

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»**

ОТЧЕТ

по экзаменационной работе
по дисциплине: «Имитационное моделирование»

Выполнили: *студенты группы Б22-901*

Мишинёв В.П., Соколова А. И.

(подпись)

(Фамилия И.О.)

Проверил:

Смирнов Д. С.

(оценка)

(подпись)

(Фамилия И.О.)

Москва 2025 г

Оглавление

Введение.....	3
Анализ предметной области.....	4
Концептуальное моделирование.....	9
Компьютерная реализация.....	11
Тестирование и результаты применения модели.....	15
Заключение.....	20

Введение

Имитационное моделирование играет важную роль в анализе и прогнозировании сложных динамических систем, таких как эпидемические процессы. Одной из наиболее распространённых моделей для изучения распространения инфекционных заболеваний является SEIRSD-модель, которая учитывает четыре ключевых состояния: восприимчивость (Susceptible), инкубационный период (Exposed), инфекционность (Infectious) и выздоровление (Recovered).

Целью данной работы является построение SEIRSD-модели в программной среде AnyLogic для анализа сценариев распространения эпидемии COVID-19. Несмотря на завершение активной фазы пандемии, исследование сохраняет свою актуальность, поскольку полученные данные и подходы могут быть применены для моделирования будущих эпидемий, оценки рисков и разработки стратегий управления.

В рамках работы были исследованы различные сценарии введения ограничительных мер (например, карантина, социальной дистанции) и их влияние на динамику эпидемии. Также была проведена оценка возможных сроков завершения эпидемии при различных уровнях вмешательства, что позволяет проанализировать эффективность применяемых стратегий.

Представленное исследование демонстрирует не только возможность построения и применения SEISD-модели, но и ее практическую значимость для разработки эффективных мер управления эпидемиями.

Анализ предметной области

Описание предметной области

Модель SEIRSD (Susceptible, Exposed, Infectious, Recovered, Deceased) предназначена для изучения распространения инфекционного заболевания в популяции. Она учитывает влияние различных факторов, таких как вероятность заражения, переходы между состояниями и ограничения контактов. Основная цель модели заключается в понимании динамики эпидемии и разработке сценариев для оценки эффективности различных ограничительных мер.

Состояния популяции включают восприимчивых (S), инфицированных на этапе инкубационного периода (E), инфицированных (Ia), инфицированных в тяжелом состоянии (Is), выздоровевших (R), которые частично сохраняют восприимчивость, и умерших (D).

Потоки представляют собой переходы между этими состояниями: заражение восприимчивых, переход в активное инфекционное состояние, ухудшение состояния пациента, выздоровление, летальный исход и возможное повторное инфицирование. Математически переходы между состояниями описываются системой дифференциальных уравнений.

$$dS/dt = -\beta SE/N + \rho R$$

$$dE/dt = \beta SE/N - \sigma E$$

$$dIa/dt = \sigma E - \gamma a Ia - \kappa Ia$$

$$dIs/dt = \kappa Ia - \gamma s Is - \mu Is$$

$$dR/dt = \gamma a Ia + \gamma s Is - \rho R$$

$$dD/dt = \mu Is$$

Таким образом, данная системная динамическая симуляция предоставляет возможности для обоснованной оценки последствий и эффективности различных стратегий контроля эпидемии.

Статистический анализ важнейших показателей

Статистический анализ важнейших показателей, таких как численные значения коэффициентов дифференциальных уравнений, описывающих обозначенные состояния, играют ключевую роль в оптимизации процессов протекания инфекционного заболевания.

В модели используются следующие коэффициенты, которые также являются ключевыми параметрами для анализа:

- β определяет вероятность передачи инфекции при контакте между восприимчивым (S) и инфицированным (Ia или Is).

Изменение β показывает, как вариация уровня контактов или мер профилактики (например, ношение масок, социальное дистанцирование) влияет на динамику эпидемии. Уменьшение β можно интерпретировать как введение ограничительных мер, а рост — как их ослабление.

- σ определяет скорость перехода из состояния Exposed (E) в Infectious (Ia). Обратно пропорционален длительности инкубационного периода.

Значение σ должно соответствовать эпидемиологическим данным (например, средний инкубационный период для COVID-19 составляет 8,2 дня). Изменение σ позволяет исследовать влияние более быстрых (или медленных) инкубационных периодов на динамику эпидемии. Быстрый переход к Ia при высоком σ приводит к резкому росту числа заражений, что может перегрузить систему здравоохранения.

- γ_a : Скорость выздоровления из состояния I_a (активное, легкое течение).
- γ_s : Скорость выздоровления из состояния I_s (тяжелое течение).

Эти параметры обратно пропорциональны среднему времени выздоровления.

Показатели γ_a и γ_s можно использовать для оценки различий в длительности болезни между легкими и тяжелыми случаями. Замедление выздоровления (уменьшение γ) увеличивает длительность эпидемии и нагрузку на систему здравоохранения. Реалистичные значения γ важны для точного прогноза тяжести эпидемии.

- μ : Вероятность летального исхода из состояния I_s .

Вариации μ позволяют оценить влияние разных уровней медицинской помощи на смертность. Реалистичные значения коэффициента важны для точной оценки летальности в разных условиях.

- ρ определяет вероятность возвращения выздоровевших (R) обратно в состояние S (восприимчивые). Обычно это низкое значение, отражающее неполный иммунитет.

Позволяет исследовать сценарии повторных волн эпидемии при частичной потере иммунитета. Увеличение ρ показывает, как более короткий иммунитет может влиять на продолжительность эпидемии. Учет повторного инфицирования важен для долгосрочного прогнозирования и планирования.

Моделируемые бизнес-процессы

Бизнес-процесс заболевания в контексте модели можно описать как последовательность этапов, через которые проходит индивид от начального состояния восприимчивости до одного из конечных состояний, таких как выздоровление, смерть или повторное инфицирование. Этот процесс включает в себя несколько важных этапов.

Начальное состояние восприимчивости характеризуется тем, что индивид изначально уязвим для вируса и может быть инфицирован при контакте с зараженными людьми. Основные параметры на этом этапе включают коэффициент заражения, который выражает вероятность передачи вируса, и контактную активность, показывающую частоту взаимодействий индивида с другими.

Следующий этап — это инкубационный (E), где индивид уже инфицирован, но пока не проявляет симптомов, но является заразным. Этот период моделирует латентную стадию инфекции со средним временем действия. В это время происходит накопление индивидов, которые в скором времени станут переносчиками инфекции.

Когда индивид переходит в состояние инфекционности в легкой форме (Ia), он начинает проявлять симптомы и переходит в стадию активного заболевания. Основные параметры здесь — это вероятность перехода в тяжелую форму и средняя длительность инфекционного состояния.

В тяжелой форме заболевания (Is) индивид испытывает сильные симптомы и нуждается в медицинском вмешательстве. Здесь важны вероятность выздоровления и шанс летального исхода. Это состояние создает значительную нагрузку на систему здравоохранения, так как возможен либо выздоровление, либо смертельный исход для пациента.

Состояние выздоровления (R) означает, что индивид выздоровел и приобрел временный иммунитет. Несмотря на это, существует небольшая вероятность повторного заражения. Основные процессы, происходящие в этом состоянии, включают возврат в начальное состояние восприимчивости с малой вероятностью.

Наконец, состояние смерти (D) наступает, если индивид умирает вследствие тяжелого течения болезни. Основным параметр здесь — это коэффициент смертности, и ключевым процессом является уменьшение популяции, что снижает нагрузку на здравоохранение после гибели пациента.

Таким образом, бизнес-процесс заболевания служит основой для принятия управленческих решений в сфере здравоохранения, эффективного планирования ресурсов и оценки воздействия различных мер противостояния эпидемии.

Постановка задачи моделирования

Целевым критерием является способность имитационной модели выявлять важнейшие показатели при распространении эпидемии, такие как: количество умерших, количество инфицированных и временной диапазон эпидемии.

Концептуальное моделирование

Тип модели – динамическая система .

Основные сущности модели SEIRSD
(Susceptible–Exposed–Infected–Removed–Susceptible–Deceased model):

- **Susceptible (S)** — потенциально восприимчивый к заражению.
- **Exposed (E)** — заражённый, находящийся в инкубационном периоде, активно распространяет вирус.
- **Infected (I)** — инфицированный: легкое протекание заболевания (I active) и протекание, требующее госпитализации (I severe).
- **Removed (R)** — выздоровевший, имеет небольшой шанс повторно перейти в категорию “восприимчивый”.
- **Dead (D)** — умерший в результате заболевания

Восприимчивый к заражению заражается. Заражённый способен передать вирус другому. Инфицированный может болеть или умереть, а также стать выздоровевшим. Выздоровевший человек может стать инфицированным повторно.

Факторы, влияющие на модель:

1. Population - население города
2. MeanNumberOfContact - среднее количество контактов человека с другими людьми в день
3. ChanceOfDisease - шанс заразиться
4. ChanceOfDiseaseAgain - шанс заразиться повторно
5. InfectionPeriod - средний инкубационный период, в течение которого человек уже заразен
6. PropStronglySick - доля сильно заболевших людей
7. ChanceOfDeath - шанс смерти
8. MeanSickTime - средняя продолжительность заболевания
9. MeanHospitalTime - средняя продолжительность лечения в больнице

Концептуальная модель данного проекта:

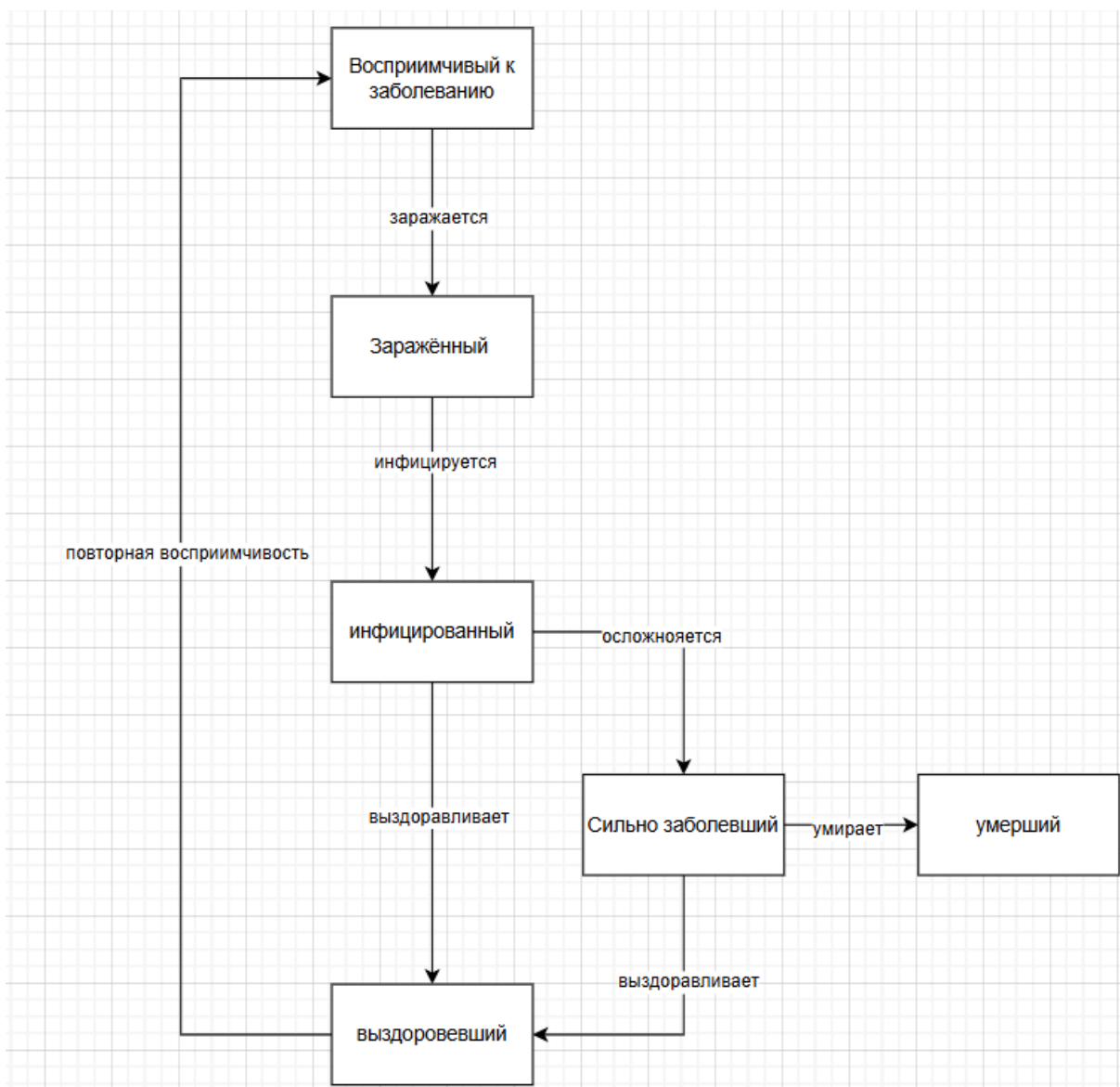




Рисунок 1, концептуальная модель


Компьютерная реализация


Основные элементы построения модели

Для выполнения данной экзаменационной работы нам понадобятся следующие элементы системной динамики, а именно:

 **Параметр** Параметр. Параметр обычно используется для задания статических характеристик модели и обычно хранит одно и то же значение в течение всего "прогона" модели

 **Накопитель** Накопитель. В системной динамике накопители используются для представления таких объектов реального мира, в которых сосредотачиваются некоторые ресурсы — это могут быть деньги, вещества, численности (определенных категорий) людей, какие-то материальные объекты и т.п. Накопители задают статическое состояние моделируемой системы.

 **Поток** Поток. Если накопители задают статическое состояние моделируемой системы, то потоки задают динамику системы. Значения накопителей изменяются с течением времени именно согласно существующим в системе потокам. Входящие в накопитель потоки увеличивают значение накопителя, а исходящие из него потоки, соответственно, его уменьшают.

 **Связь** Связь. Связь используется для задания зависимости между элементами диаграммы потоков и накопителей. Есть два типа зависимостей:

1. Какой-то элемент системной динамики (это может быть накопитель, поток, вспомогательная переменная или параметр) упоминается в формуле потока или вспомогательной переменной. Такой тип связи изображается сплошной линией
2. Какой-то элемент системной динамики упоминается в выражении начального значения накопителя. Этот тип связи отображается пунктирной линией

Реализация SEIRSD- модели в среде компьютерного моделирования AnyLogic

В основе данной имитационной модели лежит SEIRSD-модель, основой которой в свою очередь является SIR-модель, которая классифицирует людей на восприимчивых, инфицированных и излеченных, руководствуясь дифференциальными уравнениями и основными предположениями. Впервые она была предложена и впервые описана в 1927 году шотландскими учеными Уильямом Огостином Кермаком (William Ogilvy Kermack) и Андерсоном Греем МакКендриком (Anderson Gray McKendrick). Эта модель является одной из первых и наиболее известных эпидемиологических моделей.

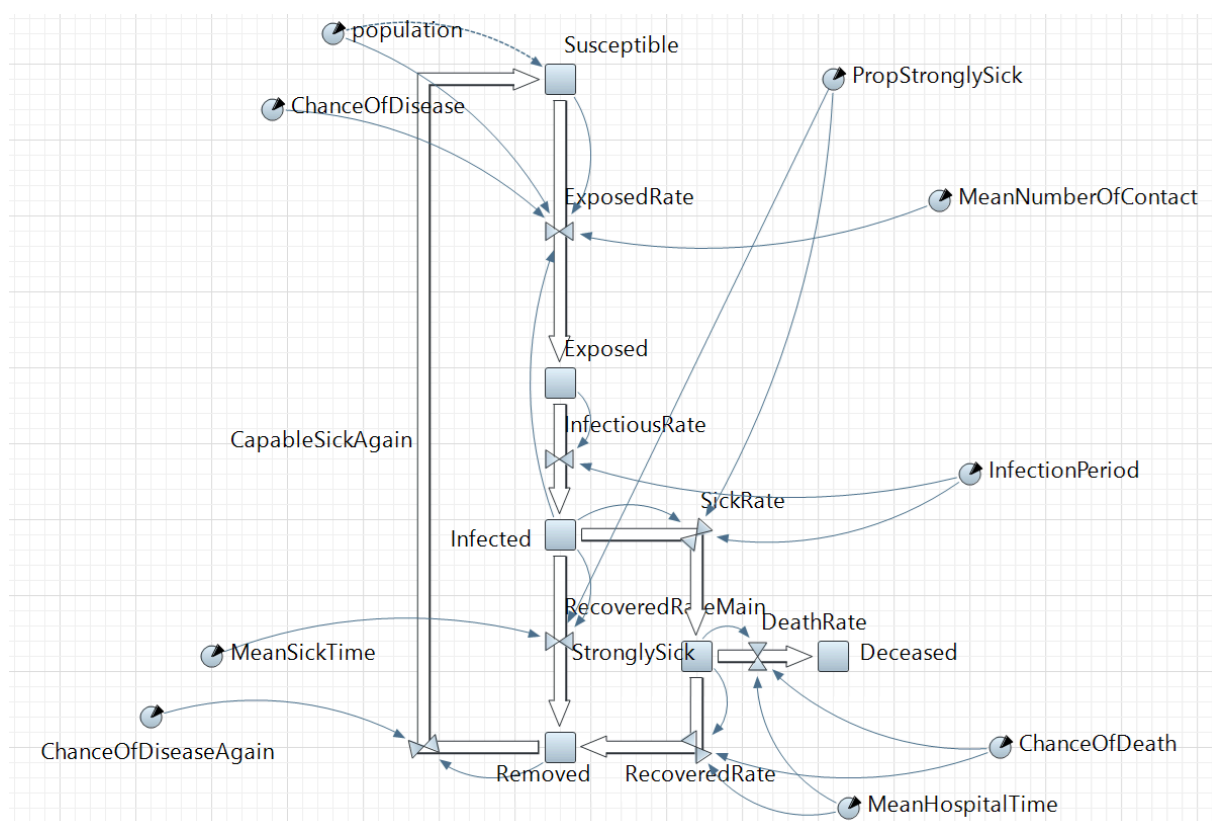


Рисунок 2, имитационная модель в AnyLogic

Следует упомянуть о значениях параметров, которые влияют на модель. Сами значения взяты из открытых источников и являются величинами, соответствующими сложившейся в 2020 году ситуации с Covid-19:

1. **Population:** Население города Москва.

Значение: 12 680 000 (на 2020).

2. **MeanNumberOfContact**: Среднее количество контактов человека с другими людьми в день.
Значение: 1-10 (Зависит от введенных ограничений).
3. **ChanceOfDisease**: Шанс заразиться (доля).
Значение: 0.01–0.2 (Зависит от введенных ограничений).
4. **ChanceOfDiseaseAgain**: Шанс заразиться повторно (доля).
Значение: 0.001.
5. **InfectionPeriod**: Средний инкубационный период, в течение которого человек уже заразен (дни).
Значение: 8.2.
6. **PropStronglySick**: Доля сильно заболевших людей (доля).
Значение: 0.15.
7. **ChanceOfDeath**: Шанс смерти (доля).
Значение: 0.017.
8. **MeanSickTime**: Средняя продолжительность заболевания (дни).
Значение: 10.
9. **MeanHospitalTime**: Средняя продолжительность лечения в больнице (дни).
Значение: 14.

Для объяснения работы данной имитационной модели следует предоставить используемые формулы, по которым изменяются значения накопителей.

Сами накопители изменяются тривиально, если поток входит, то значение прибавляется, если выходит, то вычитается. Например, формула для накопителя Susceptible:

$$\frac{d\text{Susceptible}(t)}{dt} = \text{CapableSickAgain} - \text{ExposedRate}$$

Аналогично для остальных накопителей. Более интересными и значимыми являются математические выражения для потоков. Формулы взяты из научных работ, указанных в литературе.

Для потока от восприимчивых к зараженным следующая формула:

$$ExposedRate = \frac{Susceptible \cdot Exposed \cdot MeanNumberOfContact \cdot ChanceOfDisease}{Population}$$

Поток от заражённых к инфицированным:

$$InfectiousRate = \frac{Exposed}{InfectionPeriod}$$

Поток от инфицированных к здоровым:

$$RecoveredRateMain = \frac{(1 - PropStronglySick) \cdot Infected}{MeanSickTime}$$

Поток от инфицированных к сильно заболевшим:

$$SickRate = \frac{Infected \cdot PropStronglySick}{MeanSickTime}$$

Поток от сильно заболевших к умершим:

$$DeathRate = \frac{ChanceOfDeath \cdot StronglySick}{MeanHospitalTime}$$

Поток от сильно заболевших к здоровым:

$$RecoveredRate = \frac{(1 - ChanceOfDeath) \cdot StronglySick}{MeanHospitalTime}$$

Поток от здоровых к восприимчивым:

$$CapableSickAgain = Removed \cdot ChanceOfDiseaseAgain$$

Тестирование и результаты применения модели

Дизайн экспериментов

Дизайн эксперимента в AnyLogic направлен на моделирование процесса распространения коронавируса в Москве в марте 2020 года, на пике эпидемии, с целью оценки влияния различных ограничительных мер на ключевые эпидемиологические показатели: максимальное число зараженных (суммарно $I_a + I_s$), общее число погибших (D) и длительность эпидемии до ее спада (когда число активных случаев падает ниже 1% от населения).

Для эксперимента используются исходные данные, соответствующие реальной эпидемиологической ситуации. Население Москвы составляет около 12.6 миллионов человек. Инкубационный период составляет 8.2 дней, а средняя длительность болезни – 10 дней. Параметры вероятность заражения (β - `ChanceOfDisease`) и среднее число контактов (`MeanNumberOfContact`) настраиваются вручную для каждого сценария. Летальность (μ - `ChanceOfDeath`) фиксируется на уровне 0.017.

В рамках эксперимента рассматриваются три сценария ограничительных мер, которые моделируются вручную изменением вышеописанных параметров.

Первый сценарий моделирует отсутствие ограничений, где среднее число контактов остается на уровне 7, вероятность заболеть - 0.18. Во втором сценарии учитываются умеренные ограничения, сокращающие число контактов до 5 и вероятность заражения до 0.15. Третий сценарий предполагает полный локдаун с сокращением контактов до 2.5, а шанс заражения до 0.1.

В каждом сценарии рассчитываются следующие показатели: максимальное число зараженных (вычисляется как максимум суммы $I_a + I_s$), общее число

погибших (значение накопителя D на конец симуляции) и длительность эпидемии (время, когда активные случаи уменьшаются до менее чем 1% от общего населения).

Результаты моделирования визуализируются через графики, отображающие динамику заражённых, восприимчивых, восстановившихся после болезни (S, I, R), а также числа погибших (D).

Результат эксперимента

Сценарий 1. Нет никаких ограничений

В данном случае значение среднего количества контактов человека с другими людьми в день (MeanNumberOfContact) составляет 7, а вероятность заражения при одном контакте (ChanceOfDisease) равна 0,18.

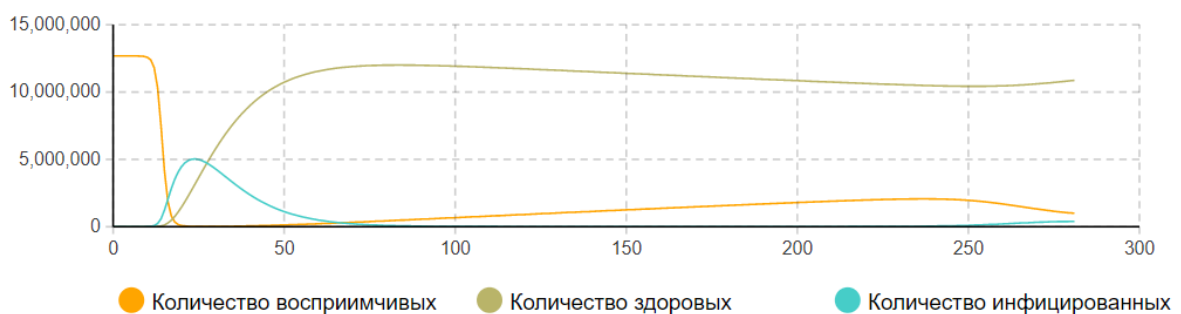


График 1, распределение основных групп SIERSD-модели в сценарии 1

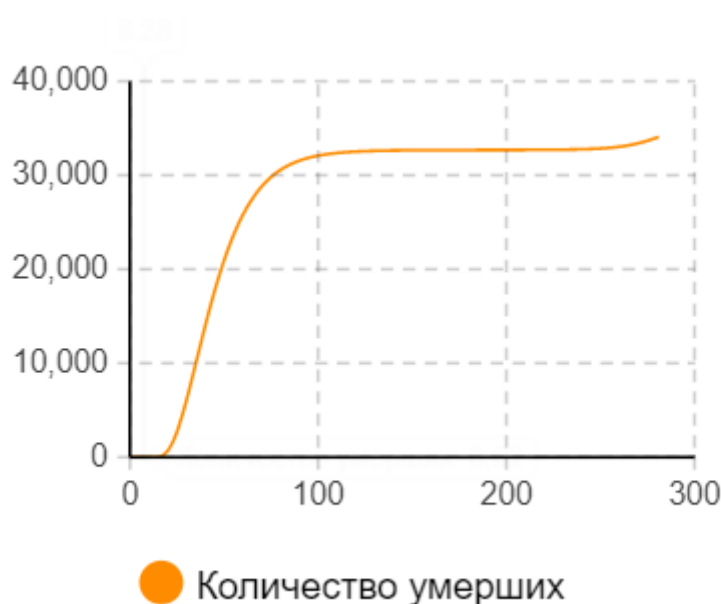


График 2, количество умерших в сценарии 1

Пик количества инфицированных был около 5 млн. человек. Пик заболеваемости произошел спустя 30 дней после начала эпидемии, а количество погибших составило порядка 32.500 человек.

Очевидно, что такой сценарий изначально был маловероятен, поскольку в любом случае были бы введены определённые ограничительные меры. Полученные результаты наглядно демонстрируют потенциальную опасность распространения эпидемии, а также подчеркивают необходимость применения подобных мер в той или иной степени.

Сценарий 2. Мягкие ограничительные меры

Были приостановлены занятия в образовательных учреждениях, отменены массовые мероприятия с участием более 50 человек, а людям старшего поколения (старше 65 лет) рекомендовано оставаться дома.

В данном случае значение среднего количества контактов человека с другими людьми в день ($\text{MeanNumberOfContact}$) составляет 5, а

вероятность заражения при одном контакте (ChanceOfDisease) равна 0,15.

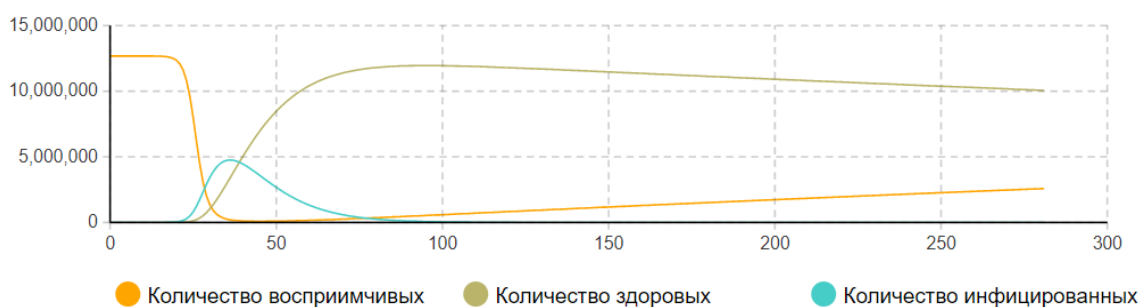


График 3, распределение основных групп SIERSD-модели в сценарии 2



График 4, количество умерших в сценарии 2

Пик количества инфицированных был около 4,7 млн. человек. Пик заболеваемости произошел спустя 36 дней после начала эпидемии, а количество погибших составило порядка 32.500 человек.

Сценарий 3. Жесткие ограничительные меры

Введены ограничительные меры, предписывающие всем гражданам оставаться дома, за исключением работников критически важных сфер, таких как обеспечение жизнедеятельности, правоохранительные органы и государственные структуры. Бизнесу рекомендовано перевести свою деятельность в онлайн-режим, если это возможно.

В данном случае значение среднего количества контактов человека с другими людьми в день (MeanNumberOfContact) составляет 2.5, а вероятность заражения при одном контакте (ChanceOfDisease) равна 0,102.

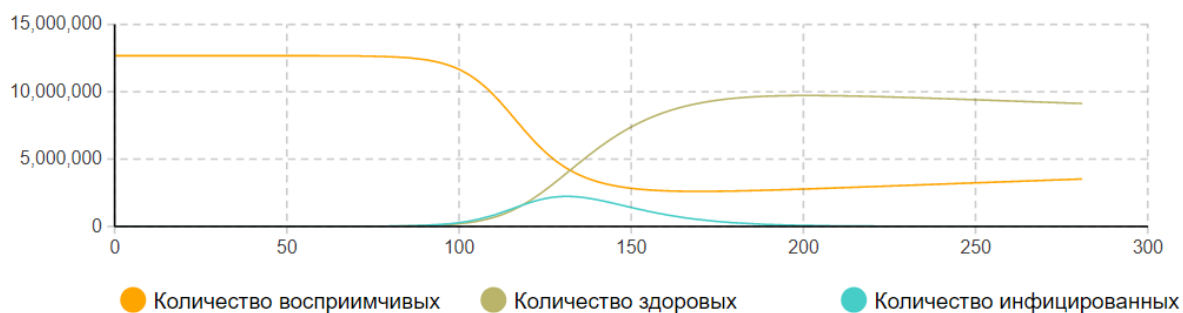


График 5, распределение основных групп SIERSD-модели в сценарии 3



График 6, количество умерших в сценарии 3

Пик количества инфицированных был около 2,2 млн. человек. Пик заболеваемости произошел спустя 130 дней после начала эпидемии, а количество погибших составило порядка 26.800 человек.

Заключение

Анализ проведенных экспериментов показывает, что введение ограничительных мер оказывает значительное влияние на динамику эпидемии, включая уровень пикового числа инфицированных, срок достижения пика заболеваемости и общее количество погибших.

При отсутствии каких-либо ограничений (сценарий 1) эпидемия развивается максимально быстро и агрессивно. Данный сценарий демонстрирует наибольшую скорость распространения эпидемии и наиболее тяжелые последствия для системы здравоохранения. При введении мягких ограничительных мер (сценарий 2), включающих отмену массовых мероприятий, приостановку занятий в образовательных учреждениях и рекомендации для старшего поколения оставаться дома, динамика эпидемии замедляется. Мягкие меры позволяют лишь незначительно разгрузить систему здравоохранения и слабо влияют на смертность. Наиболее эффективным оказывается сценарий жестких ограничительных мер (сценарий 3), предполагающий практически полное прекращение социальных контактов, за исключением работников критически важных сфер. Пик наступает спустя 130 дней после начала эпидемии, что значительно дольше по сравнению с предыдущими сценариями. Кроме того, количество погибших снижается до 26 800 человек, что отражает эффективность таких мер в предотвращении летальных исходов.

Таким образом, результаты экспериментов подтверждают высокую значимость ограничительных мер в управлении эпидемией. Мягкие меры оказываются недостаточными для существенного снижения нагрузки на систему здравоохранения и сокращения смертности, тогда как жесткие меры эффективно замедляют распространение инфекции, уменьшают количество инфицированных на пике и спасают жизни. Данные выводы

подчеркивают необходимость своевременного и продуманного применения ограничений для минимизации последствий эпидемии.

Результаты эксперимента внесены в таблицу 1.

Таблица 1. Результаты эксперимента с применением разных сценариев ограничительных мер.

	Сценарий 1	Сценарий 2	Сценарий 3
Число инфицированных	5 млн	4.7 млн	2.2 млн
Число погибших	32 500	32 500	26 800
Ожидаемый срок конца эпидемии	30	36	130

Таблица 1, итоговые данные при моделировании трёх различных сценариев

Литература

1. Режим самоизоляции ввели в Москве из-за коронавируса. RBC. URL: <https://www.rbc.ru/society/22/03/2020/5e76c7779a79478f54be0b1b>.
2. Доля пожилых россиян с коронавирусом в критическом состоянии выросла до 28%. RBC. URL: <https://www.rbc.ru/society/28/01/2022/61f419dd9a79479898e05026>
3. Cowling B.J., Ali S.T., Ng T.W.Y., et al. Impact assessment of non-pharmaceutical interventions against coronavirus disease 2019 and influenza in Hong Kong: an observational study. *The Lancet Public Health*. 2020;5(5):e279-e288. DOI: 10.1016/S2468-2667(20)30090-6. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7359536/>.
4. Население Москвы сократилось впервые с 1992 года. Forbes. URL: <https://www.forbes.ru/obshchestvo/420511-naselenie-moskvy-sokratilos-v-pervye-s-1992-goda>.
5. Вадим Чуприн. COVID-19. Анализ распространения и математическое моделирование пандемии. Habr. URL: <https://habr.com/ru/articles/500348/>.
6. Yang J., Zheng Y., Gou X., et al. Prevalence of comorbidities in the novel Wuhan coronavirus (COVID-19) infection: a systematic review and meta-analysis. *International Journal of Infectious Diseases*. 2020;94:91–95. DOI: 10.1016/j.ijid.2020.03.017. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9011870/>.
7. Shang W., Yang Y., Rao Y., Rao X. The outbreak of SARS-CoV-2 pneumonia calls for viral vaccines. *npj Vaccines*. 2020;5:18. DOI: 10.1038/s41541-020-0170-0. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7722950/>.