

МАТВЕЕВ АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕР ПРОТИВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭПИДЕМИИ COVID-19

АННОТАЦИЯ

В статье представлена модифицированная имитационная SEIR-модель распространения эпидемии. Предложенная модель реализована в системе AnyLogic. Данная модель позволяет провести оценку ограничительных мероприятий, направленных на снижение роста эпидемии. Представлены результаты расчетов по четырем основным сценариям: 1) Без ограничительных мероприятий; 2) При мягких ограничительных мерах; 3) В условиях жестких ограничительных мер, но носящих рекомендательный характер; 4) При введении полного карантина и объявлении чрезвычайной ситуации. Результаты позволяют спрогнозировать примерные даты пика эпидемии, окончания эпидемии, количество умерших и нагрузку на систему здравоохранения при каждом из сценариев для двух городов (Москва и Санкт-Петербург).

Ключевые слова: эпидемия; имитационное моделирование; модель; AnyLogic; COVID-19; сценарии развития; управленческие решения; ограничительные мероприятия; чрезвычайная ситуация.

МАТВЕЕВ А. В.

THE MATHEMATICAL MODELING OF THE EFFECTIVE MEASURES AGAINST THE COVID-19 SPREAD

ABSTRACT

The article is presented a modified simulation SEIR-model of the epidemic spread. The proposed model is created in the AnyLogic System. This model allows to estimate the restricting measures are aimed at reducing the growth of the epidemic. The calculation results are presented in four main scenarios: 1) Without restrictive measures; 2) With lite restrictive measures; 3) In the conditions of hard restrictive measures with recommended character; 4) The conditions of full quarantine and the announcement of an emergency situation. The results allow us to predict the approximate dates of the epidemic peak, the end of the epidemic, the number of deaths and the load on the health system in each of the scenarios for two cities (Moscow and St. Petersburg).

Keywords: epidemic; simulation modeling; model; AnyLogic; COVID-19; development scenarios; management decisions; restrictive measures; emergency.

Введение

В настоящее время в условиях эпидемии в результате распространения коронавируса SARS-Cov-2 (COVID-19) и де-факто наступившей биолого-социальной чрезвычайной ситуации стоит задача прогнозирования размеров потенциального социального ущерба, сроков пика и окончания распространения эпидемии, а также оценки эффективности возможных управленческих решений, направленных на предотвращение распространения эпидемии.

На помощь в этом случае могут прийти математические модели, описывающие данные процессы. И к настоящему времени существует несколько

подходов к моделированию распространения эпидемии, которые могут быть использованы для анализа протекающих процессов и сравнения альтернативных путей развития в зависимости от принятых управленческих решений.

Анализ моделей

Самой простейшей является **SIR-модель** (*Susceptible-Infected-Removed* model), в которой каждый из индивидуумов, входящих в исследуемую популяцию, может находиться в одном из трех возможных состояний: *Susceptible* (потенциально восприимчивый к заражению), *Infected* (инфицированный), *Removed* (выздоровевший и

невосприимчивый к заражению). Предполагается, что индивидуумы могут стать невосприимчивыми к заражению только после полного извлечения от инфекции, т.е. в какие-то моменты времени для каждого возможна последовательность переходов *Susceptible* → *Infected* → *Removed*.

Основными базовыми предположениями при использовании данной модели являются следующие:

- каждый из восприимчивых индивидуумов, контактирующий с инфицированным, имеет определенную вероятность заражения, независящую от времени;
- скорость заражения пропорциональна количеству инфицированных индивидуумов, а также количеству восприимчивых (действительно, чем больше у инфицированных среди всех их контактов людей восприимчивых к заражению, тем будет выше скорость заражения, но конечно при неизменном среднем количестве контактов среди всей исследуемой популяции).
- каждый инфицированный, в свою очередь, имеет постоянную вероятность выздоровления в единицу времени;
- скорость выздоровлений пропорциональна количеству инфицированных.

Если в какой-то период времени скорость заражения оказывается выше скорости выздоровлений, это означает, что данный период характеризуется распространением эпидемии. В противном случае, можно будет говорить о том, что эпидемия затухает.

В целом, *SIR-модель* может позволить, по крайней мере, в первом приближении оценить примерную динамику распространения эпидемии. Но реальный процесс протекания болезней несколько сложнее, необходимо учитывать при моделировании еще ряд факторов. В первую очередь это касается того, что процесс заболевания может состоять как минимум из двух стадий: инкубационный период (без внешних признаков заболевания) и непосредственно период болезни (с наличием внешних признаков заболевания и возможной при этом изоляции инфицированного индивидуума). Кроме того, заболевание каждого индивидуума может протекать в различных формах: в легкой (когда индивидуум может переносить болезнь в домашних условиях), в средней (с возможной необходимостью госпитализации) и

в тяжелой (на примере COVID-19 болезнь может перейти в коронавирусную пневмонию с необходимостью перевода пациентов в реанимационное отделение и применения аппаратов искусственной вентиляции легких).

Учесть первый из данных факторов позволяет *SEIR-модель* (*Susceptible–Exposed–Infected–Removed model*), являющаяся некоторой модификацией *SIR-модели*. В данной модели каждый индивидуум может находиться уже в одном из четырех возможных состояний. К трем рассмотренным состояниям в *SIR-модели* добавляется еще одно *Exposed* (зараженный, находящийся в инкубационном периоде). В какие-то моменты времени для каждого возможна последовательность переходов *Susceptible* → *Exposed* → *Infected* → *Removed*.

Реализовать данную модель можно как с применением аналитического (с составлением системы дифференциальных уравнений), так и имитационного моделирования. С учетом того, что требуется рассмотрение различных сценариев, в которых могут учитываться определенные внешние воздействия на систему, отражающие какие-то профилактические или ограничительные мероприятия, некоторые из параметров данной системы (например, частота социальных контактов) будут нестационарными. Кроме того, анализ распространения и тяжести протекания болезни при COVID-19 за прошедший период, предполагает необходимость разделения всей исследуемой популяции на некоторые возрастные категории, т.к. по большей части у молодого населения болезнь протекала в легкой стадии. В то же время, у старшего населения очень часто болезнь протекала в тяжелой форме и заканчивалась зачастую летальным исходом.

Данные обстоятельства значительно усложняют построение аналитической модели и для реализации был выбран метод имитационного моделирования.

Имитационная модель

Предлагаемая имитационная модель разработана в среде AnyLogic и основана на *SEIR-модели*, но определенным образом модифицирована с учетом некоторых особенностей, присущих именно эпидемии COVID-19:

1. Инкубационный период был разделен на две фазы, поэтому состояние *Exposed* было раз-

делено на два других. В первой фазе (латентный период) индивидум уже является носителем инфекции, но отсутствуют внешние проявления инфекции, и индивидум не опасен для окружающих, т.е. отсутствует потенциальная способность к их заражению. Во второй фазе зараженный уже проявляет внешние признаки имеющейся инфекции, способен заражать окружающих, но еще не идентифицирован системой здравоохранения, т.е. не попал в официальную статистику инфицированных. Именно на данной стадии и происходит фактически процесс распространения эпидемии. Введение двух состояний позволяет учесть как раз те особенности при распространении COVID-19, когда далеко не все инфицированные сразу обращаются в медицинские службы, существуют ограничения на проведение тестирования на вирус, как по их количеству, так и по времени получения результатов.

2. В интересах оценки потребности системы здравоохранения в койко-местах для лечения тяжело инфицированных, а также количества мест в реанимационных отделениях, оснащенных аппаратами искусственной вентиляции легких (ИВЛ), все инфицированные разделяются на три категории: переносящие вирус в легкой форме (без госпитализации), в тяжелой форме (с госпитализацией), а также находящиеся в критическом состоянии (с использованием аппаратов ИВЛ и помещением в реанимационное отделение).

3. Все лица, попавшие в категорию инфицированные (Infected), попадают в карантин и у них практически отсутствуют социальные контакты, т.е. они не могут уже заражать окружающих.

4. При распространении эпидемии нас, естественно, еще будет интересовать и смертность населения в результате COVID-19, поэтому вводится еще одно состояние *Dead* (умершие).

Основные параметры, включенные в данную модель:

TotalPopulation – численность населения;

ContactRateInfectious – среднее количество социальных контактов у одного человека в день;

ProbInfec – вероятность инфицирования человека в результате его контакта с уже заразившимся;

AvarIncubTime_NonContagious – средний инкубационный период, в течение которого у заразившегося отсутствует потенциальная способность к их заражению окружающих;

AvarIncubTime_Contagious – средний инкубационный период, когда инфицированный уже может заражать окружающих, до момента его социальной изоляции;

ProportionCritical – доля тяжело больных, которым необходима госпитализация;

ProportionHard – доля критически больных, помещаемых в реанимационное отделение с аппаратами ИВЛ;

ProbDeath – вероятность смерти лиц, находящихся в реанимационном отделении;

AvarageIllnessPeriod – средняя длительность болезни (не включая инкубационный период), переносящих ее в легкой форме;

AvarageHospitalTime – среднее время лечение тяжело больных, находящихся в стационаре.

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

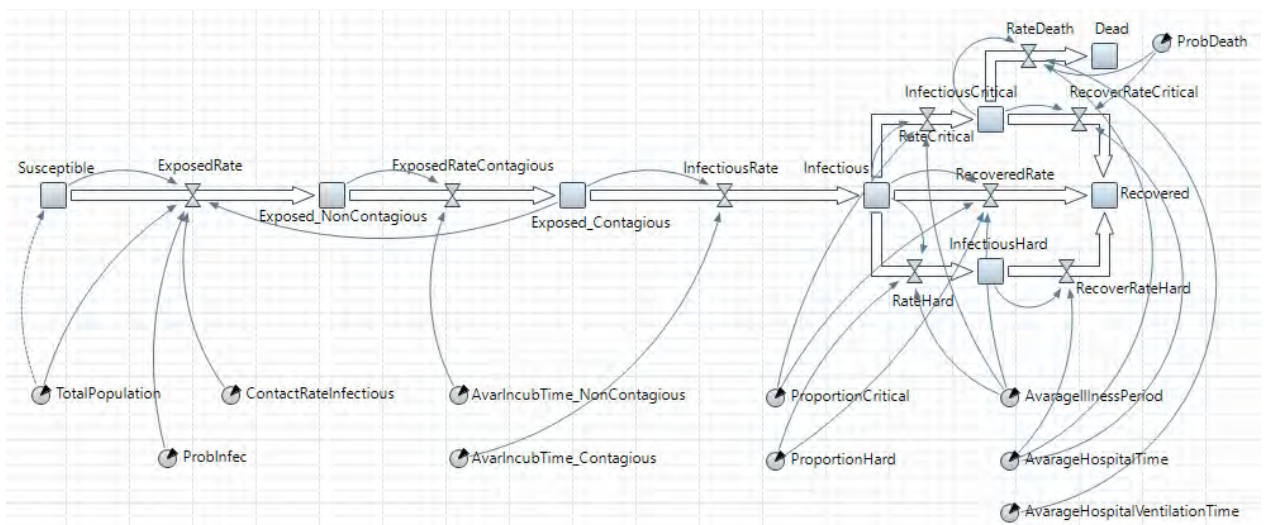


Рисунок 1 – Модель распространения эпидемии

Оценка исходных параметров для моделирования

Адекватность полученных результатов при использовании разработанной модели распространения эпидемии определяется, в том числе, и адекватностью исходных параметров, которые необходимо подать на вход модели. Необходимо учитывать, что некоторые параметры имеют определенные региональные особенности (которые могут зависеть, например, от плотности населения), а некоторые характерны именно для данного вируса, и по этой причине необходимо провести анализ результатов исследований вирусологов или практикующих медиков.

Официальные данные Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) говорят об инкубационном периоде, составляющем от 2 до 14 дней [1]. Исследования ученых-вирусологов также показали, что инкубационный период у разных пациентов может достаточно сильно отличаться, но в среднем его латентный период составляет около 5.2 дней, а период, когда инфицированный уже заразен и может инфицировать окружающих до того как попадает в официальную статистику и фактически изолируется, составляет порядка 3 дней [2-5]. Именно данные значения приняты в качестве исходных в модели.

По данным ВОЗ, которая аккумулирует все информационные потоки по распространению и анализу течения коронавируса «... у 15% пациентов заболевание может проходить в тяжелой форме, требующей кислородной терапии или иного лечения в условиях стационара и примерно 5% случаев – это критическая степень тяжести заболевания, при которой требуется искусственная вентиляция легких» [6, 7]. Данные значения мы будем ориентироваться при определении параметров *ProportionHard* и *ProportionCritical*. Хотя по данным статистики коронавируса в США 20% нуждаются в госпитализации и все те же 5% из числа заболевших нуждаются в интенсивной терапии, включая использование аппаратов искусственной вентиляции легких (ИВЛ).

При этом характерной особенностью протекания COVID-19 является явно выраженная неоднородность тяжести протекания заболевания и летальности относительно возраста зараженных

[8, 9]. Вполне очевидно, что точно определить значение показателя летальности можно будет лишь по окончании распространения эпидемии, а в настоящее время вспышка вируса еще продолжается. И данный показатель достаточно сильно варьируется в разных странах от 0.4% до 4% от общего числа заболевших [10-11].

В нашей стране данный показатель пока держится на уровне 0.7-0.8%, но совершенно ясно, что данные значения ниже истинной летальности, т.к. пик эпидемии еще не пройден, а смертельные случаи наступают значительно позже выявления заражения. Мы будем ориентироваться на значение летальности около 1%, хотя оно может и не отражать реальной картины.

При легкой форме заболевания и отсутствии осложнений период болезни оценивается в 7-10 дней [12]. Поэтому в модели значение показателя *AverageIllnessPeriod* принималось равным 7 дням. Оценки периода нахождения больных в стационаре и реанимационном отделении представлены в работе [13], где данные периоды оказались одинаковыми и также равны 7 дням. Однако, учитывая официально представленную статистику по динамике выздоровления в нашей стране, видно, что данные значения являются весьма оптимистическими и далеко не совсем соответствуют реальной ситуации. Данный период оценивается не менее 10 дней [14].

При анализе эпидемии SARS-Cov-2 специалистами ВОЗ установлено, что базовое репродуктивное число (то есть среднее количество заражаемых лиц от одного больного) колеблется от 1.4 до 2.5, что меньше аналогичных показателей при ОРВИ (от 2 до 5) [15, 16].

Однако данные значения могут существенно отличаться для различных регионов. Совершенно неправильным будет использовать одни и те же значения, к примеру, для мегаполисов и малых городов.

Значения данного параметра (а он формируется под воздействием *ContactRateInfectious* и *ProbInfec*) достаточно проблематично определить напрямую. Но с учетом того, что у нас уже есть реальные данные о распространении эпидемии во многих регионах, то можно определить данные параметры, проводя эксперименты с уже готовой имитационной моделью, и осуществляя

калибровку параметров таким образом, чтобы результаты, полученные при моделировании, максимально точно соответствовали реальным ретроспективным данным. Использовался интегрированный в AnyLogic оптимизатор OptQuest, разработанный компанией OptTek System, Inc [17].

В данной работе проводятся исследования распространения COVID-19 на территории двух городов – Москвы и Санкт-Петербурга, поэтому данные параметры отдельно исследуются для каждого из рассматриваемых городов.

Так, результаты калибровки данных параметров для г. Москва показали, что в период с 5 марта по 29 марта на первом этапе распространения эпидемии до введения ограничительных мероприятий $ContactRateInfectious = 6,97$ и $ProbInfec = 0,182$.

Анализ полученных результатов использования модели при данных входных параметрах показывает, что они вполне отражают реальную динамику распространения эпидемии на территории г. Москва (см. рис.2).

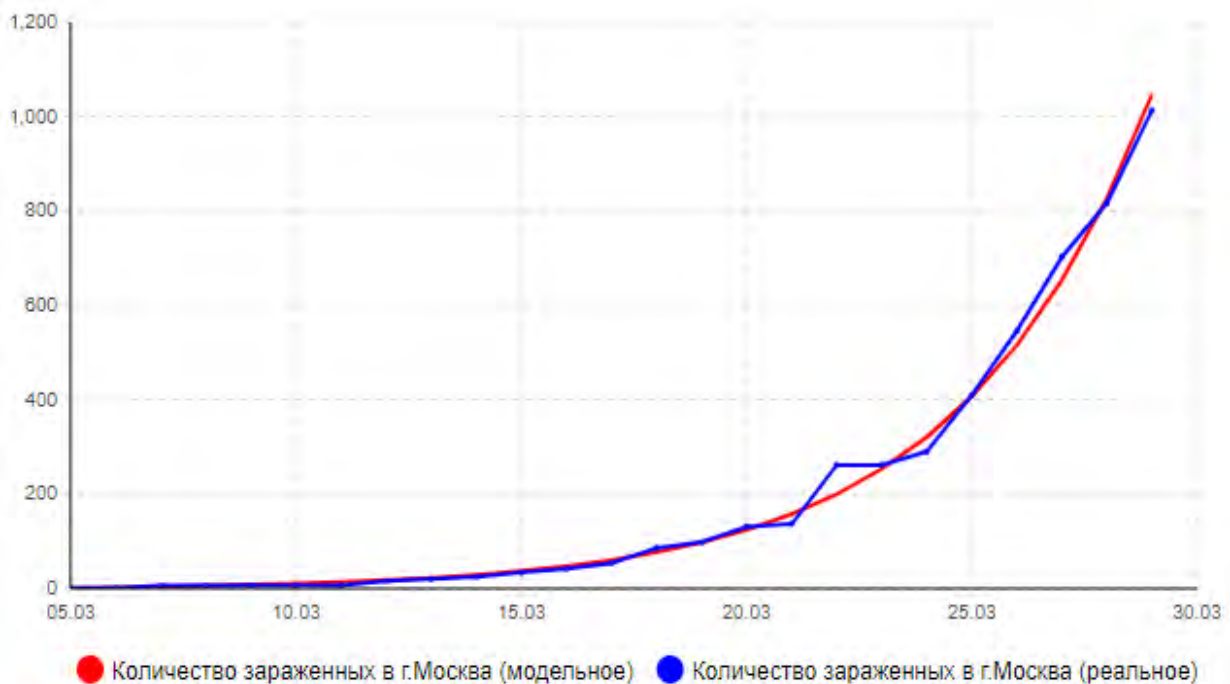


Рисунок 2 – Динамика распространения COVID-19 на территории г. Москва в период 5 марта – 29 марта

С 17 марта были введены ограничительные мероприятия, которые естественным образом привели к снижению количества социальных контактов. Аналогичным образом была проведена калибровка параметров и получено, что в условиях введенных мер $ContactRateInfectious = 6,2$, т.е. количество социальных контактов в целом уменьшилось на 11.1%.

С 30 марта был введен режим самоизоляции, что привело к еще большему снижению количества социальных контактов. С учетом имеющихся реальных данных о динамике заражения в период с 30 марта аналогичным образом была проведена калибровка параметров и получено

$ContactRateInfectious = 2,205$ (т.е. среднее количество контактов уменьшилось в среднем на 68.4%) и $ProbInfec = 0,103$. Уменьшение показателя вероятности инфицирования индивидуума легко объяснимо эффективностью проведения информирования населения об профилактических мерах при распространении эпидемии, соблюдения правил личной и общественной гигиены.

Аналогичным образом была проведена калибровка данных параметров для г. Санкт-Петербург и модель распространения эпидемии с полученными параметрами в течение первого месяца достаточно неплохо отражает реальную ситуацию (см. рис.3).

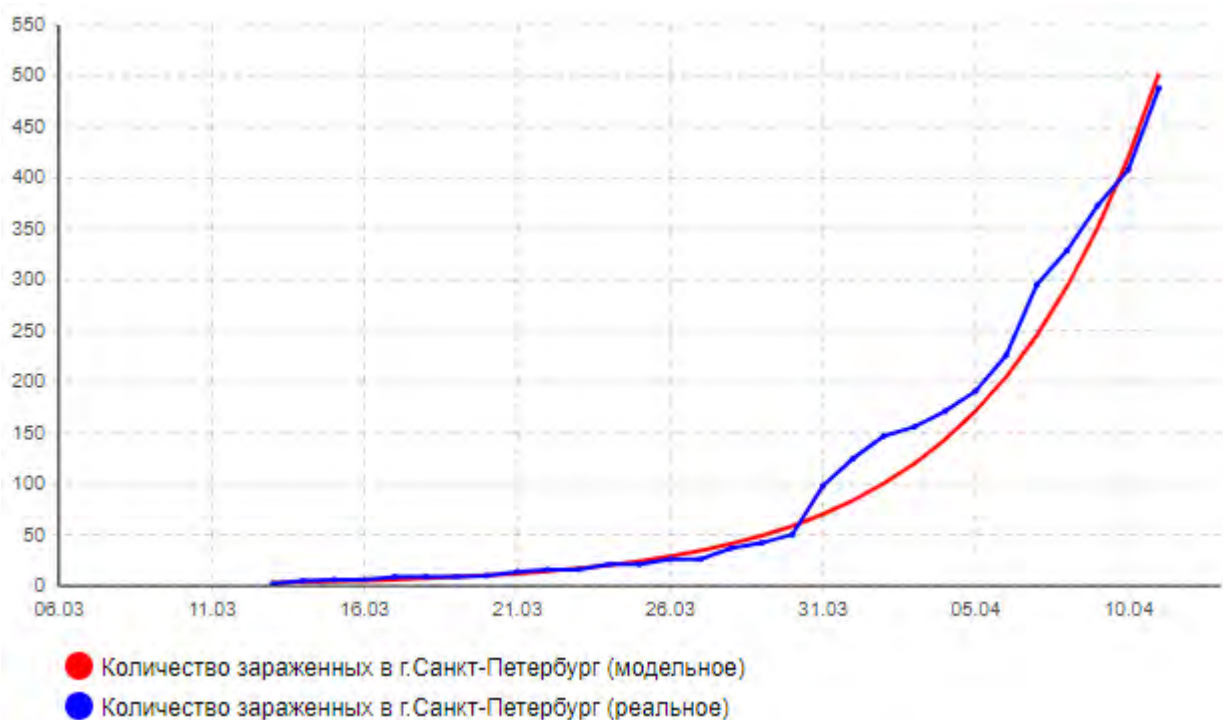


Рисунок 3 – Динамика распространения COVID-19 на территории г. Санкт-Петербург в период 6 марта – 12 апреля

Анализ результатов моделирования

1) г. Москва

Сценарий 1. Распространение эпидемии без каких-либо профилактических и ограничительных мероприятий

Результаты расчетов согласно данному сценарию представлены на рис. 4.

Анализ результатов показывает, что пик эпидемии в этом случае придется на конец июня месяца. Может потребоваться одновременно около 320 тыс. мест в больницах, в том числе 97 тыс. коек в реанимации, оснащенных аппаратами ИВЛ. В целом

переболеет 83% населения города. Количество умерших составит около 112 тыс. человек. Окончание эпидемии при данном сценарии ожидается в конце августа.

Вполне очевидно, что такой сценарий изначально был маловероятен, т.к. в любом случае были бы приняты какие-либо ограничительные меры. И результаты вполне отчетливо дают понять о степени потенциальной опасности при распространении эпидемии, а также о необходимости принятия в той или иной степени таких мер. А вот для определения степени ограничений требуется рассмотрение следующих сценариев.



Рисунок 4а – Динамика количества инфицированных (сценарий 1)

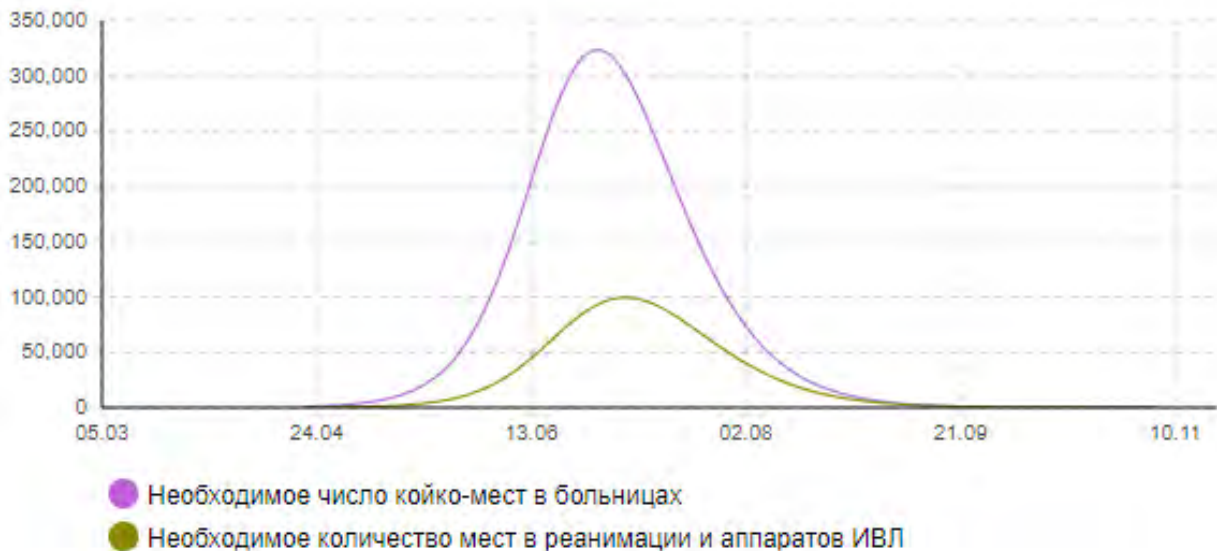


Рисунок 4б – Динамика количества тяжелых и критически больных (сценарий 1)

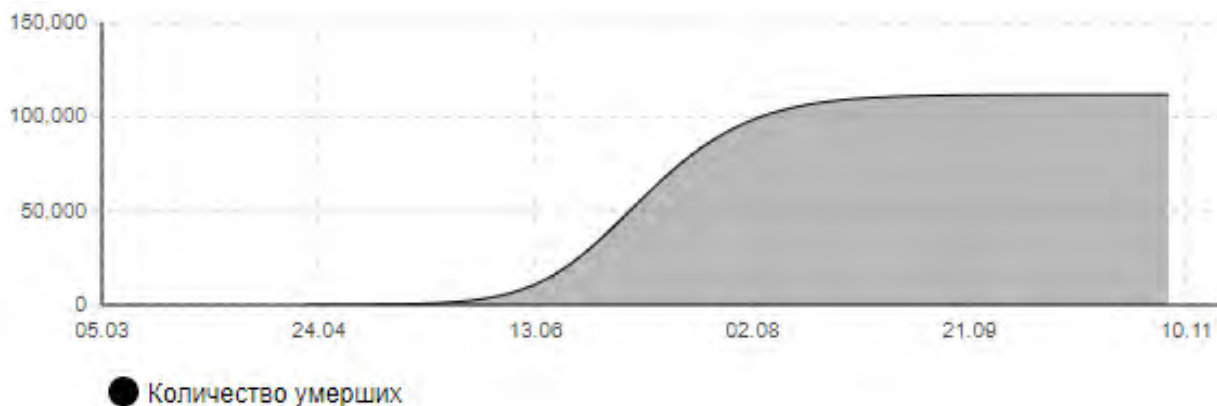


Рисунок 4в – Количество умерших (сценарий 1)

Сценарий 2. Мягкие ограничительные меры

Данные меры были введены на первом этапе борьбы с COVID-19 в России, когда были закрыты образовательные учреждения, отменены меро-

приятия с массовым пребыванием людей (более 50 человек) и даны рекомендации лицам старшего поколения (после 65 лет) не покидать места их постоянного пребывания (см. рис. 5).

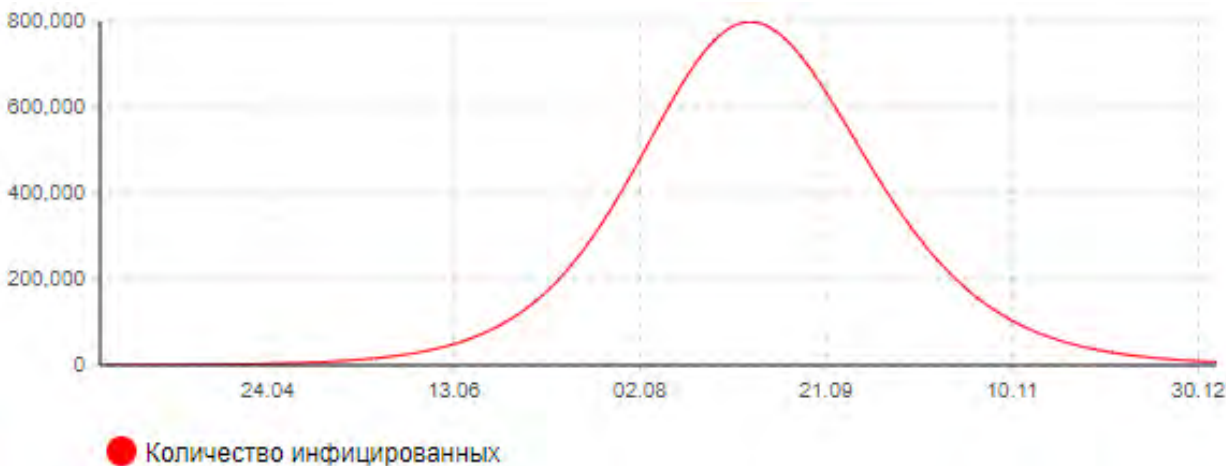


Рисунок 5а – Динамика количества инфицированных (сценарий 2)

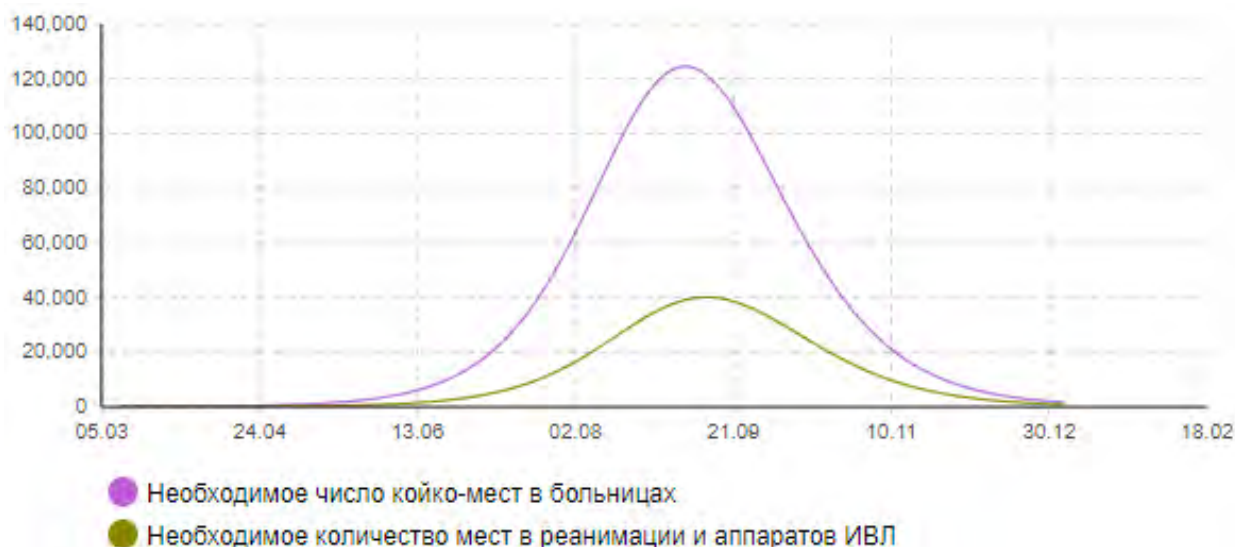


Рисунок 5б – Динамика количества тяжелых и критически больных (сценарий 2)

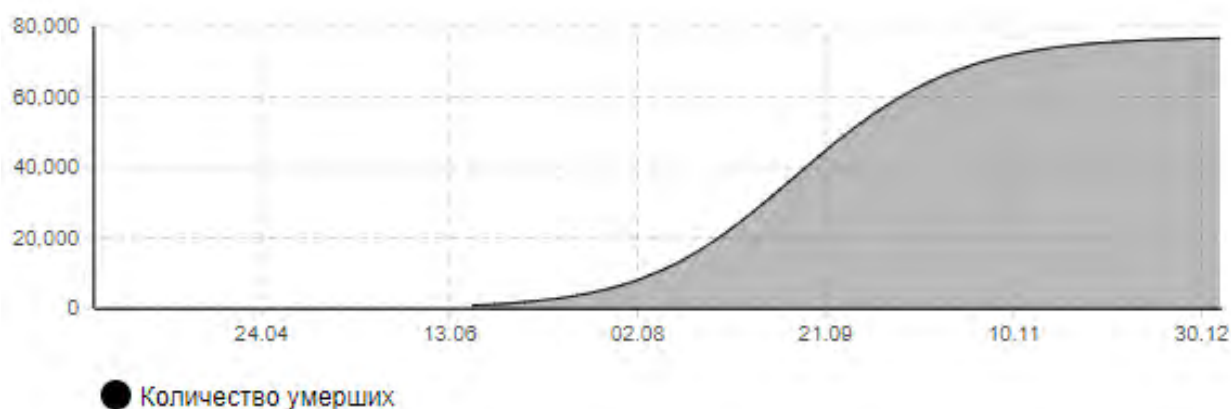


Рисунок 5в – Количество умерших (сценарий 2)

Как видно из представленных результатов, пик эпидемии при данном сценарии придется на начало сентября месяца. Может потребоваться одновременно около 123 тыс. мест в больницах, в том числе 40 тыс. коек в реанимации, оснащенных аппаратами ИВЛ. В целом эпидемия может затронуть 58% населения города. Количество умерших составит около 77 тыс. человек. Окончание эпидемии можно ожидать в конце календарного года.

Сценарий 3. Жесткие ограничительные меры

Данные меры были введены на втором этапе борьбы в нашей стране, когда был объявлен режим самоизоляции для всех граждан, рекомендуемый их нахождение в местах постоянного пребывания, за исключением сотрудников, работающих на предприятиях жизнеобеспечения, силовых структур и органов власти. По возможности перевод деятельности бизнеса в дистанционный формат.

Результаты моделирования распространения эпидемии при данном сценарии представлены на рис. 6.

Анализ результатов показывает, что пик эпидемии в этом случае придется на середину апреля. Может потребоваться одновременно около 950 мест в больницах, в том числе 300 коек в реанимации, оснащенных аппаратами ИВЛ. В целом переболевает около 21 тыс. человек. Количество умерших составит около 330 человек. Окончание эпидемии ожидается к началу августа.

Сценарий 4. Жесткие ограничительные меры (введение карантина и режима ЧС)

Данный сценарий подразумевает полный запрет покидания людьми места постоянного пребывания (с введением жестких штрафных санкций, нарушившим режим самоизоляции), организация доступа исключительно в аптеки и магазины, осу-

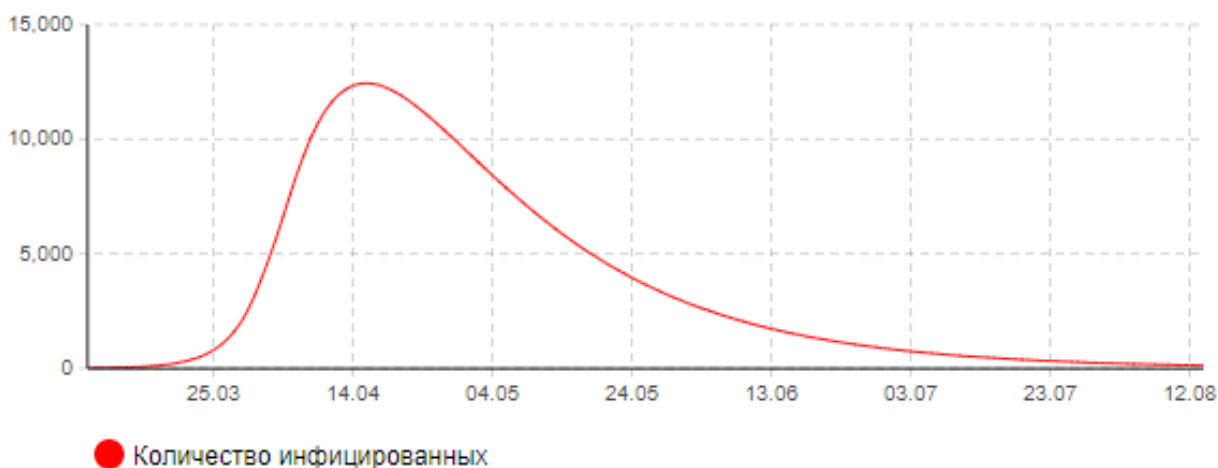


Рисунок 6а – Динамика количества инфицированных (сценарий 3)

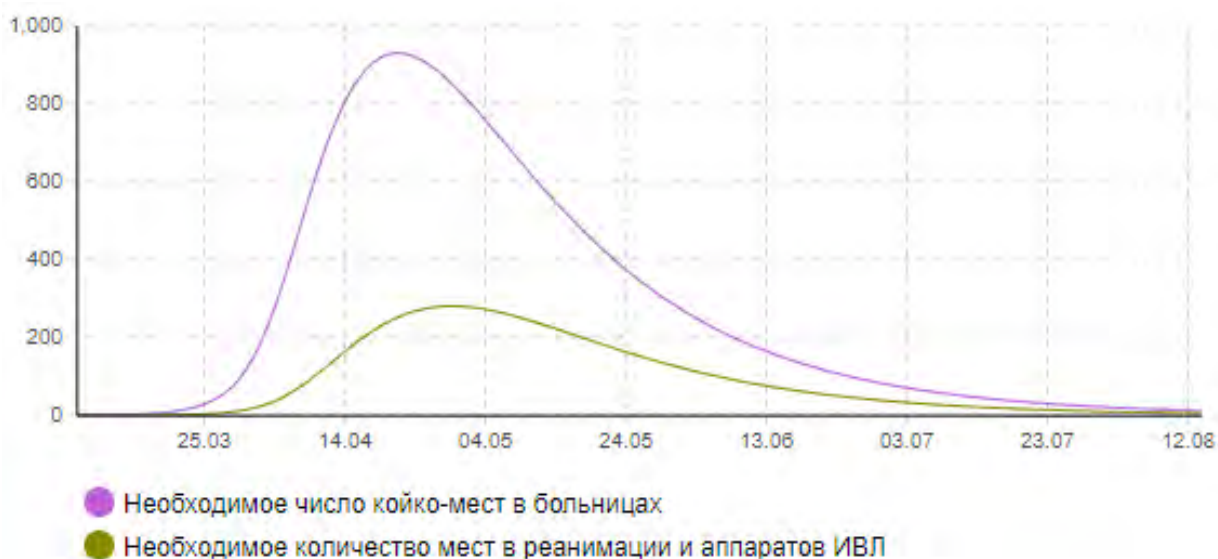


Рисунок 6б – Динамика количества тяжелых и критически больных (сценарий 3)

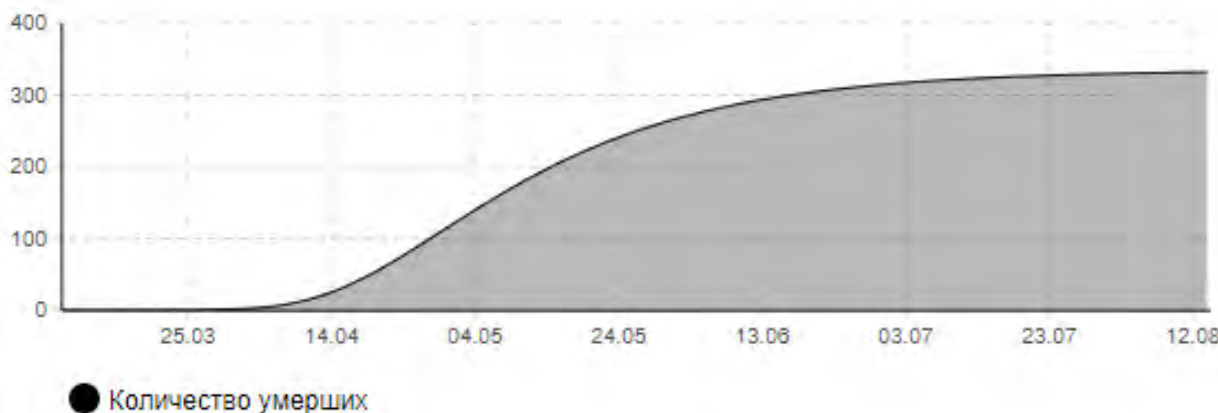


Рисунок 6в – Количество умерших (сценарий 3)

шествующие продаже товаров первой необходимости, причем по одному. При данном сценарии также происходит фактически полное временное закрытие бизнесов, за исключением предприятий жизнеобеспечения, ограничение въезда и выезда

в отдельные города, остановка пассажирских железнодорожных и авиационных перевозок.

Результаты моделирования распространения эпидемии при данном сценарии представлены на рис. 7.

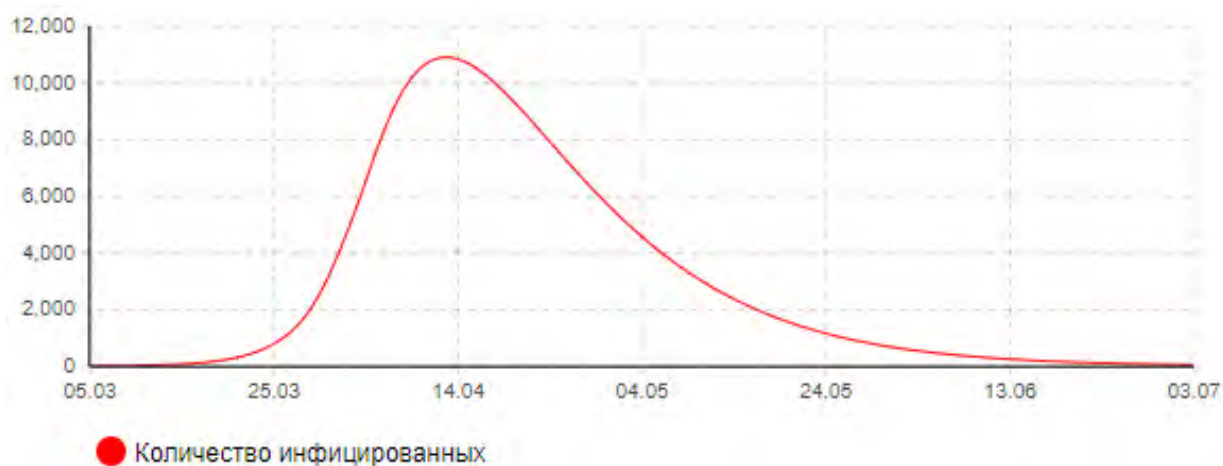


Рисунок 7а – Динамика количества инфицированных (сценарий 4)

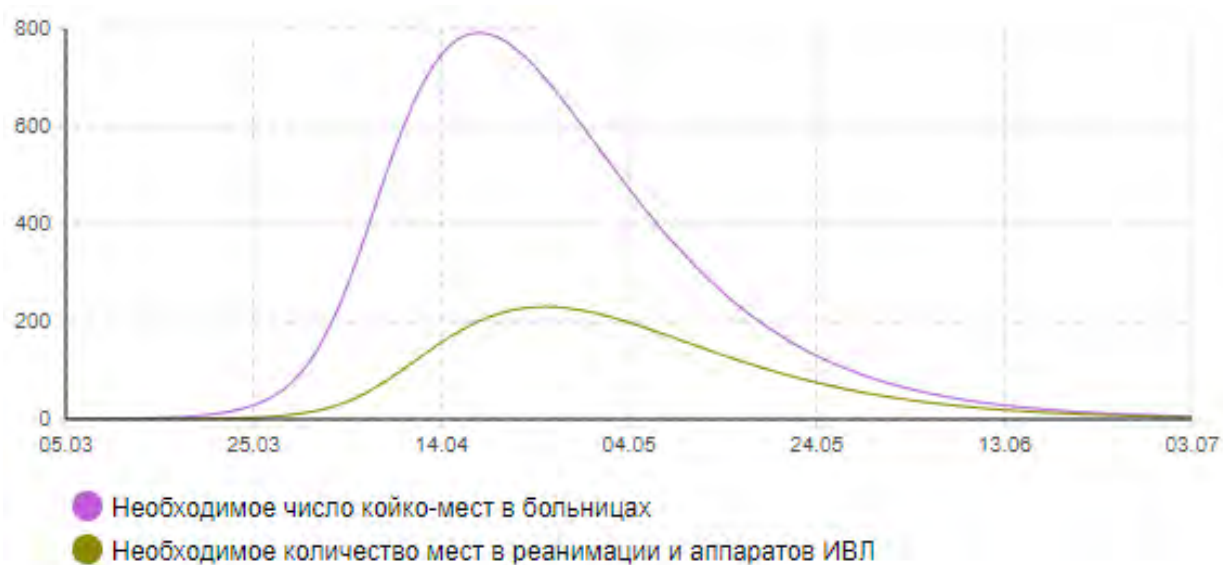


Рисунок 7б – Динамика количества тяжелых и критически больных (сценарий 4)

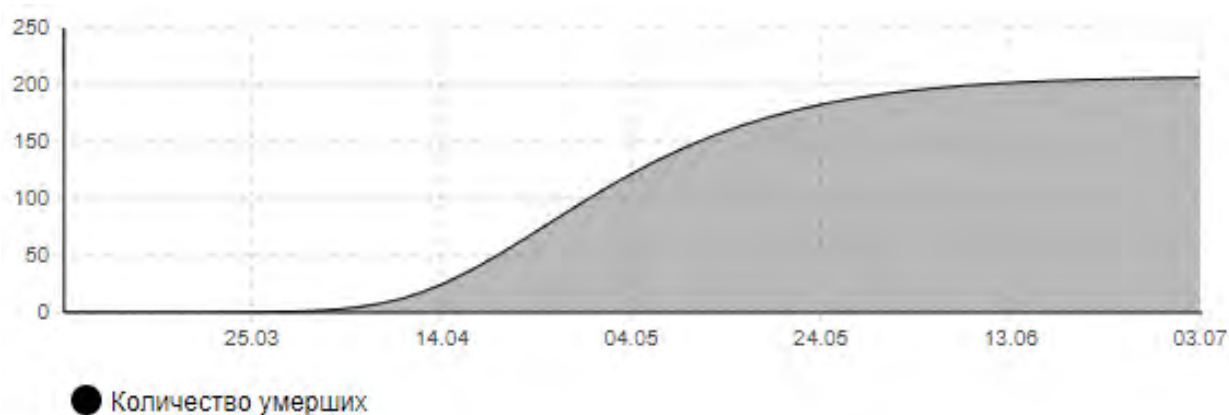


Рисунок 7в – Количество умерших (сценарий 4)

Анализ результатов показывает, что пик эпидемии в этом случае придется на середину апреля. Может потребоваться одновременно около 800 мест в больницах, в том числе 250 коек в реанима-

ции, оснащенных аппаратами ИВЛ. В целом переболевает около 13 тыс. человек. Количество умерших составит около 210 человек. Окончание эпидемии ожидается к середине июня.

Таблица 1.

Оценка эффективности принимаемых мер по распространению COVID-19 в г. Москва

	Сценарий 1	Сценарий 2	Сценарий 3	Сценарий 4
Прогнозируемое количество переболевших, чел.	83% населения города	58% населения города	21 000	13 000
Потребность койко-мест в больницах, шт.	320 000	123 000	950	800
Потребность в аппаратах ИВЛ, шт.	97 000	40 000	300	250
Прогнозируемое количество умерших, чел.	112 000	77 000	330	210
Ожидаемый срок пика эпидемии	конец июня	начало сентября	середина апреля	середина апреля
Ожидаемый срок окончания эпидемии	конец августа	декабрь	начало августа	середина июня

2) г. Санкт-Петербург

По аналогии было проведено моделирование распространения эпидемии на территории г. Санкт-Петербурга. Результаты представлены

на рисунках 8-11.

Сценарий 1. Распространение эпидемии без каких-либо профилактических и ограничительных мероприятий.

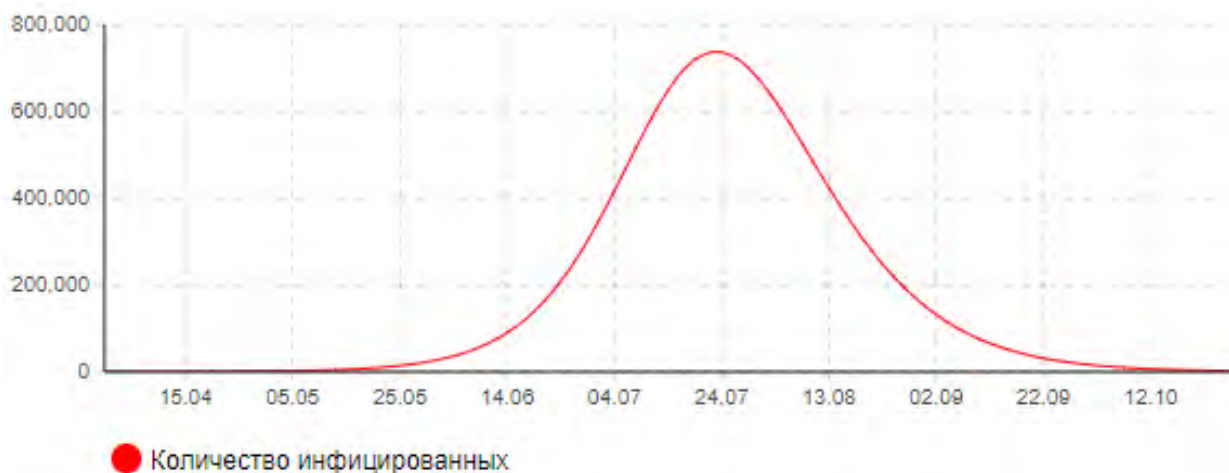


Рисунок 8а – Динамика количества инфицированных (сценарий 1)

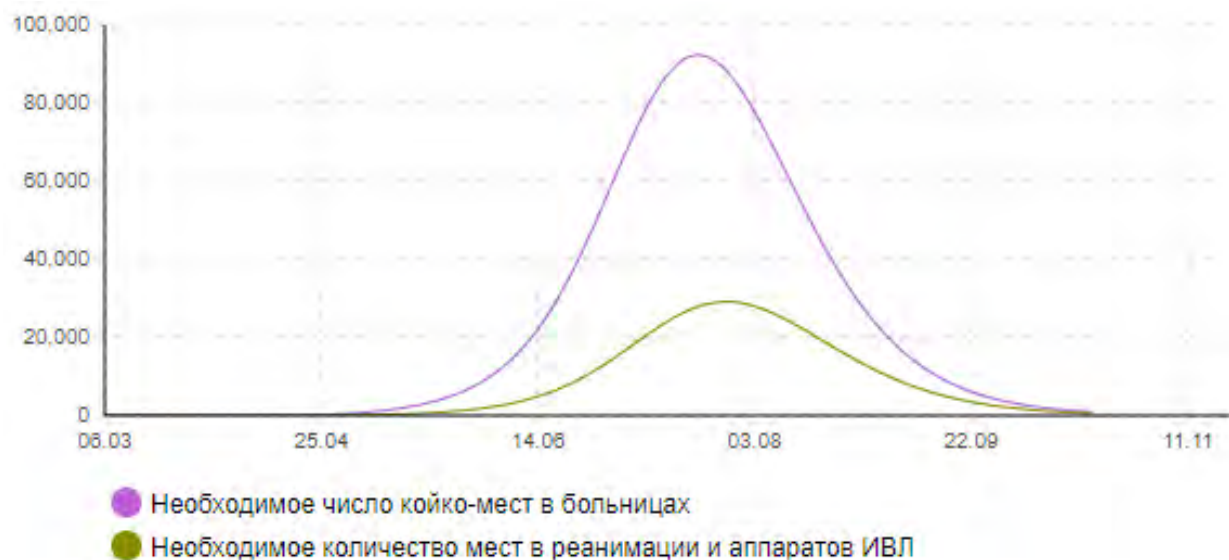


Рисунок 8б – Динамика количества тяжелых и критически больных (сценарий 1)

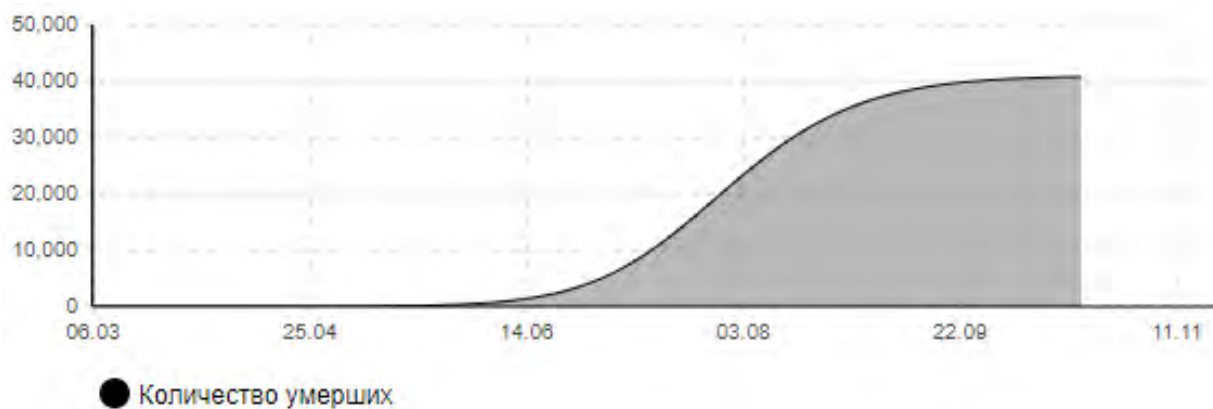


Рисунок 8в – Количество умерших (сценарий 1)

Сценарий 2. Мягкие ограничительные меры

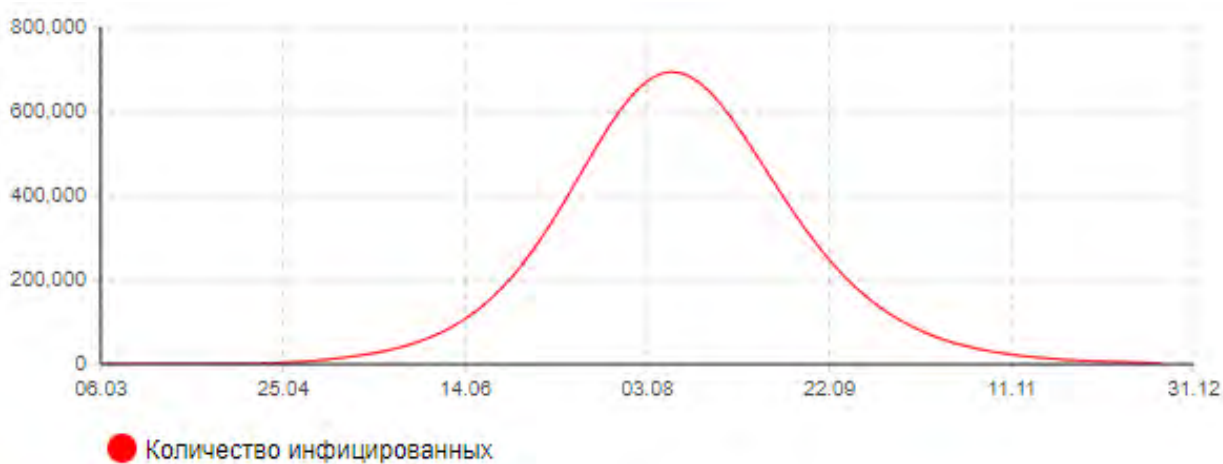


Рисунок 9а – Динамика количества инфицированных (сценарий 2)

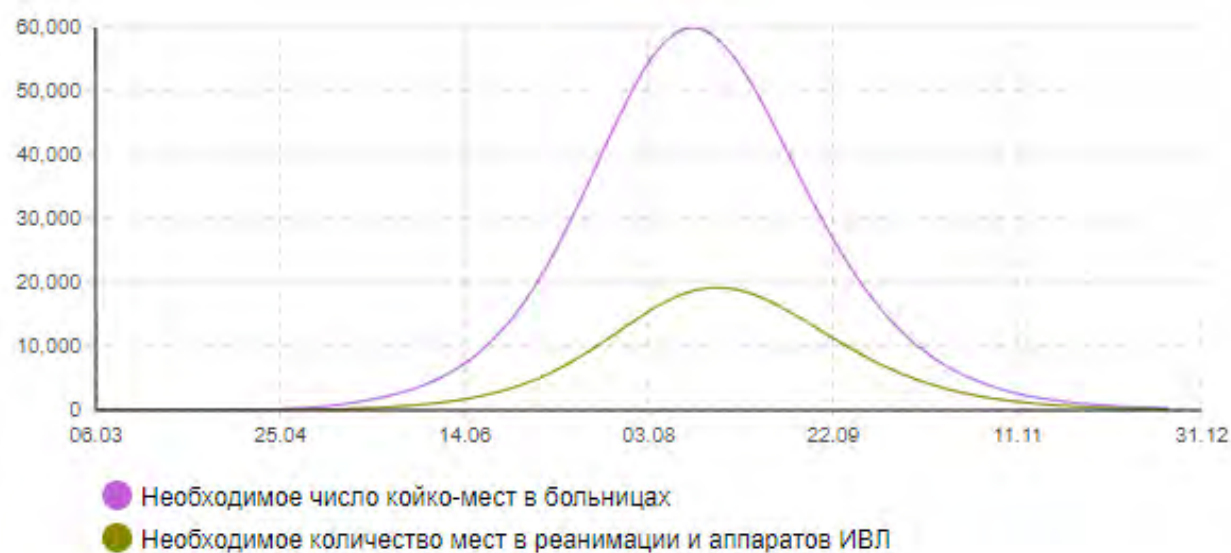


Рисунок 9б – Динамика количества тяжелых и критически больных (сценарий 2)

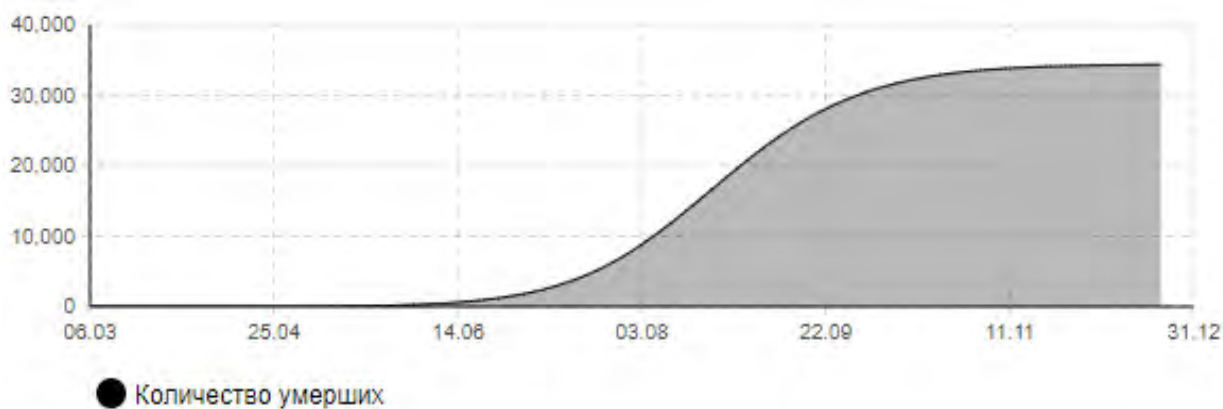


Рисунок 9в – Количество умерших (сценарий 2)

Сценарий 3. Жесткие ограничительные меры

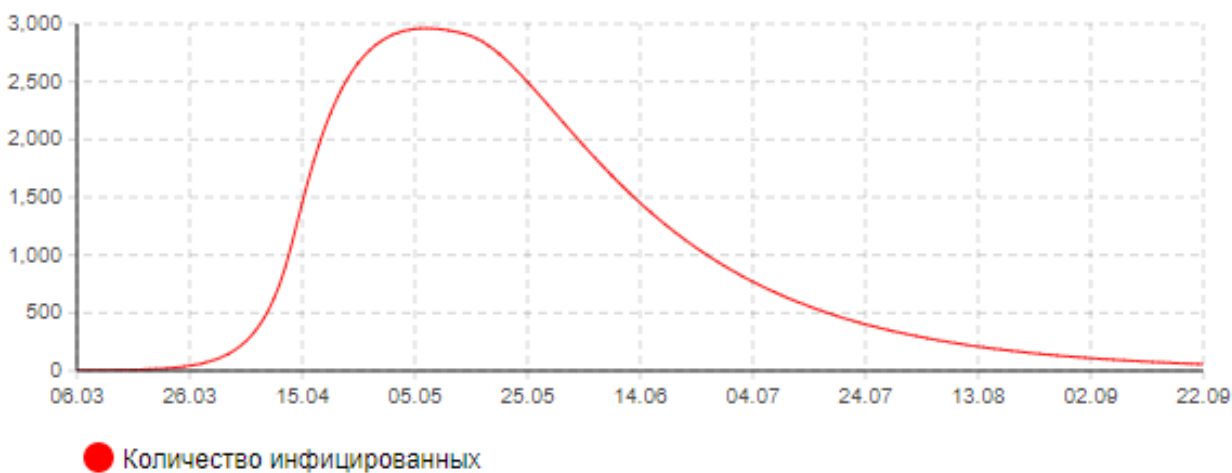


Рисунок 10а – Динамика количества инфицированных (сценарий 3)

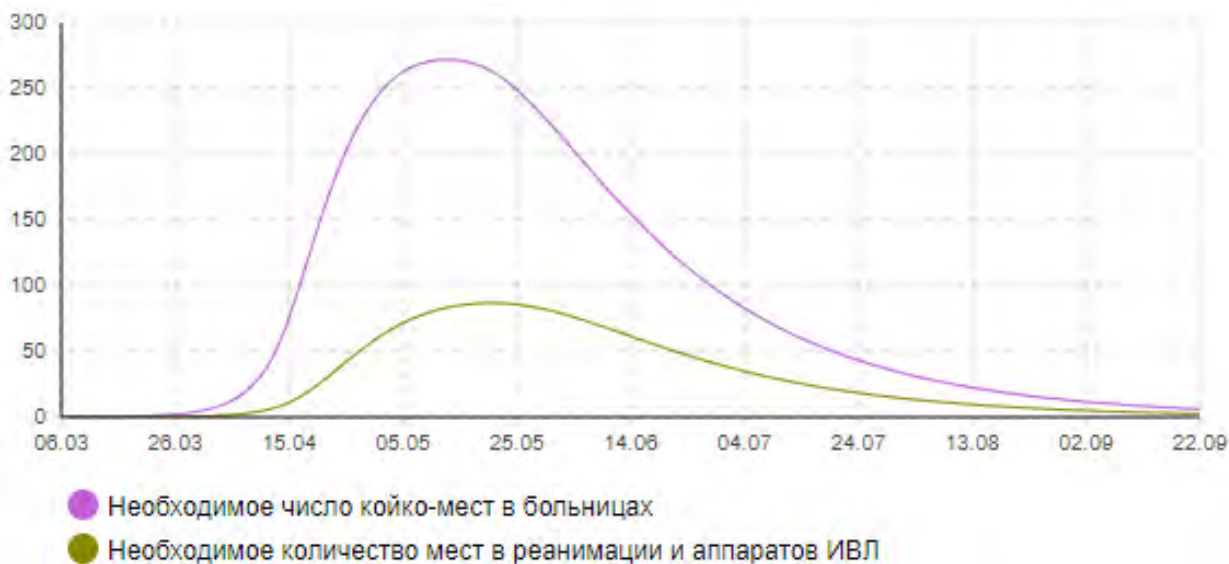


Рисунок 10б – Динамика количества тяжелых и критически больных (сценарий 3)

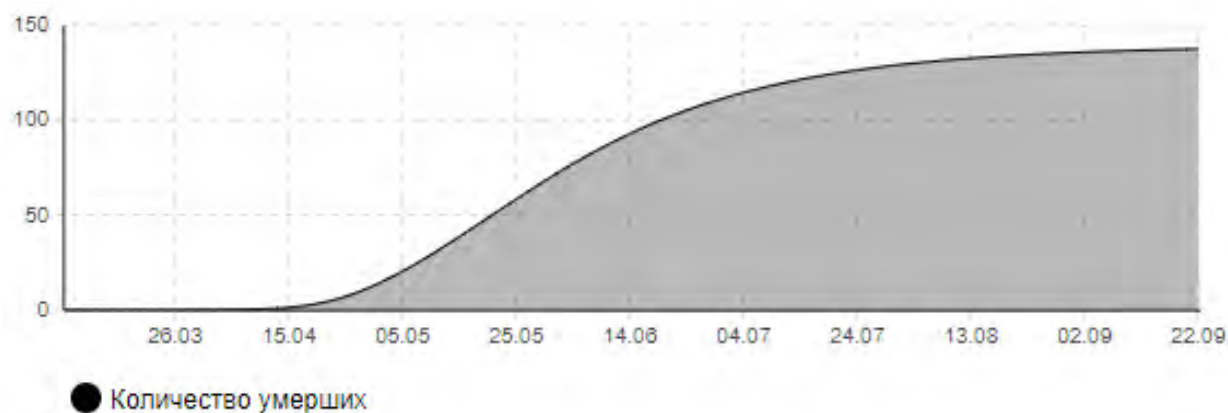


Рисунок 10в – Количество умерших (сценарий 3)

Сценарий 4. Жесткие ограничительные меры (введение карантина и режима ЧС)

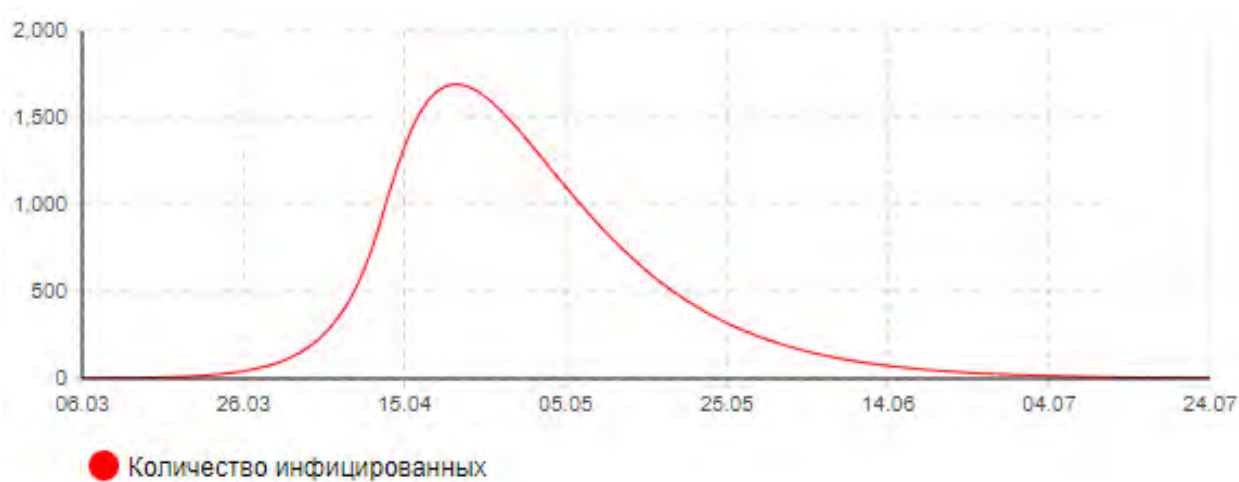


Рисунок 11а – Динамика количества инфицированных (сценарий 4)

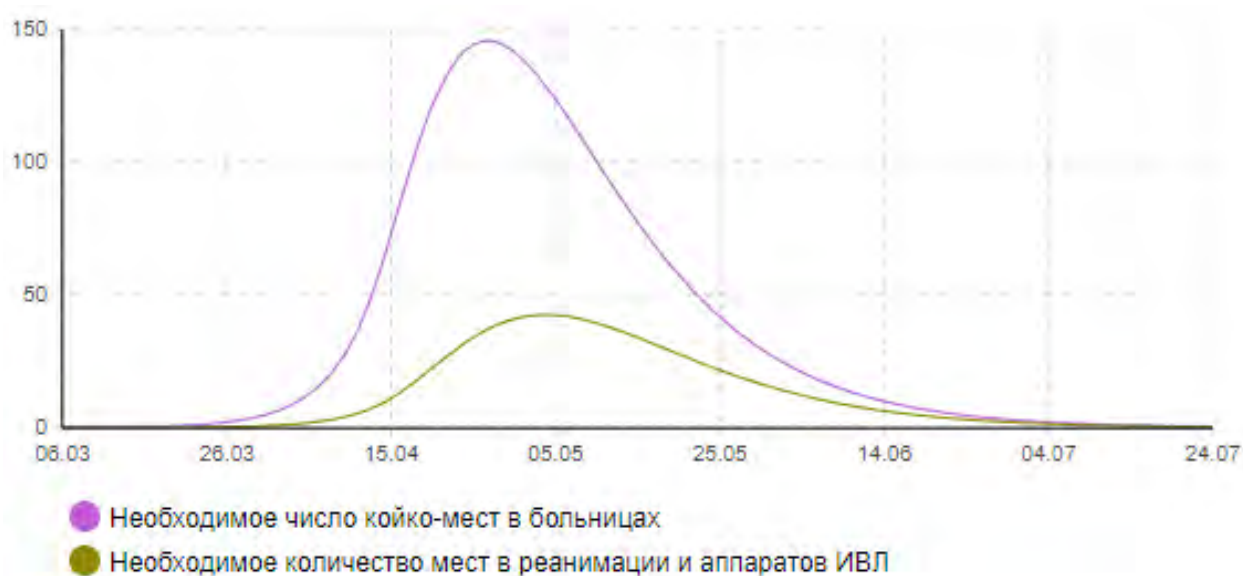


Рисунок 11б – Динамика количества тяжелых и критически больных (сценарий 4)

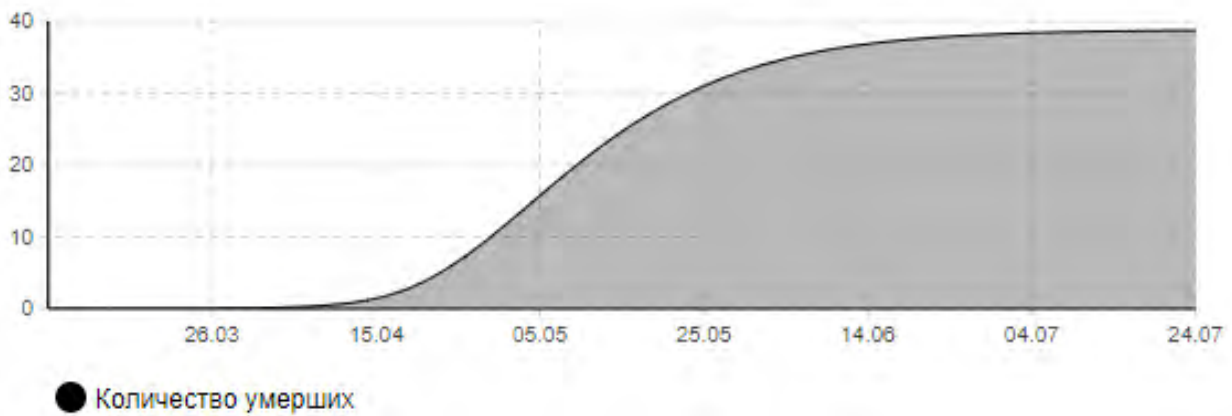


Рисунок 11в – Количество умерших (сценарий 4)

Сравнительный анализ всех рассмотренных сценариев при моделировании распростране-

ния эпидемии в г. Санкт-Петербург представлен в табл. 2.

Таблица 2.

Оценка эффективности принимаемых мер по распространению COVID-19 в г. Санкт-Петербург

	Сценарий 1	Сценарий 2	Сценарий 3	Сценарий 4
Прогнозируемое количество переболевших, чел.	72% населения города	60% населения города	8750	2400
Потребность койко-мест в больницах, шт.	92 000	60 000	280	150
Потребность в аппаратах ИВЛ, шт.	28 000	20 000	90	50
Прогнозируемое количество умерших, чел.	40 000	32 000	до 150 чел	до 40 чел
Ожидаемый срок пика эпидемии	середина июля	первая декада августа	середина мая	вторая половина апреля
Ожидаемый срок окончания эпидемии	начало сентября	начало ноября	середина августа	середина июня

Замечания и выводы

1. Необходимо отметить, что все полученные результаты весьма приблизительны. Нельзя быть уверенным в том, что даты и ход эпидемии будут соответствовать точным прогнозам, которые сделаны в данной работе. Существуют неизбежные неопределенности при прогнозировании такого явления, как эпидемия! Но полученные результаты, по крайней мере, могут вполне точно обосновать принимаемые управленческие решения, направленные на ограничения распространения эпидемии.

2. В работе предположено, что абсолютно любой человек потенциально может заразиться COVID-19, т.е. изначально нет ни одного индивидуума, обладающего полным или частичным иммунитетом, что характерно для многих других вирусных заболеваний, «гуляющих» по планете в настоящее время. Но исследований, опровергающих данное предположение пока нет.

3. По результатам динамики роста эпидемии в течение марта месяца видно, что вводимые постепенно ограничения в целом дают положительный результат, однако оценить их эффективность можно лишь приблизительно. При моделировании предполагалось, что вводимые ограничения, которые на начальных стадиях носили сугубо рекомендательный характер, выполняются жителями в полном объеме. По факту видно, что это далеко не соответствует реальной картине, и примеров нарушения режима самоизоляции полно! В особенности это было хорошо заметно в первые, по-настоящему теплые весенние деньки. А это вполне может оказывать влияние на реальное распространение вируса, что не учитывалось в построенной модели.

Также важную роль играет время начала и период введения конкретных ограничительных мер. В данной работе были рассмотрены четыре основных сценария. Но наверняка данные сцена-

рии в процессе реальной борьбы с распространением COVID-19 будет комбинироваться, причем последовательно с 1-го и возможно даже до 4-го в сторону постоянного их ужесточения.

4. При оценке летальности случаев заражения никак не учитывался возможный ее рост в условиях ограниченности аппаратов ИВЛ, т.е. предполагалось, что каждый больной, находящийся в критической ситуации, гарантированно сможет быть подключенным к аппарату. В этих обстоятельствах естественно предположить, что количество умерших в первых двух сценариях может оказаться существенно больше.

Также доля инфицированных, переносящих заболевание в той или иной форме, определялась весьма условно, исходя из опыта стран, столкнувшихся с ней раньше. Опыт показывает, что большая часть умерших – это люди с ослабленным иммунитетом, имеющие серьезные хронические заболевания. И их количество, конечно же, может отличаться в разных странах. Но точные данные по летальности COVID-19 в нашей страны, в любом случае, можно будет получить лишь по окончанию распространения эпидемии.

5. Результаты показывают, что период эпидемии во многом зависит от времени начала введения ограничительных мер, и она гораздо легче и быстрее подавляется при невысоком текущем количестве инфицированных. Вполне логично принятое решение руководством страны о необходимости определения степени ограничительных мер именно на уровне регионов, поскольку весьма очевидно, что ситуация с уровнем распространения эпидемии в разных регионах страны неоднородна. И если в большинстве регионов России ситуация остается еще вполне устойчивой по причине того, что ограничительные меры были введены вовремя, пока количество зараженных оценивалось единицами или десятками, то, например, в Москве можно было бы существенно снизить возможный ущерб, если бы, ориентируясь на сложившуюся ситуацию в других странах (в особенности Китая, Италии и пр.), ограничительные меры начались вводиться хотя бы на неделю раньше.

6. Необходимо отметить, что при первых двух сценариях переболеет больше половины населения, а значит при спаде эпидемии в случае окончания ограничительных мер не очень высокий риск начала повторной волны роста эпидемии. Третий

и четвертый сценарии напротив характеризуются достаточно высоким риском начала повторной волны эпидемии, поскольку коллективного иммунитета у населения в целом к вирусу не будет, поэтому лицам, принимающим решения, необходимо будет очень взвешенно подходить к вопросу определения даты снятия всех ограничительных мероприятий.

7. Результаты показывают, что чем жестче изначально вводимые ограничительные меры, то тем меньше становится период самоизоляции населения, и тем в конечном итоге окажется слабее удар по экономике страны, которая, несомненно, будет в течение этого периода находиться в парализованном состоянии. Поскольку эпидемия развивается по траектории экспоненциального роста, то неизбежно, что руководство страны или регионов в конечном итоге будет вынуждено ввести карантин, либо официально, либо «по умолчанию». Таким образом, если это произойдет в любом случае, то стоит сделать как можно раньше!

Список литературы

1. World Health Organization. Coronavirus disease 2019 (COVID-19): Situation Report – 38. 27 February 2020 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.who.int/docs/default-source/coronaviruse/situation-reports/20200227-sitrep-38-covid-19.pdf?sfvrsn=9f98940c_2 on 28 February 2020.
2. Инкубационный период нового коронавируса COVID-19. Сайт мониторинга коронавируса [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://coronavirus-monitoring.ru/2020/03/19/inkubacionnyj-period-koronavirusa-covid-19/#i-1>
3. Bai Y, Yao L, Wei T, et al. Presumed Asymptomatic Carrier Transmission of COVID-19. JAMA. Published online February 21, 2020. doi:10.1001/jama.2020.2565
4. Lauer SA, Grantz KH, Bi Q, et al. The Incubation Period of Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) From Publicly Reported Confirmed Cases: Estimation and Application. Ann Intern Med. 2020; [Epub ahead of print 10 March 2020]. doi: <https://doi.org/10.7326/M20-0504>
5. Huang C, Wang Y, Li X, et al. Clinical features of patients infected with 2019 novel coronavirus in Wuhan, China. Lancet. 2020;395:497-506. [PMID: 31986264] doi:10.1016/S0140-6736(20)30183-5

6. ВОЗ назвала процентное соотношение легкого и тяжелого течения коронавируса [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gogov.ru/news/750512>
7. Российский вирусолог назвал процент критических случаев при коронавирусе [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://lenta.ru/news/2020/04/07/ucheni/>
8. *Yang J. 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.
9. Report of the WHO-China Joint Mission on Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.who.int/docs/default-source/coronaviruse/who-china-joint-mission-on-covid-19-final-report.pdf>
10. Средний возраст заболевших коронавирусом и умерших от него. Сайт мониторинга коронавируса [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://coronavirus-monitoring.ru/2020/03/19/vozrast-zabolevshih-koronavirusom/>
11. Report 4: Severity of 2019-novel coronavirus (nCoV) [https://www.imperial-college/medicine/sph/ide/gida-fellowships/Imperial-College-COVID19-severity-10-02-2020.pdf](https://www.imperial.ac.uk/media/imperial-college/medicine/sph/ide/gida-fellowships/Imperial-College-COVID19-severity-10-02-2020.pdf)
12. *Романов Б.К.* Коронавирусная инфекция COVID-2019 // *Безопасность и риск фармакотерапии*. – 2020. – Т. 8. – № 1. – С. 3-8.
13. *Maslov S., Goldenfeld N.* Window of Opportunity for Mitigation to Prevent Overflow of ICU capacity in Chicago by COVID-19 // *arXiv preprint arXiv:2003.09564*. – 2020.
14. Сколько дней длится заболевание COVID-19? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://aif.ru/health/coronavirus/skolko_dney_dlitsya_zabolevanie_koronavirusom
15. *Прилуцкий А.С.* Коронавирусная болезнь 2019. Часть 1: характеристика коронавируса, эпидемиологические особенности // *Вестник гигиены и эпидемиологии*. – 2020. – Т. 24. – № 1. – С. 77-86.
16. *Benvenuto D., Giovanetti M., Salemi M. et al.* The global spread of 2019-nCoV: a molecular evolutionary analysis // *Pathog Glob Health*. – 2020. – Vol. 12. – P. 1-4. doi: 10.1080/20477724.2020.1725339. [Epub ahead of print]
17. *Laguna M.* OptQuest // *Optimization of Complex Systems*. – 2011.

*Статья поступила в редакцию 30 марта 2020 г.
Принята к публикации 10 апреля 2020 г.*

Ссылка для цитирования: Матвеев А. В. Математическое моделирование оценки эффективности мер против распространения эпидемии COVID-19 // *Национальная безопасность и стратегическое планирование*. 2020. № 1(29). С. 23-39. DOI: <https://doi.org/10.37468/2307-1400-2020-1-23-39>