

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
МЕХАНИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра дифференциальных уравнений и системного анализа

**АГЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭПИДЕМИЙ
С УЧЁТОМ ПЕРЕДВИЖЕНИЯ АГЕНТОВ**

Курсовая работа

Комок Екатерины Фёдоровны

студентки 3 курса,
специальность 1-31 03 09
Компьютерная математика
и системный анализ

Научный руководитель:
кандидат физ.-мат. наук,
доцент О. А. Лаврова

Минск, 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ	4
1.1 ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ	4
1.2 АНАЛИЗ АНАЛИТИЧЕСКОЙ И ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛЕЙ	5
1.3 СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	6
1.4 АГЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ	8
1.5 СИСТЕМНАЯ ДИНАМИКА	8
1.6 ОПИСАНИЕ АГЕНТОВ С ПОМОЩЬЮ UML-ДИАГРАММ	9
1.7 ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕДАЧИ СООБЩЕНИЙ МЕЖДУ АГЕНТАМИ.....	10
1.8 ДИАГРАММА НАКОПИТЕЛЕЙ И ПОТОКОВ	11
ГЛАВА 2 ИЗУЧЕНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ НЕКОТОРЫХ АГЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭПИДЕМИИ	14
2.1 КЛАССИЧЕСКАЯ SIR-МОДЕЛЬ	14
2.1.1 Описание.....	14
2.1.2 Моделирование агентов.....	16
2.1.3 Описание технологии передачи сообщений	16
2.1.4 Входные данные	17
2.2 SIR-МОДЕЛЬ С КАЛИБРОВКОЙ ПАРАМЕТРОВ ПОД РЕАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ	18
2.2.1 Эксперимент калибровки.....	18
2.2.2 Эксперимент Монте-Карло	18
2.2.3 Описание.....	19
2.3 МОДИФИКАЦИЯ SIR-МОДЕЛИ С УЧЕТОМ СЕТЕВОЙ СТРУКТУРЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АГЕНТОВ	19
2.3.1 Типы сетей.....	20
2.3.2 Особенности данной модели	21
2.3.3 Описание модели с учётом сетевой структуры.....	22
ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ АГЕНТНОЙ МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭПИДЕМИИ.....	24
3.1 ТЕКСТОВАЯ ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ	24
3.2 РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ	26
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	29
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	30

ВВЕДЕНИЕ

В текущий момент времени в мире наблюдается сложная эпидемиологическая ситуация, которая побуждает всех на принятие мер по предотвращению и защите человечества от угрозы. В связи с данной ситуацией спрос на исследования в области моделирования распространения инфекции резко возрос. Одним из лидирующих инструментов имитационного моделирования является AnyLogic. Этот инструмент удобен для анализа, так как является наглядным, простым для понимания и проверки. Исследование демо-примеров распространения эпидемии в среде AnyLogic позволяет более детально изучить общую картину, а также даёт фундамент знаний для дальнейшего изучения и проектирования собственных моделей распространения.

Работа носит реферативный характер:

- В главе 1 данной работы представлены основные понятия, необходимые для исследования демо-примеров.
- В главе 2 проведён разбор классической SIR-модели распространения эпидемии с различными параметрами и структурами.
- В главе 3 изучена имитационная модель, приближённая к реальности.

ГЛАВА 1

АНАЛИЗ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

1.1 Основные определения

AnyLogic – программное обеспечение для имитационного моделирования.

Начнём по порядку: модель – материальный или мысленно представляемый объект, который в процессе познания (изучения) замещает объект-оригинал (система, процесс, явление), сохраняя некоторые важные для данного исследования черты. Моделирование – это процесс построения модели и проведение исследований на модели с целью изучить некоторые свойства объекта в определённых условиях. Данный процесс подразумевает переход на определённый уровень абстракции: опуская несущественные детали, мы учитываем только то, что считаем важным. Однако в реальном мире система всегда сложнее своей модели.

В сущности, моделирование является поиском решения задачи в защищенном от риска мире моделей, в котором мы можем ошибаться, отменять операции, возвращаться в прошлое и начинать все сначала [2, с. 6].

Главное отличие моделирования от других методов изучения сложных систем – возможность оптимизации системы до её реализации. Процесс моделирования состоит из трёх стадий: формализации (переход от реального объекта к модели), моделирования (анализ и оптимизацию модели, нахождение решения), интерпретации (перевод результатов моделирования в область реальности) [8, с. 73].

1.2 Анализ аналитической и имитационной моделей

Традиционно математические модели разделяют на аналитические и имитационные модели. Аналитические модели представляют собой уравнения или системы уравнений, записанные в виде алгебраических, интегральных, дифференциальных, конечно-разностных и иных соотношений и логических условий. Они записаны и решены в буквенном виде. Аналитическая модель, как правило, статическая. Аналитическое представление подходит лишь для очень простых и сильно идеализированных задач и объектов, которые, как правило, имеют мало общего с реальной (сложной) действительностью, но обладают высокой общностью. Данный тип моделей обычно применяют для описания фундаментальных свойств объектов, так как фундамент прост по своей сути. Сложные объекты редко удаётся описать аналитически.

Альтернативой аналитическим моделям являются имитационные модели (динамические). Основное отличие имитационных моделей от аналитических состоит в том, что вместо аналитического описания взаимосвязей между входами и выходами исследуемой системы строят алгоритм, отображающий последовательность развития процессов внутри исследуемого объекта, а затем «проигрывают» поведение объекта на компьютере. К имитационным моделям прибегают тогда, когда объект моделирования настолько сложен, что адекватно описать его поведение математическими уравнениями невозможно или затруднительно. Имитационное моделирование позволяет разлагать большую модель на части (объекты, «кусочки»), которыми можно оперировать по отдельности, создавая другие, более простые или, наоборот, более сложные модели.

Таким образом, основным преимуществом имитационного моделирования по сравнению с аналитическим является возможность решения более сложных задач, так как имитационную модель можно постепенно усложнять, при этом

результативность модели не падает. При имитационном моделировании воспроизводится алгоритм функционирования системы во времени – поведение системы, причем имитируются элементарные явления, составляющие процесс, с сохранением их логической структуры и последовательности протекания, что позволяет по исходным данным получить сведения о состояниях процесса в определенные моменты времени, дающие возможность оценить характеристики системы.

В аналитических моделях можно использовать широкий арсенал математических методов, что часто позволяет найти оптимальное решение и иногда провести анализ чувствительности. Однако, к сожалению, аналитические решения не всегда существуют, а существующие не всегда просто найти. Что касается имитационных моделей, то оптимальность решения не гарантирована, и даже более того – часто трудно получить решение, хотя бы в какой-то степени близкое к оптимальному. Иногда требуется провести много испытаний имитационной модели, чтобы получить приемлемую достоверность «добротности» какого-либо решения. Однако с помощью имитационного моделирования можно получить такие данные, которые с помощью аналитических моделей получить очень сложно или совсем невозможно, например, определить влияние изменчивости параметров модели, поведение модели до достижения ею установившегося состояния и т.п [8, с. 73].

1.3 Современные методы имитационного моделирования

Имитационное моделирование – это удобный инструмент для анализа: он нагляден, прост для понимания и проверки.

В современном моделировании используются три подхода (методологии): дискретно-событийное моделирование, агентное моделирование и системная динамика.

AnyLogic – первый и единственный инструмент, который предлагает возможность многоподходного имитационного моделирования.

Каждый метод применяется в некотором диапазоне уровней абстракции (Рис. 1.1) [2, с. 12]. Системная динамика предполагает очень высокий уровень абстракции и, как правило, используется для стратегического моделирования. Дискретно-событийное моделирование поддерживает средний и низкий уровни абстракции. Между ними находятся агентные модели, которые могут быть как очень детализированными, когда агенты представляют физические объекты, так и предельно абстрактными, когда с помощью агентов моделируются конкурирующие компании или правительства государств.

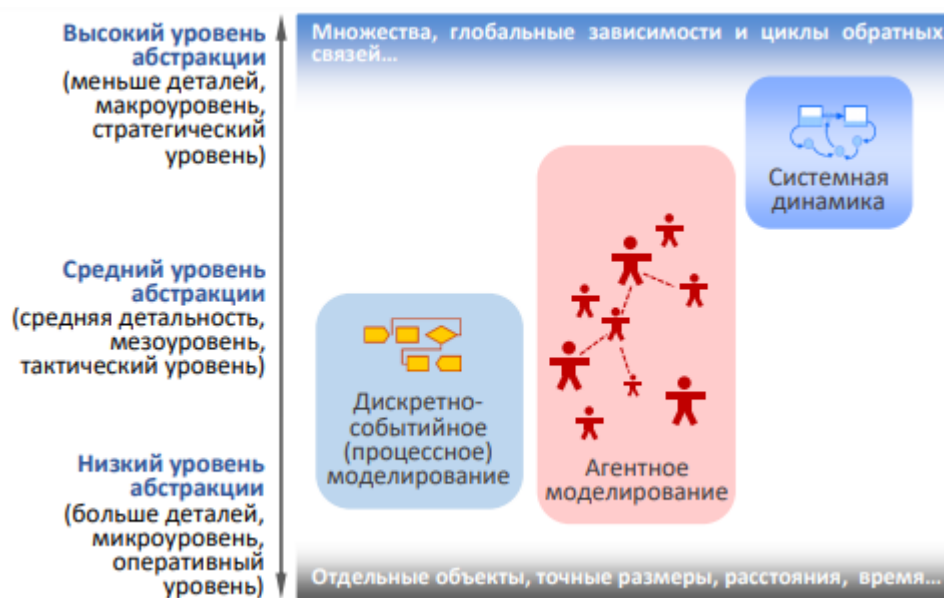


Рисунок 1.1 Уровни абстракции основных подходов имитационного моделирования

1.4 Агентное моделирование

Агентная модель — это ряд взаимодействующих объектов, которые отражают собой связи в реальном мире.

Можно не знать ни поведения системы в целом, ни ее главных переменных и зависимостей между ними, или не видеть четкой схемы процессов, но при этом понимать, как ведут себя отдельные элементы системы. В таком случае можно начать создание модели с идентификации моделируемых объектов (агентов) и задания их поведения. Иногда может понадобиться объединить агентов в сеть и позволить им взаимодействовать друг с другом, либо же поместить агентов в среду, которая имеет свою собственную динамику. Таким образом, глобальное поведение системы формируется из многих десятков (тысяч, миллионов) параллельно протекающих процессов.

Агентами могут быть самые разные объекты: транспортные средства, оборудование, проекты, организации, земельные участки, люди и так далее.

На данный момент не существует стандартного языка агентного моделирования. Структура агентной модели может быть задана как графически, так и с помощью сценариев. Поведение агента может быть задано различными способами. Если у агента есть состояние, от которого зависят его действия и реакции, то его поведение лучше всего задавать с помощью диаграммы состояний. Иногда поведение агента задается действиями, выполняемыми при наступлении определенных событий.

1.5 Системная динамика

Метод системной динамики был изобретен в 1950-х Джейм Форрестером из Массачусетского Технологического Института (MIT). Используя свой научный и

инженерный опыт, Форрестер искал способ применения законов физики, в частности, законов электрических цепей, к исследованиям и описанию динамики процессов социальных и экономических систем.

Системная динамика чаще всего используется для разработки долгосрочных стратегических моделей и предполагает высокий уровень агрегации объектов: модели системной динамики рассматривают людей, товары, ресурсы и другие отдельные элементы в количественных терминах.

Системная динамика предоставляет методы изучения динамических систем. Такой метод используется для:

- моделирования системы как закрытой структуры, которая сама определяет собственное поведение.
- обнаружения циклов обратной связи, уравнивающего или усиливающего типа. Циклы обратной связи занимают центральное место в системной динамике.
- задания накопителей и потоков, которые на них влияют [2, с. 105].

1.6 Описание агентов с помощью UML-диаграмм

Лучше всего задавать поведение агента с помощью диаграммы состояний.

Диаграммы состояний (карты состояний, стейтчарты) (Рис. 1.2) [2, с. 42] являются самым удобным средством задания поведения агента. Диаграммы состояний содержат состояния и переходы. Состояния диаграммы являются взаимоисключающими, то есть в каждый момент времени агент может находиться только в одном состоянии. Срабатывание перехода приводит к смене состояния и активации новых переходов. Допускается создание иерархических состояний, которые содержат внутри себя другие состояния и переходы.

У одного агента может быть сразу несколько диаграмм состояний, каждая из которых описывает независимые аспекты поведения агента.

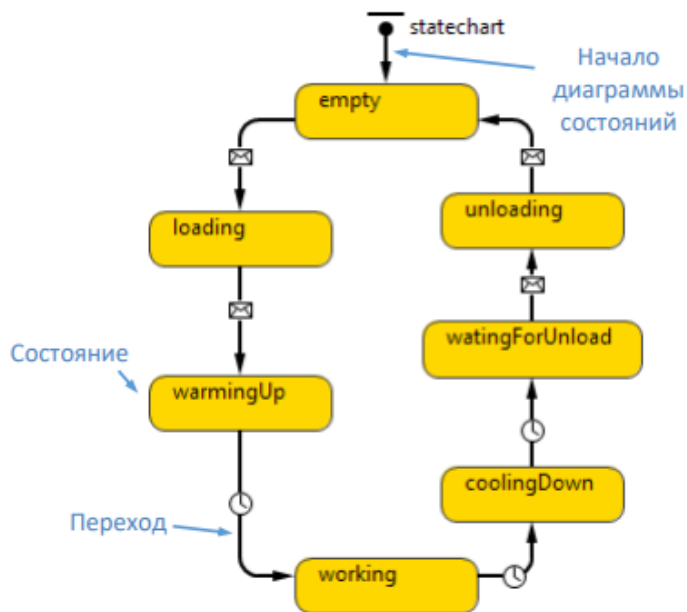


Рисунок 1.2 Диаграмма состояний

1.7 Технологии передачи сообщений между агентами

Переход из одного состояния в другое может быть вызван событиями различных типов. Приведенная ниже таблица перечисляет все возможные типы таких событий. Для каждого типа приведен специальный значок, по которому легко распознать тип перехода в диаграмме состояний (Таблица 1.1) [2, с. 50].

Переход происходит:	Описание
По таймауту 	Срабатывает после того, как состояние диаграммы пробудет активным в течение заданного промежутка времени (таймаута) с момента перехода управления в это состояние. Таймаут может быть задан как определенным числом, так и стохастическим (случайным) выражением.

С заданной интенсивностью 	Моделирует смену состояния через случайный промежуток времени, когда известно среднее время пребывания в состоянии. Аналогичен переходу по таймауту, у которого таймаут считается согласно экспоненциальному распределению, параметром которого является значение интенсивности. Если интенсивность = 0.2, то время пребывания в состоянии будет в среднем равно $1/0.2 = 5$ единиц модельного времени.
При выполнении условия 	Переход отслеживает выполнение заданного логического (булевского) условия и срабатывает, когда это условие будет выполнено. Условие может зависеть как от текущего состояния данного агента, так и от состояний других объектов моделируемой системы.
При получении сообщения 	Реагирует на получение сообщений от других агентов. Сообщения чаще всего моделируют общение/взаимодействие агентов друг с другом. Вы можете задать в свойствах перехода шаблон сообщения, в этом случае переход будет срабатывать только при получении сообщений, удовлетворяющих заданному шаблону.
По прибытию агента 	Срабатывает по прибытии агента в заданное место назначения. <i>Переход данного типа будет срабатывать только в том случае, если движение было начато вследствие вызова функции агента <code>moveTo()</code>.</i>

Таблица 1.1 Технологии передачи сообщений между агентами

1.8 Диаграмма накопителей и потоков

В системной динамике накопители (иногда они также называются уровнями или фондами) представляют собой переменные, которые эквивалентны объему определенного «вещества» (это могут быть деньги, знания, люди, жидкости и т.п.). Накопители характеризуют состояние системы. Они содержат память системы.

Модель работает только с совокупностью объектов: отдельные элементы, содержащиеся в накопителе, не различимы. Значения накопителей изменяются с течением времени именно согласно существующим в системе потокам.

Потоки задают динамику системы, представляют интенсивность, с которой меняются состояния системы. Потоки измеряют количество чего-либо за период времени, например, количество клиентов в месяц или долларов в год. Входящий в накопитель поток увеличивает значение данного накопителя, исходящий из накопителя поток уменьшает его значение. Ниже приведены примеры накопителей и потоков (Таблица 1.2):

<i>Накопитель</i>	<i>Входящие потоки</i>	<i>Исходящие потоки</i>
Население	Рождаемость	Смертность
	Иммиграция	Эмиграция
Бак с горючим	Заправка	Потребление горючего

Таблица 1.2 Примеры накопителей и потоков

Один и тот же поток может служить исходящим потоком для одного накопителя и входящим - для другого; в этом случае говорится, что это поток из первого накопителя во второй (Рис. 1.3):

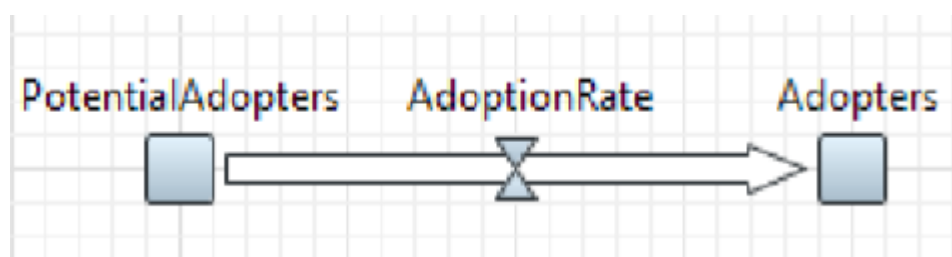


Рис. 1.3 Переход из одного накопителя в другой накопитель

Если поток начинает течение "из ниоткуда", то в его начальной точке рисуется общепринятый для таких случаев символ облака (Рис. 1.4 (а)). Аналогично, облако

рисуеться у конечной точки потока, если поток течет не в какой-то другой накопитель, а "в никуда" (Рис. 1.4 (б)).

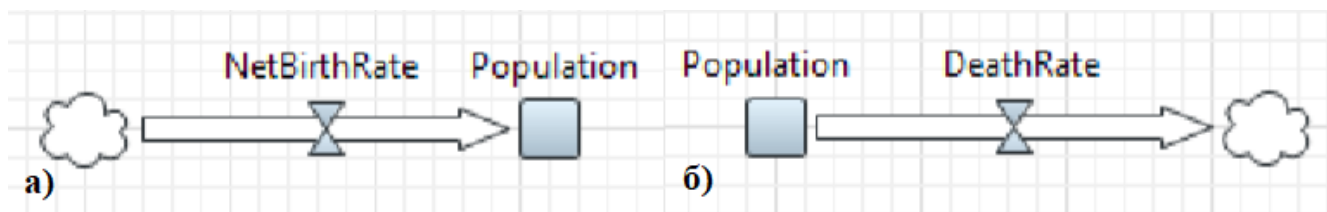


Рис. 1.4 Примеры переходов с облачными накопителями

Направление стрелки потока обозначает влияние этого потока на накопители [2, с. 110].

ГЛАВА 2

ИЗУЧЕНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ НЕКОТОРЫХ АГЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭПИДЕМИИ

2.1 Классическая SIR-модель

2.1.1 Описание

В «классической» модели системной динамики распространения заболевания общая популяция делится на три части (категории) в зависимости от их статуса заболевания: восприимчивый к заболеванию, инфекционный и выздоровевший. Отсюда три части, которые можно смоделировать как накопители на диаграмме накопителей и потоков (Рис. 2.1) (Рисунок взят с демо-примера в AnyLogic). Когда люди заражаются, они переходят из категории восприимчивых в категорию инфекционных, а затем, по мере выздоровления, в категорию выздоровевших. Болезнь распространяется на тех, кто находится в инфекционном контакте и передает болезнь тем, кто восприимчив (петля положительной обратной связи), и в то же время истощает запас восприимчивых (отрицательная петля). Выздоровление от болезни создает еще одну отрицательную петлю обратной связи.

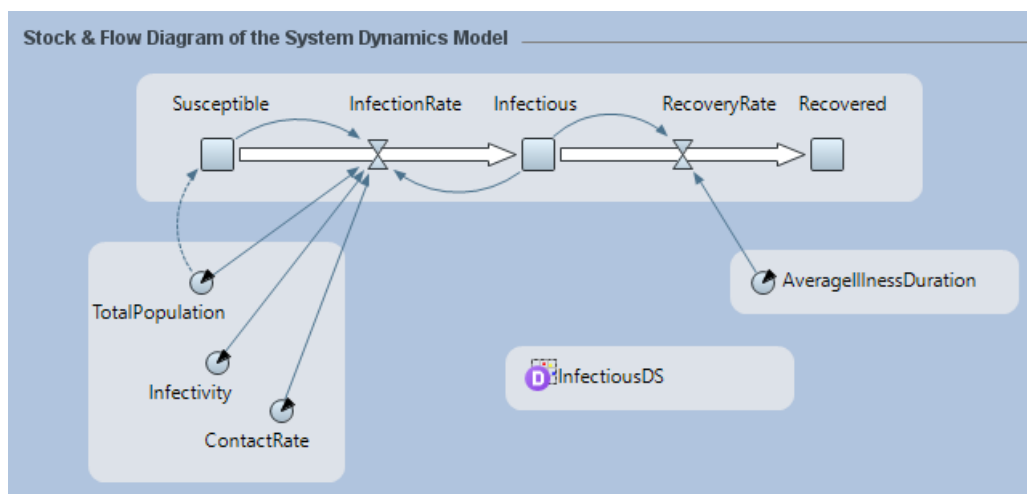


Рисунок 2.1 Диаграмма накопителей и потоков

В динамике распространения заболевания наблюдается 1 «пик» (Рис. 2.2) [1, с. 238]. Тем не менее, эта модель делает ряд упрощающих предположений. Одним из самых сильных предположений является однородность и идеальное смешивание людей в каждой части: например, предполагается, что все инфекционные люди ведут себя одинаково, независимо от их индивидуальной истории, свойств и т. д. Это предположение подразумевает, что любой Человек в популяции может связаться с кем-либо еще с такой же вероятностью. Такое упрощение иногда может быть оправдано, если интересующая болезнь распространяется через переносимые по воздуху частицы, такие как грипп, и представляющая интерес популяция проживает в большом хорошо связанном мегаполисе.

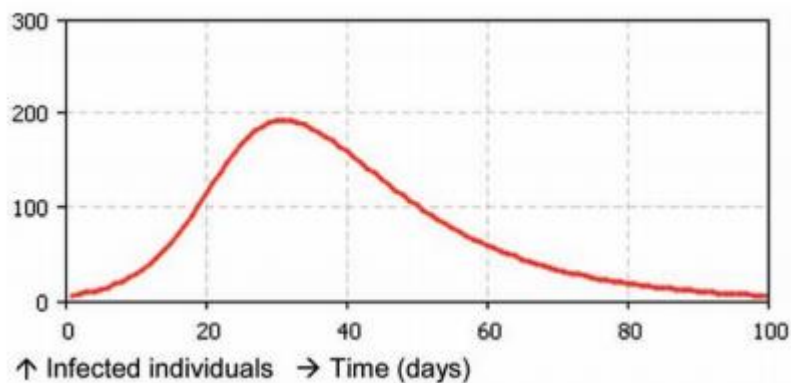


Рисунок 2.2 Динамика распространения заболевания

2.1.2 Моделирование агентов

Каждый человек моделируется как отдельный объект со своими собственными параметрами, переменными состояния и правилами поведения. Поведение агента может быть непрерывным во времени, дискретным (на основе событий) или гибридным. В этой конкретной модели мы различаем три различных состояния человека (восприимчивое, инфекционное и восстановленное) и предполагаем, что переходы между состояниями происходят мгновенно и непрерывных изменений нет.

В этой конкретной модели агенты являются однородными, то есть они имеют одинаковые значения параметров и имеют идентичное поведение.

Диаграмма состояний описывает это поведение. Следует обратить внимание, что состояния агентов являются взаимоисключающими: агент может находиться только в одном состоянии за раз (Рис. 2.3) [1, с. 239]. Чтобы отразить тот факт, что некоторые люди уже были заражены в начале симуляции, точка входа в диаграмму состояний имеет ветку InitiallyInfected.

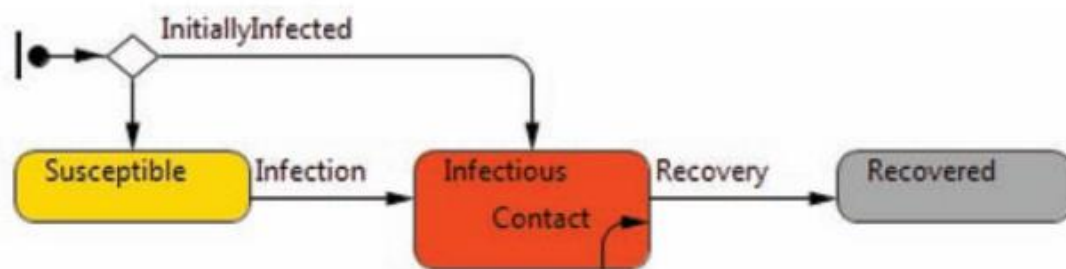


Рисунок 2.3 Диаграмма состояний в SIR-модели

2.1.3 Описание технологии передачи сообщений

Переход в инфекционное состояние моделирует случай, когда заболевание передается агенту от больного человека. В модельных терминах этот переход

вызывает сообщение «Инфекция». Оказавшись в инфекционном состоянии, агент может передать заболевание другим.

2.1.4 Входные данные

На входе рассматривается численность населения, равная 1 000 человек, которая обозначена как TotalPopulation. Вначале заражен только один человек, а все остальные лишь восприимчивы к болезни.

Во время болезни один человек в среднем контактирует с другими с интенсивностью ContactRate, также является постоянным параметром. В процессе этого перехода агент выберет другого агента из знакомых ему людей и отправит ему сообщение «Инфекция».

Однако логично предположить, что не каждый контакт приводит к заражению, поэтому сообщение отправляются с вероятностью Infectivity, которая является еще одним глобальным параметром. Если сообщение достигает агента, который уже заражен или восстановлен, оно игнорируется, потому что нет перехода из тех состояний, вызванных таким сообщением.

Наконец, переход «Выздоровление» - это тайм-аут, который определяет продолжительность болезни (другими словами, длительность периода, когда этот человек может заражать других). В модели динамики системы тайм-аут часто моделируется как экспоненциально распределенный со значением AverageIllnessDuration.

Выздоровевшие люди получают иммунитет к болезни и не могут снова заболеть.

2.2 SIR-модель с калибровкой параметров под реальные данные

2.2.1 Эксперимент калибровки

При завершении работы по формализации модели и построению ее структуры, может понадобиться узнать, при каких значениях параметров модель будет работать наиболее близко к реальной системе, которую она моделирует, то есть такие значения параметров, при которых результат на выходе модели будет наиболее близок к известному (измеренному в реальной жизни). Если таких параметров сразу несколько, то выполнить такую работу вручную представляется практически невозможным. Для решения таких задач AnyLogic предлагает пользователям эксперимент калибровки.

Эксперимент калибровки производит несколько повторных запусков модели с разными значениями параметров и находит с помощью встроенного оптимизатора такие значения параметров модели, при которых результаты моделирования наиболее точно соответствуют заданным данным.

Данные могут быть заданы как в скалярной форме, так и с помощью набора данных. В случае необходимости использования множественных критериев могут быть заданы весовые коэффициенты.

Данный тип эксперимента осуществляет визуализацию процесса калибровки и соответствия результатов каждому заданному критерию.

2.2.2 Эксперимент Монте-Карло

Эксперимент Монте-Карло позволяет выполнить несколько повторных запусков стохастической модели или модели со стохастически меняющимися параметрами и отобразить полученный набор результатов моделирования с

помощью гистограмм (возможно использование не только обычных, но и двумерных гистограмм).

Если модель стохастична по своей природе, то каждый "прогон" модели будет выдавать уникальный результат моделирования, даже если не будут изменяться значения входных параметров. Но можно и самостоятельно генерировать случайное значение параметра модели для каждого "прогона" модели.

2.2.3 Описание

Идея SIR-модели осталась, а цель модели с калибровкой параметров состоит в том, чтобы найти параметры агентов (частоты контактов и вероятности заражения), чтобы результаты имитационной модели наилучшим образом соответствовали историческим данным - динамике распространения заболевания. Поскольку модель является стохастической, калибровка выполняется в условиях неопределенности, и используются репликации моделирования. Отдельный эксперимент Монте-Карло 1-го порядка включен для демонстрации результатов агентной модели.

2.3 Модификация SIR-модели с учетом сетевой структуры взаимодействия агентов

Данная модель является также расширением обычной SIR-модели, которая позволяет исследовать динамику распространения в нескольких типах социальных сетей: на основе расстояния, случайного, свободного от масштаба, маленького мира и кольцевой решетки. Связи (и, следовательно, контакты) между людьми определяются типом сети.

2.3.1 Типы сетей

Динамика распространения заболеваний может быть представлена в следующих типах сетей:

- *Полный*: любой агент может связаться с любым другим.
- *Случайный*: агент связан со случайным подмножеством совокупности агентов.
- *Безразмерный*: некоторые люди являются «социо-ориентированными» с большим количеством связей, а некоторые - «отшельниками» с несколькими связями. Сеть такого типа строится с использованием алгоритма предпочтительного присоединения, в котором вероятность того, что новый человек установит связь с существующими людьми, пропорциональна количеству ссылок, которые эти люди уже имеют.
- *Малый мир*: большинство агентов связаны со своими близкими соседями, но существует определенный процент дальних связей, то есть ссылок на удаленных агентов. Один из способов описать такое расположение - расположить агентов по кругу (кольцевая структура) и определить соседей как агентов, ближайших слева и справа.
- *Решёточно упорядоченное кольцо*: каждый человек связан с фиксированным числом своих ближайших соседей по кольцу. Этот тип сети наиболее удален от полностью подключенной сети.

Структуры сети показаны на рисунке 8 для 50 агентов (Рис. 2.4) [1, с. 240].

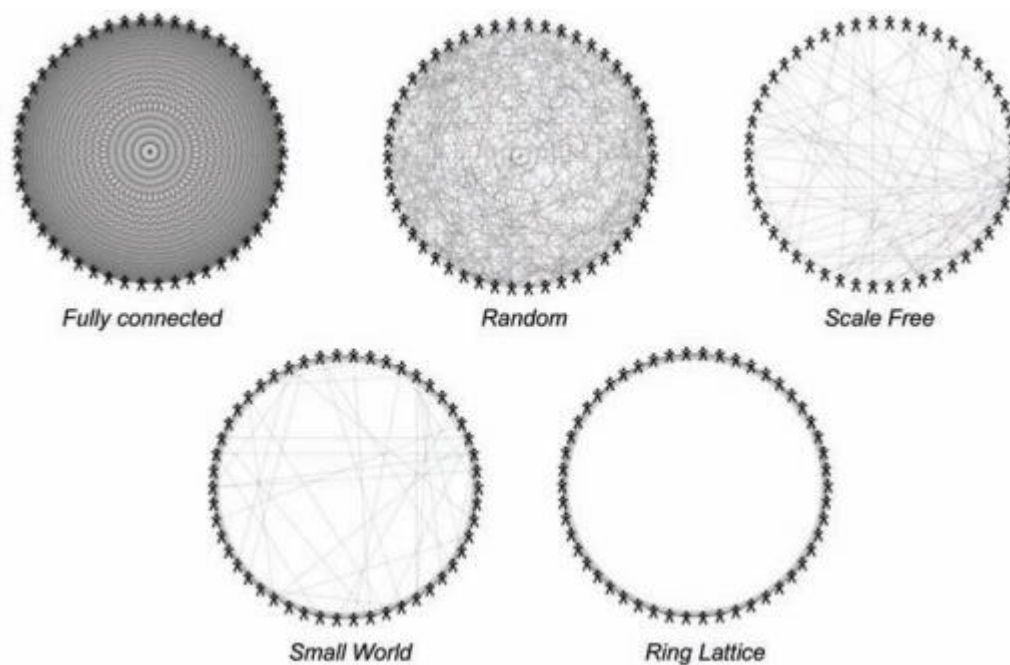


Рисунок 2.4 Схемы диаграмм различных сетевых структур

2.3.2 Особенности данной модели

Согласно классической SIR- модели, различается три различных состояния человека: восприимчивое, инфекционное и выздоровление. Однако, чтобы отразить тот факт, что некоторые люди уже были заражены в начале моделирования, точка входа диаграммы состояний агента имеет ветвь *InitiallyInfected*. Выбор начального состояния является вероятностным и основан на глобальном параметре модели *FractionInitiallyInfected*.

В отличие от модели системной динамики, которая является детерминированной и генерирует единственную траекторию, агентное моделирование является стохастическим (в этом случае из-за возникновения контакта, вероятности заражения во время контакта, продолжительности болезни и структуры сети). Поэтому каждый прогон симуляции даст разные результаты. Поэтому следует выполнить ряд прогонов для каждой сетевой структуры:

- На основе расстояния - люди связаны между собой, если расстояние между ними не превышает заданное значение;
- Случайный;
- Малый мир;
- Безразмерный;
- Решёточно упорядоченное кольцо.

2.3.3 Описание модели с учётом сетевой структуры

Исследуя модель с сетевой структурой на основе расстояния, эпидемия быстро возрастает, а затем исчезает. Не все люди заражаются. Процент лиц остается восприимчивым.

Когда субъекты связаны случайным образом, эпидемия меньше и распространяется медленнее, чем полностью связанный случай, потому что каждый человек имеет только ограниченное количество связей.

В случае, когда все субъекты расположены по кругу, заболевание распространяется только на ближайших соседей, и, следовательно, скорость передачи гораздо ниже, и эпидемия может продолжаться гораздо дольше и в конечном итоге привести к еще большему числу инфицированных людей чем в случае случайного смешивания.

Небольшие мировые эпидемические формы можно рассматривать как комбинацию случайного смешивания и случаев решёточно упорядоченных колец, потому что малый мир структурирован как ближайшие соседи со случайными связями с остальной частью населения.

Одна из главных особенностей безразмерных групп состоит в том, что у них есть потенциальные «суперпредставители», которые, если они заразятся, могут быстро заразить большое количество людей.

Исходя из анализа проходов можно подытожить: чем меньше сеть напоминает хорошо перемешанную структуру, тем сильнее расхождение в динамике заболевания в сетевой структуре.

ГЛАВА 3

РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ АГЕНТНОЙ МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭПИДЕМИИ

3.1 Текстовая эпидемиологическая модель

В качестве основы для данной модели была выбрана простейшая SIR-модель распространения инфекции в популяции организмов-хозяев, в которой каждый индивид популяции может находиться в одном из трех состояний:

- чувствителен к инфекции (S),
- заражен и инфекционен (I),
- иммунен к инфекции (R).

Скорость инфицирования индивидов (т.е. перехода из состояния S в состояние I) зависит от плотности индивидов в состоянии I. Скорость излечения с формированием иммунитета (т.е. перехода из стадии I в стадию R) осуществляется с постоянной удельной скоростью.

Как правило, в SIR-моделях на основе дифференциальных уравнений предполагается наличие однородной популяции, и эпидемиологические контакты между индивидами происходят на основе закона глобального перемешивания. Однако в нашей тестовой модели была учтена неоднородность популяции, имитирующая динамическую сеть социальных контактов, что приблизило ее к моделям, более адекватным для решения практических задач.

Социальная структура в нашей модели формируется за счет разделения популяции на “контактные группы”, представляющие собой группы индивидов, находящихся в эпидемиологическом контакте, а потому способных передавать инфекцию друг другу. В нашей модели каждый индивид связан одновременно с

три “контактными группами”, но в каждый момент времени находится только в одной из них и перемещается между ними по определенному закону.

Каждый индивид популяции является отдельным агентом, имеющим следующие параметры:

- “SIR-статус” (т.е. состояние относительно инфекции),
- идентификаторы трех “контактных групп”, с которыми связан индивид (условно “его семья”, “его транспорт”, “его коллеги”),
- идентификатор “контактной группы”, в которой он находится,
- возраст,
- счетчик инфицирования.

Шаг времени модели – один час. В течение одного модельного дня каждый индивид, чей возраст находится в диапазоне от 7000 до 29000 модельных часов (условно “взрослый”), перемещается между тремя группами, с которыми он связан, по постоянному расписанию (“дом”→“транспорт”→“работа”→“транспорт”→“дом”).

Моделирование передачи инфекции внутри “контактной группы” осуществляется за счет увеличения на единицу счетчика инфицирования у каждого чувствительного к инфекции индивида с вероятностью, пропорциональной плотности инфекционных индивидов в этой группе. При достижении счетчиком случайно изменяемого порога инфицирования индивид переходит в категорию инфекционных. Далее его счетчик инфицирования растет на единицу на каждом шаге модели, пока не превысит случайно изменяемый порог выздоровления. После этого индивид переводится в класс иммунных.

Изменчивость социальной структуры определяется тем, что каждый агент с вероятностью 10–5 может на каждом шаге модели сменить любую из трех своих “контактных групп” (в том числе и с формированием новой группы) [4, с. 427].

3.2 Реализация модели

Для начала моделируются популяции агентов таких как offices (офисы), houses (дома), transports (транспорт), people (люди) (Рис3.1). Пройдёмся по каждой из популяций отдельно, но прежде определим входные параметры:

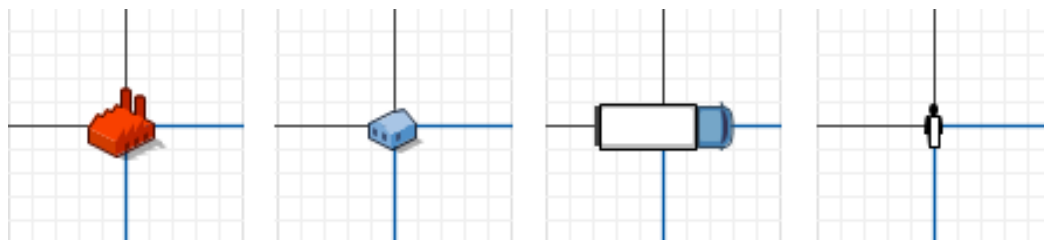


Рисунок 3.1 Анимации агентов таких как офис, дом, транспорт, человек соответственно

- `officesInRow` – количество офисов в строке (то есть в рассматриваемой области офисы будем располагать не случайно, а задавать фиксировано).
- `peoplePerHouse` - размер социальной ячейки, то есть количество людей в доме.
- `maxPeoplePerHouse` – максимальный размер социальной ячейки.
- `minPeopleInOffice` – минимальное количество людей, которое должно добраться до офиса.
- `infectedNumber` – изначальное количество заражённых.
- `inOfficeInfectionChance` – вероятность заражения в офисе.
- `inHouseInfectionChance` – вероятность заражения дома.
- `inBusInfectionChance` – вероятность заражения в автобусе.
- `minRecoveryTime` – минимальное время выздоровления.
- `maxRecoveryTime` – максимальное время выздоровления.
- `lostImmunityTime` – инкубационный период.

Каждая популяция агентов моделируется как отдельный объект со своими собственными параметрами, переменными состояния и правилами поведения. Рассмотрим ближе популяции:

- **Offices:** офисы, неподвижные объекты, их количество есть постоянная величина, задаваемая параметром OfficesInRow ($\text{OfficesInRow} * \text{OfficesInRow}$); расположение на месте анимации агентов в виде сетки.
- **Transports:** транспорт(автобусы), приводимые в движение объекты, а именно движение происходит согласно представленной ниже диаграмме состояний (Рис. 3.2): в начальный момент времени автобусы находятся на станциях (будем считать, что станции располагаются вблизи офисов, то есть количество станций и их расположение совпадает с количеством и расположением офисов) определённый промежуток времени (таймаут), далее направляется на следующую станцию, движение же происходит по горизонтальным и вертикальным рёбрам сетки офисов.

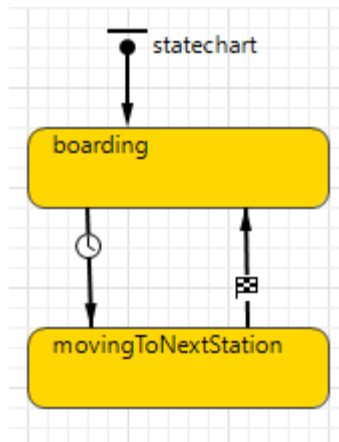


Рисунок 3.2 Диаграмма состояний транспорта

- **Houses:** начальное количество домов вычисляется по формуле:

$$(\text{officesInRow} * \text{officesInRow} * \text{meanPeopleInOffice}) / \text{peoplePerHouse} + ((\text{officesInRow} * \text{officesInRow} * \text{meanPeopleInOffice}) \% \text{peoplePerHouse} == 0 ? 0 : 1),$$
 то есть количество домов зависит от входных параметров, неподвижные объекты; содержит коллекцию жильцов (люди, проживающие в данном доме),

переменную «ближайшая автобусная станция» () и событие «начало рабочего дня» (сообщает жильцам о начале рабочего дня).

- People: люди, главные исследуемые объекты в рассматриваемой модели, описываются с помощью диаграммы состояний (Рис. 3.3). В начальный момент времени люди находятся по домам, получив сообщение о начале рабочего дня, отправляются на ближайшую автобусную станцию, чтобы добраться до офиса (всё как в жизни: если прямого автобуса до офиса нет, то человек доезжает до удобной остановки, ждёт нужный автобус, получив сообщение о прибытии автобуса, садится в этот автобус и отправляется к месту назначения, и так до тех пор, пока не приедет в нужный офис), получив сообщение об окончании рабочего дня, человек следует домой аналогичным способом.

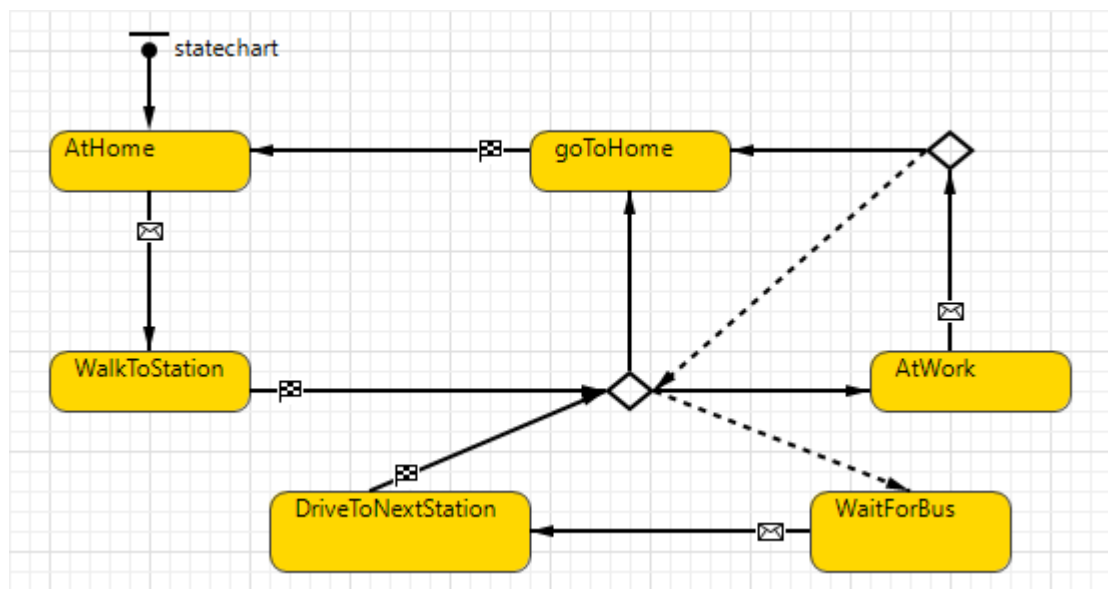


Рисунок 3.3 Диаграмма состояний человека

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной курсовой работе была проведена работа по ознакомлению и изучению имитационного моделирования в среде AnyLogic.

В 1 главе работы был проведен анализ предметной области.

Во 2 главе работы были изучены демо-примеры в AnyLogic: детально изучена классическая SIR-модель распространения эпидемии, а также модели, основанные на классической SIR-модели с калибровкой параметров под реальные данные и с учётом сетевой структуры взаимодействия агентов.

В 3 главе работы изучена модель [5], разобрана реализация данной модели в среде AnyLogic.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Multi-Agent Systems for Healthcare Simulation and Modeling: Applications for System Improvement / Raman Paranjape, Asha Sadanand. – Hershey: New York, 2010.
2. AnyLogic за три дня. Практическое пособие по имитационному моделированию / Илья Григорьев.
3. Практическое агентное моделирование и его место в арсенале аналитика / А. В. Борщёв. – ИММОД, 2005.
4. Агентные модели: анализ подходов и возможности приложения к эпидемиологии / К.К. Авилов, О.Ю. Соловей. – 2012.
5. Основы имитационного моделирования и системного анализа в управлении. Учебное пособие / Д. Ю. Каталевский. – Издательский дом ДЕЛО, Москва, 2015.
6. Справка AnyLogic [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://help.anylogic.ru/index.jsp?topic=%2Fcom.anylogic.help%2Fhtml%2Fexperiments%2FAbout+Experiments.html> – Дата доступа: 13.05.2020.
7. Теоретические основы и методология имитационного и комплексного моделирования. Сравнительный анализ имитационных и аналитических моделей. / О. И. Бабина. – ИММОД, Красноярск, 2009.