

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВИРУСНЫХ ИНФЕКЦИЙ НА ОСНОВЕ АГЕНТНОГО ПОДХОДА

И. В. Лефанова¹⁾, Т. В. Смирнова¹⁾

¹⁾ Учреждение образования «Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова» Белорусского государственного университета, ул. Долгобродская, 23/1, 220070, г. Минск, Беларусь, irina.lefanova@gmail.com

В работе рассмотрены основные типы моделей распространения вирусных инфекций. Реализован агентный подход к моделированию инфекционных заболеваний. В качестве базовой модели для реализации агентного подхода была выбрана модель SIQRD, предусматривающая карантинные меры. Разработанная агентная модель позволяет учитывать соблюдение социальной дистанции особями в период распространения инфекционного заболевания, применение средств индивидуальной защиты и вакцинацию. Построены графики динамики распространения инфекционного заболевания при соблюдении карантинных мер.

Ключевые слова: имитационное моделирование; вирусные инфекции; SIQRD -модель; агентный подход; агент; дистанцирование.

MODELING THE SPREAD OF VIRAL INFECTIONS BASED ON AN AGENT-BASED APPROACH

I. Lefanova¹⁾, T. Smirnova¹⁾

¹⁾ International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, Dolgobrodskaya str., 23/1, 220070, Minsk, Belarus, irina.lefanova@gmail.com

The paper considers the main types of models for the spread of viral infections. An agent-based approach to modeling infectious diseases is implemented. The SIQRD model, which provides for quarantine measures, was chosen as the basic model for implementing the agent-based approach. The developed agent-based model allows taking into account the observance of social distance by individuals during the spread of an infectious disease, the use of personal protective equipment and vaccination. Graphs of the dynamics of the spread of an infectious disease are constructed when quarantine measures are observed.

Keywords: simulation modeling; viral infections; SIQRD -model; agent-based approach; agent; distancing.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2025-2-332-335>

Введение

Одна из важнейших задач медицинской эпидемиологии и общественного здравоохранения – контролирование ситуации возникновения очагов вирусных инфекций, путей и скорости их распространения. Решение такой задачи, тем более задачи прогнозирования распространения особо опасных инфекций, возможно на основе математического и компьютерного моделирования. Результаты моделирования позволяют понять многие механизмы распространения инфекции и важны не только для здравоохранения, но и для экономики в целом, совершенствуя средства поддержки принятия управленческих решений как для оценки текущей ситуации, так и для прогноза ее развития.

К настоящему времени сформировалось несколько подходов к моделированию распространения инфекций. Их можно разделить на классические популяционные модели, имитационные модели, и модели, основанные на анализе статистических наблюдений.

Особенности моделей распространения вирусных инфекций

1. В системной динамике используют модели, основанные на дифференциальных уравнениях, описывающих распространение инфекции в популяции. Пример такой модели – классическая SIR-модель (Susceptible, Infected, Recovered) и ее разновидности: SEIR, SIRS, SEIRD, SIQS и SIQR, SEIUR, включающие дополнительные группы индивидов. Такой подход часто используется при моделировании, поскольку он позволяет учитывать латентный период как задержку реакции системы; допускает использование неполной и неточной информации для прогнозирования. Недостатки: описывает только один пик; предполагает однородность популяции внутри одного компартмента, допускает, что для каждой группы населения выполняется непрерывное и равномерное перемешивание. Поскольку многие эмпирические коэффициенты модели были откалиброваны по устаревшим данным о миграции населения, она утратила свою адекватность. Для долгосрочного прогнозирования модель не подходит [1].

2. Для преодоления ограничений традиционных моделей применяются дискретно-событийные модели, представляющие собой некоторое множество переменных состояния модели и список запланированных событий, которые должны произойти в определенной последовательности в будущем. Каждое событие в модели – набор действий, определяющих новые значения переменных состояния. Сюда относят и «популяционные модели», отражающие простейшую структуру общества в виде «контактных групп». Недостатки такой модели – высокая погрешность из-за фиксированного шага по времени и большого количества параметров в формуле расчета вероятности заражения (достаточного контакта).

3. **Имитационное моделирование.** Наиболее гибким методом этого класса моделей являются агентные модели. Основаны на взаимодействии отдельных людей, при этом каждый индивидум (агент) в общей системе имеет собственные характеристики и поведение. Агенты взаимодействуют друг с другом и с окружающей средой по заданным правилам, создавая контактную сеть. В модель возможно включить географические и демографические данные, что позволяет учитывать перемещение агентов. В результате модель воспроизводит более точную динамику распространения инфекции. Агентные модели похожи на популяционные тем, что на основе социальной структуры моделируемой популяции формируются контактные группы, между которыми перемещаются агенты, и которые могут вступить в достаточный контакт. Основное отличие агентных моделей в том, что здесь шаг по времени не фиксирован, а момент времени, в который происходит достаточный контакт, определяется самим агентом.

Область применения агентных моделей – оценка эффективности различных мер по контролю за распространением инфекции (вакцинация, карантинные меры и социальное дистанцирование).

4. **Модели на основе данных:** Эти модели используют реальные данные о распространении инфекции для создания более точных прогнозов. Они включают статистические методы и машинное обучение для анализа данных и прогнозирования тенденций.

5. Прогнозирование распространения инфекции в условиях ограничительных мер по социальному взаимодействию населения успешно реализуется с использованием **искусственных нейронных сетей** (ИНН). При использовании ИНН для прогнозирования распространения инфекции важно подобрать алгоритм обучения. Так, в работе [2] продемонстрированы преимущества алгоритма Nadam перед традиционными методами Adam, Adagrad по точности результатов.

Агентный подход к моделированию

Для агентного моделирования будем использовать модель SIQRD (восприимчивый, инфицированный, карантинный, выздоровевший, умерший), использующую пять переменных, а именно $S(t)$ – это количество восприимчивых особей, $I(t)$ – количество инфицированных особей, $Q(t)$ – число особей, находящихся в карантине, $R(t)$ – это количество выздоровевших особей $D(t)$ – количество умерших особей.

При разработке модели учитываем процент особей соблюдающих дистанцирование, процент особей, применяющих индивидуальные средства защиты (маски).

Смоделируем следующую ситуацию: 10 симуляций, каждая из которых отслеживает 250 агентов в течение 250 дней в мире 25 x 25 со следующими начальными условиями: 5 инфицированных агентов (I), остальные восприимчивы (S), 0 % агентов носят маски, 0 % агентов соблюдают физическую дистанцию, 0 % агентов вакцинированы и построим график распространения заболевания (рис.1)

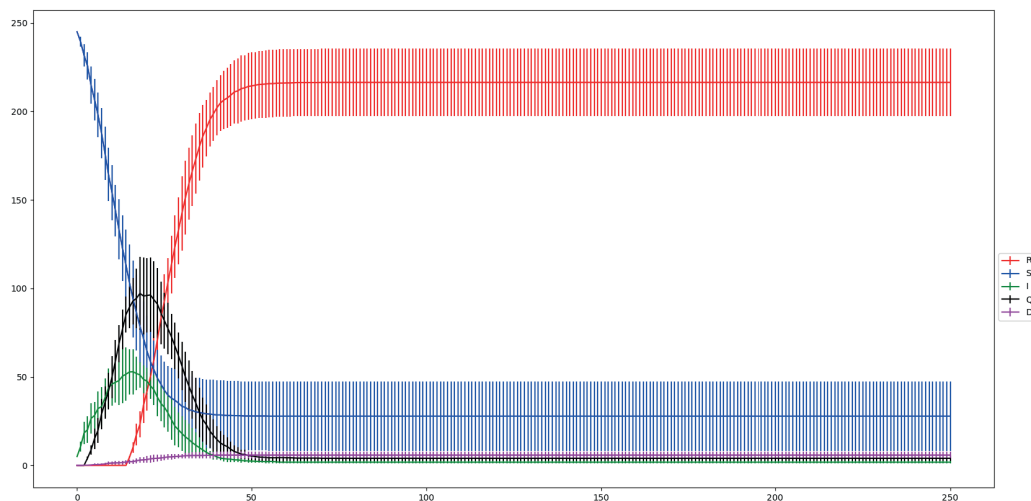


Рис. 1. Динамика распространения при отсутствии мер защиты

Рассмотрим ситуацию, при которой некоторый процент агентов использует маски и соблюдает физическую дистанцию: 25 % носят маски, 25 % соблюдают физическую дистанцию, остальные входные данные неизменны (рис. 2)

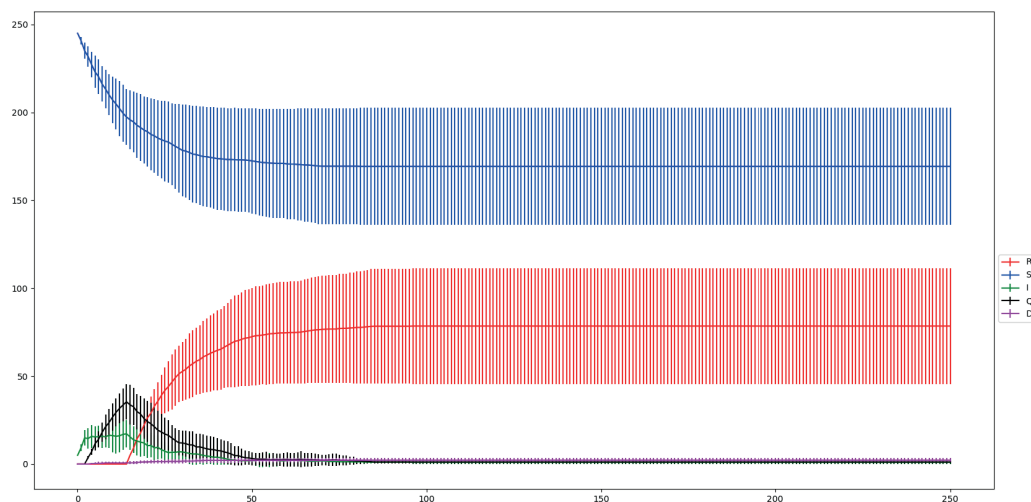


Рис.2. Динамика распространения при частичном дистанцировании (25 %) и частичном применении средств индивидуальной защиты (25 %)

Введем вакцинированных агентов и смоделируем следующую ситуацию: 10 симуляций, каждая из которых отслеживает 250 агентов в течение 250 дней в мире 25 x 25 со следующими начальными условиями: 5 инфицированных агентов (I), остальные восприимчивы (S), 0 % агентов носят маски, 0 % агентов соблюдают физическую дистанцию, 25 % агентов вакцинированы и построим график распространения заболевания

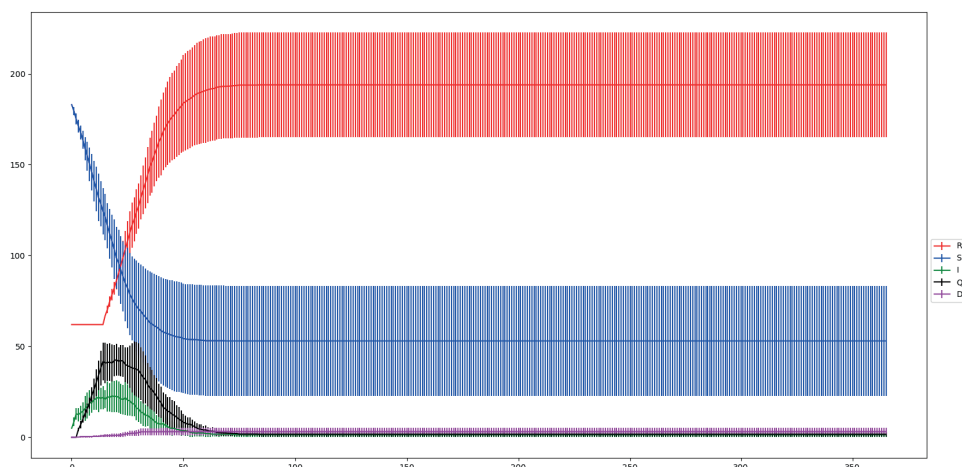


Рис.3. Динамика распространения при частичном (25 %) вакцинировании, при условии эффективности вакцины не менее 50 %

Следующая ситуация: 10 симуляций, каждая из которых отслеживает 250 агентов в течение 250 дней в мире 25 x 25 со следующими начальными условиями: 5 инфицированных агентов (I), остальные восприимчивы (S), 25 % агентов носят маски, 25 % агентов соблюдают физическую дистанцию, 25 % агентов вакцинированы и построим график распространения заболевания

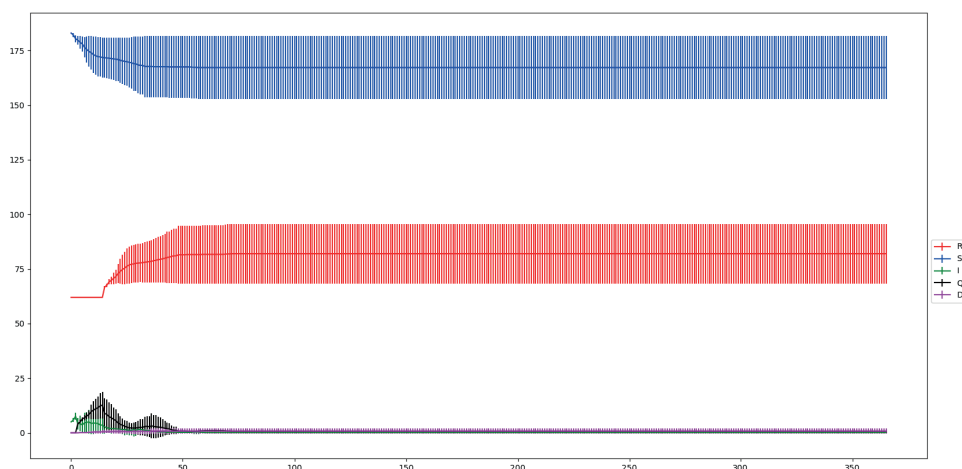


Рис. 4. Динамика распространения при частичном дистанцировании (25 %), частичном вакцинировании (25 %) и частичном применении средства индивидуальной защиты (25 %)

Заключение

В работе проведен анализ эпидемиологических моделей, рассмотрена модель SIQRD. Описан принцип построения эпидемиологической модели на основе агентного моделирования. Проведен сравнительный анализ данных подходов и выявлено, что агентный подход позволяет более точно и гибко настраивать эпидемиологическую модель, учитывая ряд дополнительных условий.

Библиографические ссылки

1. Акимов, В. А., Бедило, М. В., Иванова, Е. О. "Civil SecurityTechnology", 2022, (Математические модели эпидемий и пандемий как источников чрезвычайных ситуаций биологосоциального характера Civil Security Technology, Vol. 19, 2022, No. 3(73))
2. Dimou, A., Maragakis, M., Argyrakis, P. A network SIRX model for the spreading of COVID-19// Physica A: Statistical Mechanics and its Applications.- 2022.-№ 590 (126746).