировать разработку, упростить и ускорить создание моделей. Система AnyLogic основана на языке программирования Java и позволяет использовать в составе модели любые конструкции на этом языке.

Активный объект в AnyLogic — это объект со своим собственным функционированием, взаимодействующий с окружением. Графическая среда поддерживает как разработку, так и выполнение компьютерных экспериментов с моделью, включая различные виды анализа (оптимизационные и вариационные эксперименты).

Для реализации агентной модели распространения вируса Эбола была использована среда агентного компьютерного моделирования AnyLogic.

## 4.2. Структура компьютерной имитационной модели распространения

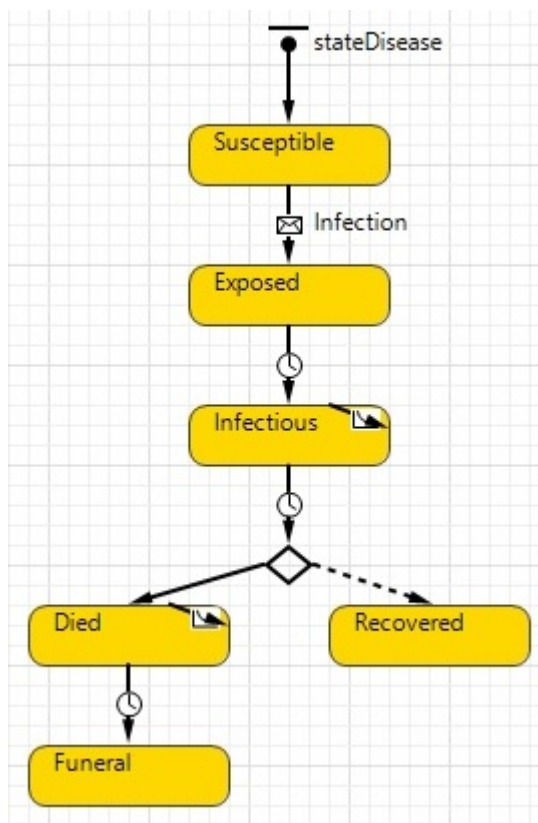


Рис. 3: Протекание заболевания у агента

Представленные в предыдущем разделе мультиагентные модели распространения вируса Эбола были реализованы в среде моделирования

AnyLogic 7. Реализации выполнялись последовательно, начиная с базовой. (рис. 3)

На изображении можно увидеть, как в AnyLogic можно отобразить процесс протекания лихорадки Эбола.

Логику всей системы можно разделить на классы моделей (корневой объект, агент-человек, агент-локация) и классы вычислительных экспериментов.

Для отслеживания работы моделей необходимо большое количество внутренних переменных системы, отвечающих за индивидуальные особенности агентов и заболевания в целом. Для отслеживания изменений некоторых переменных с течением времени были использованы наборы данных — массивы системы AnyLogic. При визуализации в виде гра-

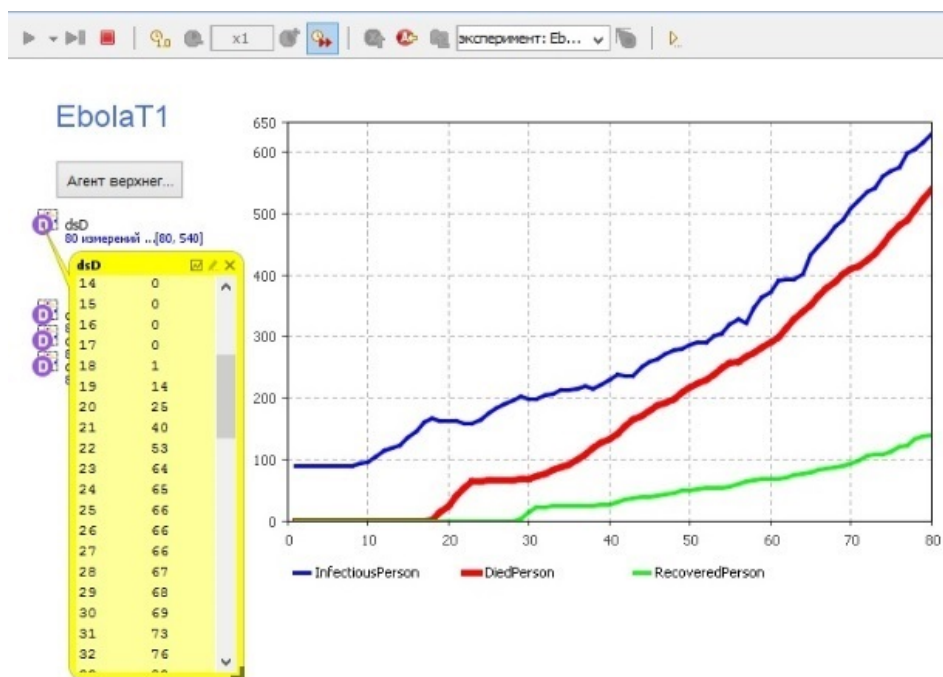


Рис. 4: Пример результатов работы агентной модели

фигов они дают общую картину протекания эпидемии в моделируемом городе. (рис. 4)

#### 4.2.1. Стохастический эксперимент

Базовым экспериментом с моделью является стохастический. Он играет важную роль в исследовании моделей, т.к. эксперимент повторяет



исполнение модели многократно и на основе результатов делает достоверные выводы по работе всей системы. Одной итерации было бы недостаточно, т.к. ее исполнение представляет собой лишь одну из реализаций случайного процесса. Поэтому, для получения достоверного прогноза следует проводить исполнение модели несколько раз (с помощью стохастического эксперимента). Количество исполнений модели обосновывается в работе [18]. Эти рассуждения справедливы и в нашем случае.

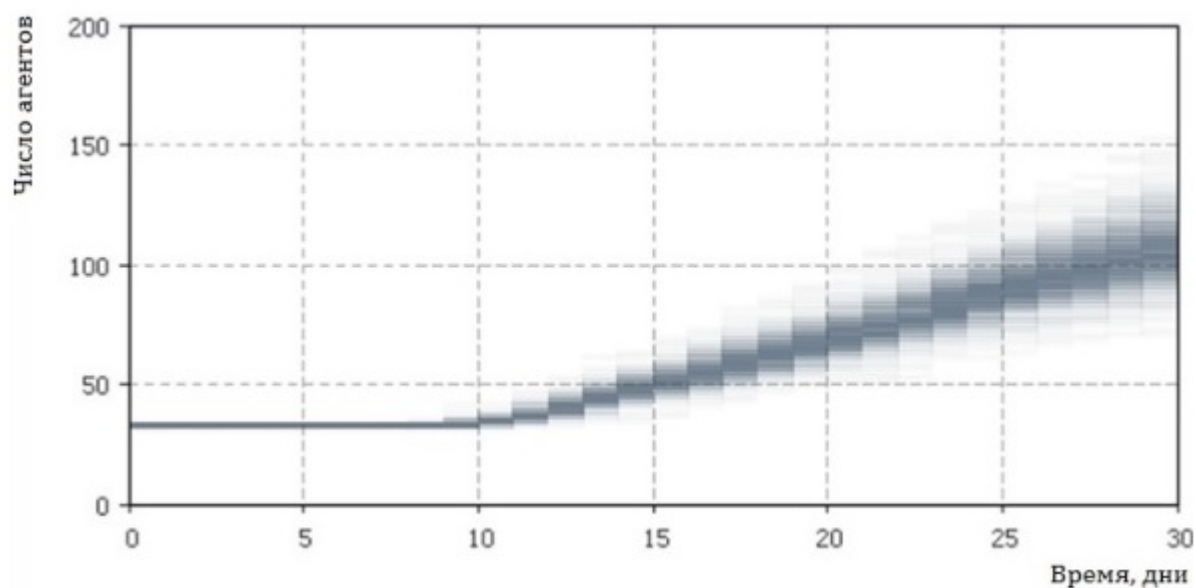


Рис. 5: Результат работы стохастического эксперимента

На данной гистограмме (рис. 5) каждая линия указывает на одну из 2000 стохастически моделируемых прогнозов эпидемии. Участки с более плотным цветом указывают на большую вероятность попадания в данный прогноз.

#### 4.2.2. Оптимизационный эксперимент

Калибровка модели — процесс тонкой настройки наборов исходных данных (параметров) модели таким образом, чтобы обеспечить максимальное приближение результатов расчета к данным натуральных измерений заболеваемости лихорадки Эбола. Оптимизационный эксперимент решает данную проблему.

Идея эксперимента заключается в многократном исполнении модели с последовательным изменением параметров, которые нужно уточнить для лучшей работы модели. На каждое изменение параметра приходилось по 20 итераций модели (как и в стохастическом эксперименте).

Выбор наиболее подходящего набора параметров заключается в минимизации целевой функции. В данном случае целевая функция бралась как среднеквадратичное отклонение результатов работы модели от реальной статистики по заболеванию. После завершения эксперимента можно увидеть наилучшую итерацию – оптимизированные параметры, а также значение целевой функции. Это позволяет численно сравнивать различные модели между собой.

Каждая из разработанных моделей имеет свой набор параметров, на которых проводился эксперимент. Ниже приведен их список.

Базовая модель:

- вероятность контакта;
- вероятность смерти;
- начальное число заболевших.

Модель с первой модификацией. Добавляется возрастной параметр:

- для детей;
- для подростков;
- для молодежи;
- для взрослых;
- для людей преклонного возраста.

Модель со второй модификацией. Добавляется параметр, отвечающий за количество локаций в модели.

## 5. Тестирование и анализ разработанных моделей

Мультиагентная модель распространения вируса Эбола может содержать миллионы активных агентов. Однако их количество ограничено вычислительной мощностью компьютера, на котором проводится запуск модели. На современном персональном компьютере были проведены стохастические эксперименты с моделью, насчитывавшей от 5000 до 50000 агентов.

Используемая конфигурация тестовой машины:

ОС: Windows 8.1

Тип ОС: x64

CPU: Intel(R) Core(TM) i7-3630QM CPU @ 2.40GHz 2.40GHz

Оперативная память: 7,89 Гб

Чтобы проанализировать и сравнить результаты работы каждой модели, нужно не только «подобрать» параметры для их работы, но и проверить корректность. Для этого все исходные данные уточнялись на одном городе — Кенема, а сравнение производилось с данными, взятыми из другого города — Кайлахун. Сравнение производилось как визуально — по графикам смертности и заболеваемости, так и численно — по значению целевой функции.

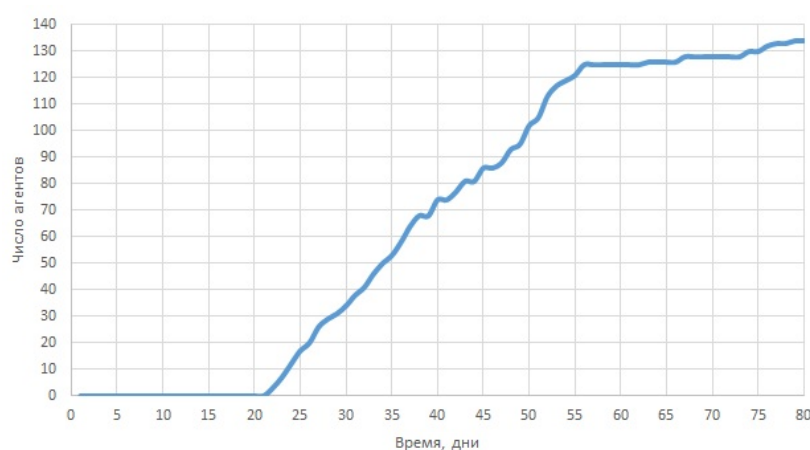


Рис. 6: Статистика смертности в городе Кенема

Если посмотреть на графики смертности в городах Кенема и Кайла-

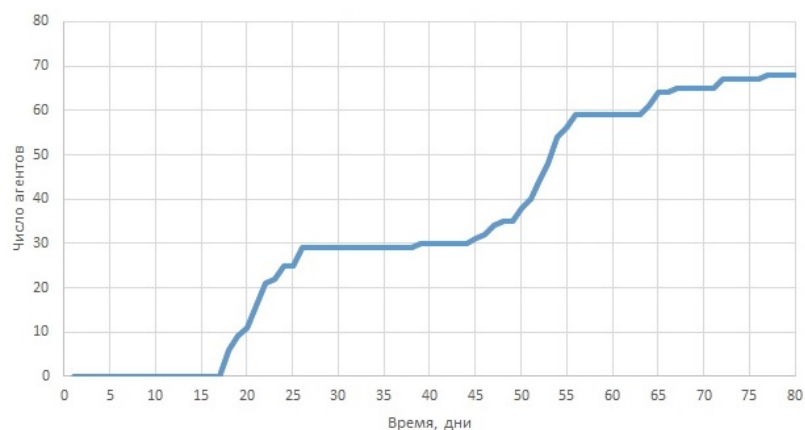


Рис. 7: Статистика смертности в городе Кайлахун

хун, то явно можно увидеть, что, начиная с определенного дня, болезнь идет на спад. (рис. 6, рис. 7)

Из этого можно сделать вывод, что начиная с 30 дня в городе Кайлахун и 55 дня в городе Кенема были предприняты меры защиты для борьбы с вирусом. Стоит заметить, что наши модели не учитывают введение мер защиты населения. Из-за этого обучение и сравнение будет проводиться только на участках без карантина.

Ниже представлены значения параметров, уточненных по городу Кенема для каждой модели. (табл. 1)

Таблица 1: Уточненные параметры моделей

	Базовая	1 мод-ция	2 мод-ция
вер-ть контакта	0.099	0.078	0.115
вер-ть смерти	0.855	0.843	0.947
начальное число болевших	37	50	51
возр.пар-тр для детей	нет	0.594	0.578
возр.пар-тр для подростков	нет	1.826	1.754
возр.пар-тр для молодежи	нет	1.735	1.825
возр.пар-тр для взрослых	нет	1	1
возр.пар-тр для пожилых	нет	0.669	0.698
количество локаций	нет	нет	801

Далее представлены результаты работы моделей на городе Кайлахун с оптимизированными параметрами (рис. 8, рис. 9):

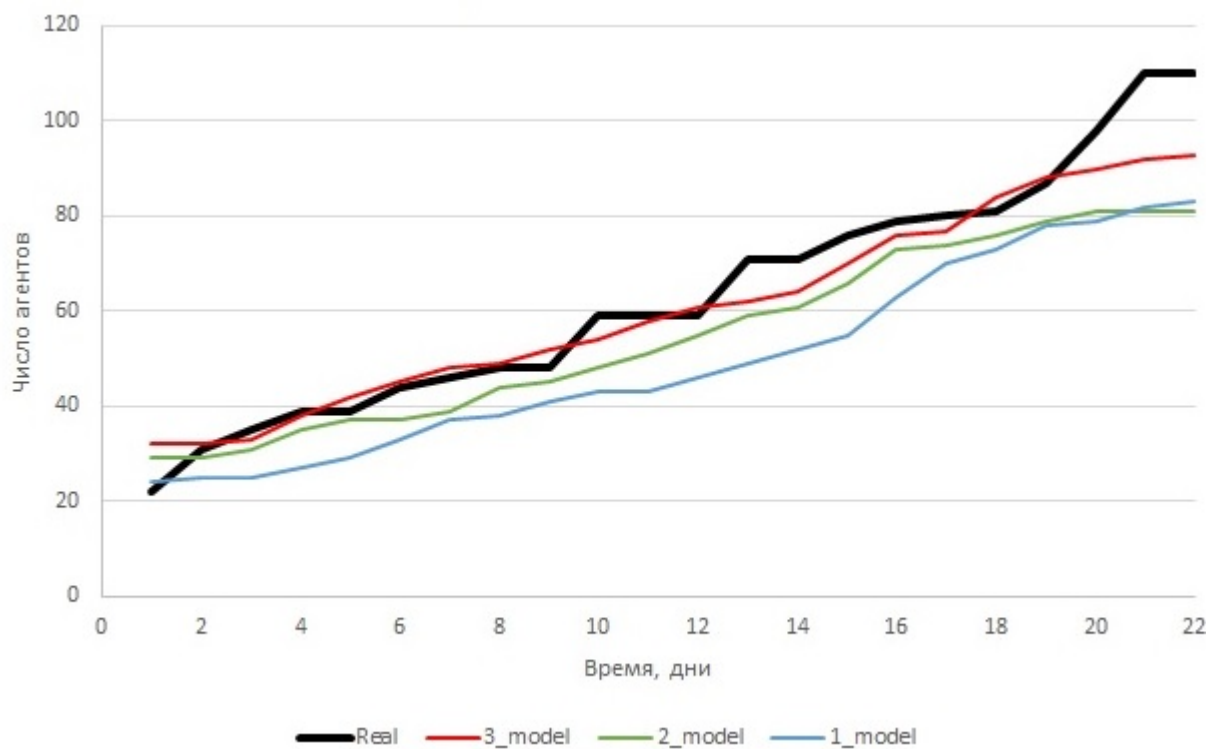


Рис. 8: по числу заболевших с начала работы модели

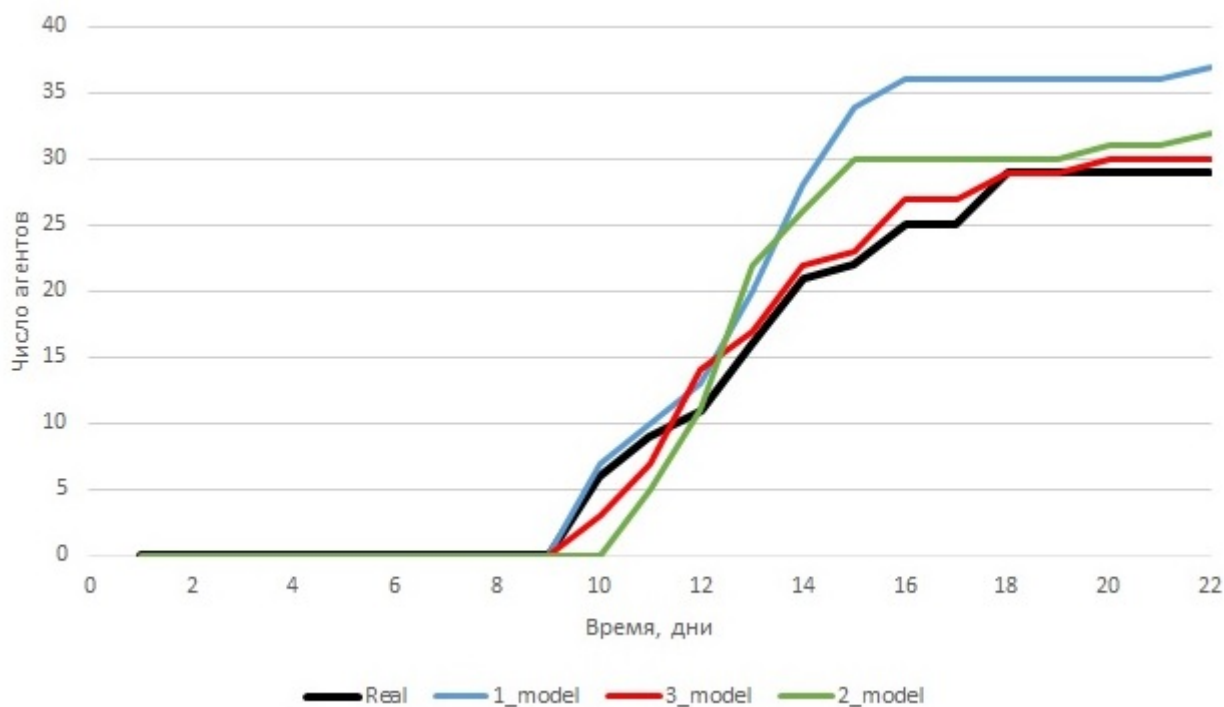


Рис. 9: по числу умерших с начала работы модели

Черным цветом отображена реальная статистика по городу Кайлахун.

По графикам видно, что наиболее точно показала себя модель с наибольшей степенью детализации.

Таблица 2: Численные результаты работы моделей

	Базовая	1 мод-ция	2 мод-ция
целевая функция	12.826	11.523	10.548
максимальный "разлет" модели, агенты	22	26	36
время работы, сек	24.2	28.6	34.3

Численные характеристики (табл. 2) также говорят о лучшей работе третьей модели. Однако время ее работы на прогон стохастического эксперимента по городу Кайлахун на 20% больше, чем у моделей с меньшей проработанностью.

Результаты предварительных экспериментов выявили, что прирост точности прогнозирования несравним со значительным приростом времени работы модели. Дальнейшая детализация приведет к еще большим затратам времени, а точность прогноза при этом изменится не значительно.

## Заключение

Агентный подход можно считать наиболее перспективным в области моделирования развития эпидемий, так как он позволяет преодолеть все ограничения классических моделей распространения заболеваний.

Агентный подход к имитационному моделированию использован для создания стохастической МРЗ, отражающей вероятностную природу эпидемических процессов.

Построенные МРЗ позволяют выполнить прогноз эпидемической обстановки на основе текущих статистических данных заболеваемости, а так же количественно оценить результаты определенной последовательности событий на исследуемой территории. В разработанных моделях рассматривается территория только одного города (или района) и популяция соответствующего размера.

Были решены следующие задачи:

- реализована модель SIR в общем виде;
- собраны, проанализированы и структурированы статистические данные по лихорадке Эбола;
- реализована базовая модель, внутренние состояния агентов;
- на основе базовой модели реализованы модели с более высокой детализацией;
- сделаны модификации модели для лихорадки Эбола;
- проведено тестирование и сравнение моделей.

Качество работы построенных МРЗ было протестировано (какая модель) и проанализировано на основе статистических данных заболеваемости вирусом Эбола, собранных Институтом Биоинформатики штата Виргиния [7].

Конечно базовая модель и ее усовершенствования не отражают всю полноту социальных взаимодействий в отдельном городе (например не

было рассмотрено введение карантина или большего разнообразия локаций), но и этого уже достаточно чтобы выявить закономерности по быстрдействию и точности прогноза на примере заболевания вирусом Эбола.



## Список литературы

- [1] AnyLogic. — <http://www.anylogic.ru/>.
- [2] Bakshy E., Wilensky U. Turtle Histories and Alternate Universes: Exploratory Modeling with NetLogo and Mathematica. — P. 147–158., 2007.
- [3] Brauer F., Castillo-Chavez C. Mathematical Models in Population Biology and Epidemiology. — Springer-Verlag New York, 2001.
- [4] Centers for Disease Control and Prevention (U.S.). Generic Ebola response (ER) : modeling the spread of disease impact intervention. — <http://stacks.cdc.gov/view/cdc/24900>.
- [5] Centers for Disease Sierra-Lione. — <http://www.thefreedictionary.com/Sierra->
- [6] Hindawi Publishing Corporation. — <http://www.hindawi.com/>.
- [7] Informatics Resources for Ebola Epidemic Response. — <http://www.vbi.vt.edu/ndssl/ebola>.
- [8] The Liberia Ministry of Health. Data for the 2014 ebola outbreak in West Africa. — <https://github.com/cmrrivers/ebola/>.
- [9] National Center for Biotechnology Information. A universal model for predicting dynamics of the epidemics caused by special pathogens. — <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/>.
- [10] National Center for Biotechnology Information. A universal model for predicting dynamics of the epidemics caused by special pathogens. — <http://www.hindawi.com/journals/bmri/2013/467078/>.
- [11] Public Health Dynamics Laboratory. Framework for Reconstructing Epidemiological Dynamics. — <http://fred.publichealth.pitt.edu/>.
- [12] Rivers C.M., Lofgren E. T. Modeling the Impact of Interventions on an Epidemic of Ebola in Sierra Leone and Liberia. —

<http://currents.plos.org/outbreaks/article/obk-14-0043-modeling-the-impact-of-interventions-on-an-epidemic-of-ebola-in-sierra-leone-and-liberia/>.

- [13] Sklar E. NetLogo, a multi-agent simulation environment. — Vol. 13, № 3. — P. 303–311., 2007.
- [14] Tanuma H., Deguchi H., Shimizu T. SOARS: Spot Oriented Agent Role Simulator. — Design and Implementation // Agent-Based Social Systems. Vol. 1. — P. 1–15., 2005.
- [15] The lancet Infectious Diseases. Spatiotemporal spread of the 2014 outbreak of Ebola virus disease in Liberia and the effectiveness of non-pharmaceutical interventions: a computational modelling analysis. — [http://www.thelancet.com/journals/laninf/article/PIIS1473-3099\(14\)71074-6/fulltext](http://www.thelancet.com/journals/laninf/article/PIIS1473-3099(14)71074-6/fulltext).
- [16] Бейли Н. Математика в биологии и медицине. — М.: Мир, —327 с. 3, 1970.
- [17] Институт демографии Национального университета. — [http://demoscope.ru/weekly/ssp/census\\_types.php?ct=1](http://demoscope.ru/weekly/ssp/census_types.php?ct=1).
- [18] Кондратьев М.А. Разработка модели распространения инфекционных заболеваний на основе агентного подхода. — Санкт-Петербург, 2012.
- [19] Макаров В.Л., Бахтизин А.Р. Компьютерное моделирование искусственных миров [Электронный ресурс]. — <http://www.xjtek.ru/file/212>.
- [20] О ситуации с лихорадкой Эбола. — <http://rospotrebнадзор.ru/region/210fz/index.php>.
- [21] О совершенствовании системы эпидемиологического надзора и контроля за гриппом и острыми респираторными вирусными инфекциями [Электронный ресурс]: приказ Федеральной службы по

надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека от 31 марта 2005 г. № 373. — <http://www.referent.ru/1/82009>.

- [22] Паринов С.И. Новые возможности имитационного моделирования социально-экономических систем. — Т. 2, № 3–4. — С. 26–61, 2007.