

МОДЕЛЬ СИСТЕМНОЙ ДИНАМИКИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КОРОНАВИРУСНОЙ ИНФЕКЦИИ В РМЭ

Л. П. Бакуменко, А. А. Федорова

Марийский государственный университет, Йошкар-Ола, Россия
E-mail: lpbakum@mail.ru, fedalark@gmail.com

Для моделирования различных сценариев развития инфекции и оценки распространения COVID-19 в разных условиях была построена модель SEIR. Данная модель позволяет определить скорость распространения инфекции и прогнозировать возможные эпидемические вспышки. Предложенная модель может быть использована при планировании и оценке эффективности мер по борьбе с инфекционными заболеваниями и предотвращения их распространения. Модель построена на основе данных Министерства здравоохранения Республики Марий Эл.

MODEL OF SYSTEM DYNAMICS OF CORONAVIRUS INFECTION SPREAD IN RME

L. P. Bakumenko, A. A. Fedorova

A SEIR model was built to simulate different infection scenarios and assess the spread of COVID-19 in different conditions. This model allows us to determine the rate of spread of infection and predict possible epidemic outbreaks. The proposed model can be used in planning and assessing the effectiveness of measures to combat infectious diseases and prevent their spread. The model is built on the basis of data from the Ministry of Health of the Republic of Mari El.

Моделирование распространения коронавирусной инфекцией играет огромную роль в борьбе с COVID-19, так как позволяет предотвратить угрожающие последствия пандемии. Моделирование также может помочь обществу разработать и внедрить более точные меры контроля и мониторинга распространения инфекции, что позволит быстро реагировать на возможные вспышки заболевания и предотвратить их распространение [1].

Наиболее широкое распространение при анализе темпов развития вирусных эпидемий, в том числе и эпидемии COVID-19, получили модификации математических моделей типа SEIR [2]. Модель рассчитывается на основе комплексной системы дифференциальных уравнений, описывающих динамику перехода между четырьмя категориями:

Susceptible – восприимчивые к заражению люди, которые еще не были заражены вирусом, но могут заразиться от инфицированных людей.

Exposed – люди, находящиеся в латентной стадии заражения (они уже заражены, но еще не могут заражать других).

Infectious – люди в активной стадии заражения (они могут заражать других людей).

Recovered – выздоровевшие люди (они приобрели иммунитет к данному заболеванию).

В 2020 году в Базельском университете команда Ричарда Нейерома модифицировала модель SEIR с учетом специфики новой пандемии коронавируса. Доработанная модель включает концепцию так называемого эпидемического перехода. Другими словами, симуляция ведет себя совсем по-разному в зависимости от переменной R_0 . Каждый инфицированный человек может заразить несколько здоровых. R_0 показывает среднее количество людей, которое один инфицированный может заразить в период своей болезни. Если R_0 меньше единицы, эпидемия постепенно стихает, а если больше – экспоненциально растет. Как работает R_0 , зависит от конкретного вируса, процента населения, у которого вырабатывается иммунитет к вирусу, а также от мер, которые принимает население для сдерживания эпидемии.

Преимущества SEIR модели [3]:

1) Учет латентного периода инфицирования, что позволяет более точно предсказывать количество заболевших на будущее;

2) На основе данных модели можно проводить анализ различных сценариев для прогнозирования влияния данных мер на распространение инфекции.

Однако для построения более точных SEIR моделей требуется точная информация о контактах между людьми, вероятности передачи инфекции, которые могут различаться в разных регионах и на разных этапах пандемии. Кроме того, такие модели требуют значительных вычислительных мощностей.

Рассматриваемая модель распространения COVID-19 в Республике Марий Эл реализована в среде AnyLogic [5]. Модифицирована она с учетом некоторых особенностей, присущих именно эпидемии COVID-19. Основные параметры, включенные в данную модель, представлены в таблице.

Параметры классической модели распространения инфекции

Параметры	Значения
TotalPopulation (численность населения, чел)	671455
Infectivity (вероятность передачи инфекции)	0.6
ContactRateInfectious (среднее количество контактов у одного человека в день)	1,25
AverageIncubationTime (средний инкубационный период, дней)	10
AverageIllnessDuration (средняя длительность болезни, дней)	15

Процесс построения модели проходил следующим образом [4]:

1. На первом шаге в модель добавляются накопители: Susceptible, Exposed, Infectious и Recovered. Это четыре категории людей: восприимчивые, переносчики, инфицированные и выздоровевшие.

2. Далее добавляются потоки: ExposedRate, InfectiousRate и RecoveredRate,

соответствующие процессам инкубационного периода, заболевания и выздоровления.

3. На третьем шаге задаются параметры и зависимости: TotalPopulation, Infectivity, ContactRateInfectious, AverageIncubationTime, AverageIllnessDuration, соответствующие значениям начальной численности и коэффициентам перехода из одной категории в другую.

4. Далее необходимо добавить связь между параметрами и накопителями и задать потокам формулы.

Реализованная системно-динамическая модель распространения эпидемии представлена на рис. 1.

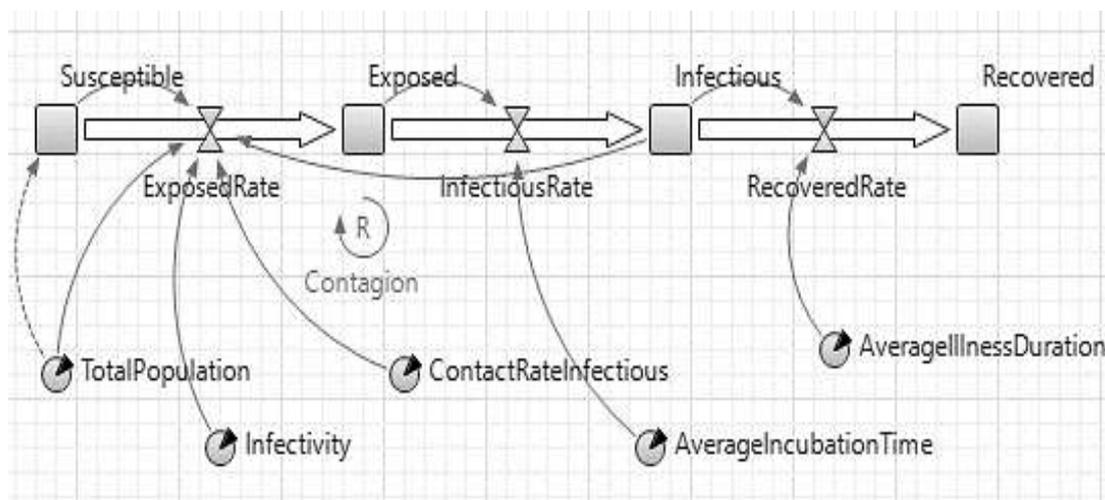


Рис. 1. Классическая модель распространения инфекции в Anylogic 8.8.2.

Данную имитационную модель можно преобразовать в аналитическую в виде следующей системы дифференциальных уравнений [5]:

$$\frac{dS(t)}{dt} = -\frac{\sigma p S(t)}{N} \quad (1)$$

$$\frac{dE(t)}{dt} = \frac{\sigma p S(t)}{N} - \frac{E(t)}{\lambda} \quad (2)$$

$$\frac{dI(t)}{dt} = \frac{E(t)}{\lambda} - \frac{I(t)}{a} \quad (3)$$

$$\frac{dR(t)}{dt} = \frac{I(t)}{a} \quad (4)$$

где $N = S + E + I + R$ – общее количество агентов;

σ – уровень контактов агентов;

p – вероятность заражения при контакте;

$S(t)$ – количество здоровых агентов, которые могут заразиться;

λ – продолжительность инкубационного периода;

$E(t)$ – количество латентных агентов;

a – средняя продолжительность болезни.

$I(t)$ – количество зараженных (в активной стадии);

$R(t)$ – количество выздоровевших агентов;

Построенная модель позволяет графически отображать зависимости переменных $S(t)$, $E(t)$, $I(t)$ и $R(t)$ от времени t [6]. Однако не все параметры совпадают в реальности с поведением моделируемого объекта. Поэтому для достижения достоверности результатов была произведена валидация значений параметров Infectivity и ContactRateInfectious на основе реальных данных. С помощью эксперимента калибровка в среде AnyLogic были подобраны такие параметры, которые наиболее точно совпадали с поведением моделируемого объекта в реальной жизни.

В качестве исторических данных для проведения эксперимента были выбраны ежедневные измерения количества заболевших COVID-19 в Республике Марий Эл за период со 2 апреля 2020 года по 15 мая 2023 года.

После многократного прогона модели с помощью описанного эксперимента были подобраны наиболее близкие к реальной ситуации новые комбинации значений параметров Infectivity и ContactRateInfectious, с помощью которых можно в динамике осуществлять мониторинг заболеваемости COVID-19 (рис. 2).

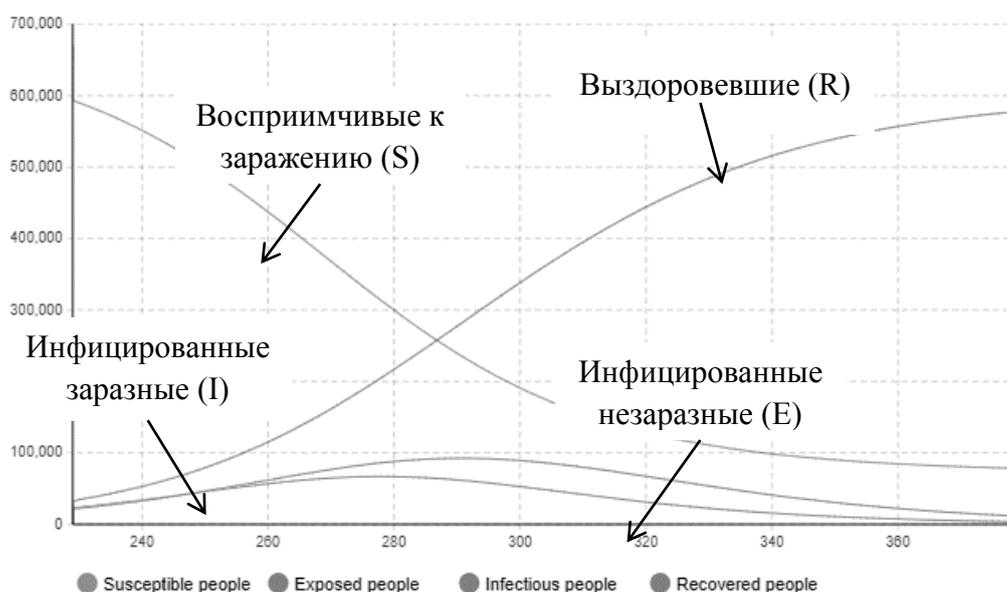


Рис. 2. Модель SEIR распространения коронавирусной инфекции в РМЭ

С помощью построенной модели можно смоделировать различные сценарии развития инфекции и оценить, как она будет быстро распространяться в разных условиях. Модель позволяет описать количество заболевших, а также предсказать как много людей нужно госпитализировать и насколько будет необходимым увеличение мощностей системы здравоохранения. Таким образом, модель SEIR является инструментом для планирования мер по борьбе с заболеванием, а также для прогнозирования эффективности этих мер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасименко, П. В. Моделирование и прогнозирование показателей динамики заболевания жителей регионов коронавирусом COVID-19 // Транспортные системы и технологии. 2020. Т. 6. № 4. С. 88-97. [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-i-prognozirovanie-pokazateley-dinamiki-zabolevaniya-zhiteley-regionov-koronavirusom-covid-19> (дата обращения: 13.03.2023).
2. Матвеев А. В. Математическое моделирование оценки эффективности мер против распространения эпидемии COVID-19 // Национальная безопасность и стратегическое планирование. 2020. № 1 (29). С. 23-39. [Электронный ресурс]. URL: <https://futurepubl.ru/ru/nauka/article/37206/view> (дата обращения: 10.04.2023).
3. Жумартова Б. О. Применение SIR модели в моделировании эпидемий // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2021. 12-2 (63). [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-sir-modeli-v-modelirovanii-epidemiy> (дата обращения: 21.05.2023).
4. Балута В. И., Осипов В. П., Сивакова Т. В. Технология комплексного моделирования эпидемиологической обстановки // Научный сервис в сети Интернет. 2020. № 22. С. 68-79. [Электронный ресурс]. URL: <http://simulation.su/uploads/files/default/2020-baluta-osipov-sivakova.pdf> (дата обращения: 19.05.2023).
5. Бездетный Н. А. Зори С. А. Методы, технологии и средства для моделирования и симуляции распространения эпидемии вируса // Программная инженерия: методы и технологии разработки информационно-вычислительных систем: сборник научных трудов III Междун. науч.-практич. конф. 2020. Т. 2. С. 11-16. [Электронный ресурс]. URL: <https://masters.donntu.ru/2021/fisp/bezdetny/library/article1.htm> (дата обращения: 13.04.2023).
6. Соколовский В. Л., Фурман Г. Б., Полянская Д. А., Фурман Е. Г. Пространственно-временное моделирование эпидемии COVID-19 // Анализ риска здоровью. 2021. № 1. С. 23-37. [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prostranstvenno-vremennoe-modelirovanie-epidemii-covid-19> (дата обращения: 20.05.2023).