

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МАСОЧНОГО РЕЖИМА ВО ВРЕМЯ ЭПИДЕМИИ COVID-19 В МОСКВЕ В МОДЕЛИ SEIQRD

Чернов А. А.¹

(Национальный исследовательский университет «Высшая
школа экономики», Москва)

Целью данной работы является оценка эффективности повсеместного использования медицинских масок для борьбы с эпидемией. Распространение эпидемии описывается моделью SEIQRD (susceptible – exposed – infected – quarantined – recovered – deaths, восприимчивые – находящиеся в латентном периоде – заболевшие – помещенные в карантин – выздоровевшие – умершие), где ключевые переменные, отвечающие за развитие эпидемии, разделены на две группы: соблюдающих и не соблюдающих масочный режим. Для модели вычисляются базовый показатель репродукции, эластичности к параметрам модели, а также минимальный процент населения, которому необходимо соблюдать масочный режим для нераспространения эпидемии. Параметры модели оцениваются на статистических данных эпидемии COVID-19 в г. Москва, а затем численно моделируются сценарии развития эпидемии при разной степени соблюдения масочного режима.

Ключевые слова: COVID-19, масочный режим, эпидемия, SEIR, показатель репродукции.

Введение

Эпидемии – одни из самых опасных и разрушительных явлений для человечества. За всю историю человечество не раз страдало от разрушительных эпидемий (чумы, холеры, оспы и др.), влекущих за собой глубокий кризис и гибель миллионов людей. В конце 2019 года средства массовой информации сообщили о пневмонии неизвестного происхождения в городе Ухань в Китае. Постепенно вирус был зафиксирован во всех провинциях Китая. 30 января 2020 года Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) признала вспышку нового коронавируса чрезвычайной ситуацией, имеющей международное значение, а 11 марта было объявлено, что вспышка приобрела характер глобальной панде-

¹ Алексей Александрович Чернов, соискатель (chernov125@mail.ru).

мии [20]. Новое заболевание получило название COVID-19 и вызвало тяжелейший социально-экономический кризис. На начало 2022 года в мире было зафиксировано 288,7 млн инфицированных COVID-19, скончались свыше 5,4 млн человек [21].

Для предотвращения распространения эпидемии правительства многих стран приняли ряд превентивных мер: закрыли границы, ввели режим самоизоляции, карантин и масочный режим. Однако вопросы эффективности принятых мер остаются открытыми. В настоящее время разрабатываются различные эпидемиологические модели для предсказания развития COVID-19 и оценки влияния потенциальных мер сдерживания развития эпидемии. Большинство моделей основываются на первых классических моделях: модели Kermack and McKendrick или SIR (susceptible – infected – removed, восприимчивые – инфицированные – получившие иммунитет) [9, 12, 15] и более поздней SEIR (susceptible – exposed – infected – removed, восприимчивые – находящиеся в латентном периоде – инфицированные – получившие иммунитет) [2].

Целью данной работы является оценка эффективности масочного режима на основе математической модели SEIQRD и определение минимальной доли населения, которой необходимо соблюдать масочного режима для подавления эпидемии. Основой для работы послужила статья [8], где рассматривается эффективность масочного режима в модели SEIR для США, Бразилии и Италии. По сравнению с упомянутой выше работой, здесь рассматривается более сложная модель SEIQRD, а также учитывается тот факт, что вероятность передачи инфекции между двумя индивидуумами, один из которых в маске, зависит от того, на больном или здоровом находится маска, в то время как в [8] эти вероятности считаются равными. Кроме того, в работе вычисляются ключевые показатели эпидемии: смертность и функционал, характеризующий нагрузку на систему здравоохранения (совокупная продолжительность больничного периода).

Работа состоит из 6 частей. Первая часть – это введение, во второй части описывается математическая модель SEIQRD.

В третьей части рассчитывается базовый показатель репродукции \mathcal{R}_0 . В четвертой части вычисляются эластичности \mathcal{R}_0 к параметрам модели и рассчитывается минимальный процент населения, которому необходимо соблюдать масочный режим для нераспространения эпидемии. Пятая часть посвящена результатам численного моделирования и вычислениям ключевых показателей эпидемии. Шестая часть содержит заключение и возможные направления будущих исследований.

1. Модель SEIQRD с масочным режимом

Модель SEIQRD – это усложнение модели SEIR [2], в которую добавлены компоненты Q – помещенные на каратин и D – умершие. Переменные S – восприимчивые (susceptible), E – находящиеся в латентном периоде (exposed) и I заболевшие (infectives) разделены на 2 группы: соблюдающих S_m, E_m, I_m и не соблюдающих S_n, E_n и I_n масочный режим. Итоговая система обыкновенных дифференциальных уравнений выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned}
 \frac{dS_n}{dt} &= -\frac{\beta S_n}{N}(I_n + r_I I_m), \\
 \frac{dS_m}{dt} &= -\frac{r_S \beta S_m}{N}(I_n + r_I I_m), \\
 \frac{dE_n}{dt} &= \frac{\beta S_n}{N}(I_n + r_I I_m) - \sigma E_n, \\
 \frac{dE_m}{dt} &= \frac{r_S \beta S_m}{N}(I_n + r_I I_m) - \sigma E_m, \\
 \frac{dI_n}{dt} &= \sigma E_n - \gamma I_n - \delta I_n - \mu I_n, \\
 \frac{dI_m}{dt} &= \sigma E_m - \gamma I_m - \delta I_m - \mu I_m, \\
 \frac{dQ}{dt} &= \delta(I_n + I_m) - \gamma Q - \mu Q, \\
 \frac{dR}{dt} &= \gamma(I_n + I_m + Q), \\
 \frac{dD}{dt} &= \mu(I_n + I_m + Q);
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где S_n, S_m – восприимчивые (susceptibles), E_n, E_m – находящиеся в латентном периоде (exposed), I_n, I_m – заболевшие

(infectives), индекс n и m означает соблюдение и не соблюдение масочного режима, Q – помещенные в карантин, R – выздоровевшие и получившие иммунитет, D – умершие; $\beta, \sigma, \delta, \gamma, \mu$ – соответственно интенсивности заражения, перехода из латентного периода E_n, E_m в заболевшие I_n, I_m , перехода из I_n, I_m в карантин Q , выздоровления и смерти; $r_I, r_S \in [0, 1]$ есть мультипликационные факторы маски, понижающие передачу инфекцию, где индекс I обозначает, что маска находится на заболевшем, а S – на восприимчивом. Считаем, что система замкнута, т.е. $S_n + S_m + E_n + E_m + I_n + I_m + Q + R + D = N$. Пусть p – начальная доля населения в маске, тогда pN – начальное число людей, соблюдающих масочный режим. Для упрощения модели считаем, что процент людей, соблюдающий масочный режим, остается постоянным, т.е. в системе нет прямого перехода между состояниями с индексами n и m .

2. Базовый показатель репродукции \mathcal{R}_0

Базовый показатель репродукции (basic reproduction number) \mathcal{R}_0 – эпидемиологическая величина, обозначающая среднее количество новых случаев инфицирования, генерируемых типичным инфицированным человеком, попавшим в полностью неиммунизированное окружение [1, 13]. С медицинской точки зрения считается, что распространение эпидемии может быть эффективно подавлено, если стратегии контроля и борьбы с эпидемией (карантин, масочный режим, вакцинация и др.) уменьшают базовый показатель репродукции \mathcal{R}_0 до значения меньше единицы. Базовый показатель репродукции \mathcal{R}_0 зависит от выбранной модели; для простейших моделей, таких как SIR ($\dot{S} = -\frac{\beta SI}{N}, \dot{I} = \frac{\beta SI}{N} - \gamma I, \dot{R} = \gamma I$) и SEIR ($\dot{S} = -\frac{\beta SI}{N}, \dot{E} = \frac{\beta SI}{N} - \sigma E, \dot{I} = \sigma E - \gamma I, \dot{R} = \gamma I$) базовый показатель репродукции $\mathbf{R}_0 = \frac{\beta}{\gamma}$ есть отношение коэффициентов заражения β и выздоровления γ . В более сложных моделях \mathcal{R}_0 может быть вычислен так называемым методом генерации матрицы нового поколения (next generation approach) [7, 14, 18, 19].

Вычислим \mathcal{R}_0 для системы (1) методом генерации матрицы нового поколения. Перепишем систему дифференциальных уравнений (1) в виде,

$$(2) \quad \dot{x} = f(x),$$

где $x = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9]^\top = [S_n, S_m, E_n, E_m, I_n, I_m, Q, R, D]^\top$.

Точками равновесия системы дифференциальных уравнений (2) называются точки, удовлетворяющие условию $x_{eq} : f(x_{eq}) = 0$. Точки равновесия, в которых отсутствуют индивиды в латентном периоде и заболевшие, называются точками равновесия без заболеваемости, или DFE (disease free equilibrium). Связь устойчивости точки DFE и величины \mathcal{R}_0 изучена в работе [19]. В частности показано, что при $\mathcal{R}_0 > 1$ точка DFE неустойчива и для начала эпидемии достаточно всего одного заболевшего. С другой стороны, при $\mathcal{R}_0 < 1$ точка DFE является локально асимптотически устойчивой.

Легко проверить, что $x_0 = ((1 - p)N, pN, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$ есть точка DFE для системы (2). Выделим $x_I = (E_n, E_m, I_n, I_m, Q)$ – инфекционные компоненты вектора x – таким образом:

$$(3) \quad \dot{x}_I = f_I(x).$$

Система (3) может быть записана в виде $f_I(x) = \mathcal{F}_I - \mathcal{V}_I$, где \mathcal{F}_I – вектор-столбец с поступлением новой инфекции, а \mathcal{V}_I – вектор-столбец переноса инфекции между компонентами:

$$(4) \quad \mathcal{F}_I = \begin{bmatrix} \frac{\beta S_n}{N} (I_n + r_I I_m) \\ \frac{r_S \beta S_m}{N} (I_n + r_I I_m) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathcal{V}_I = \begin{bmatrix} \sigma E_n \\ \sigma E_m \\ -\sigma E_n + (\gamma + \delta + \mu) I_n \\ -\sigma E_m + (\gamma + \delta + \mu) I_m \\ -\delta (I_n + I_m) + (\gamma + \mu) Q \end{bmatrix}.$$

Вычислим матрицы $F = \frac{\partial \mathcal{F}_I}{\partial x}(x_0)$, элементы которой неотрицательны, и $V = \frac{\partial \mathcal{V}_I}{\partial x}(x_0)$ – невырожденная так называемая M -матрица [3]. Под M -матрицей понимается матрица, такая что все

элементы обратной к ней матрицы неотрицательны.

$$(5) \quad F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \beta(1-p) & \beta r_I(1-p) & 0 \\ 0 & 0 & \beta r_{SP} & \beta r_S r_{IP} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$(6) \quad V = \begin{bmatrix} \sigma & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma & 0 & 0 & 0 \\ -\sigma & 0 & \gamma + \delta + \mu & 0 & 0 \\ 0 & -\sigma & 0 & \gamma + \delta + \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \gamma + \mu \end{bmatrix},$$

FV^{-1} называется матрицей нового поколения (next generation matrix), и базовый показатель репродукции \mathcal{R}_0 вычисляется следующим образом:

$$(7) \quad \mathcal{R}_0 = \rho(FV^{-1}),$$

где ρ обозначает спектральный радиус. Таким образом,

$$(8) \quad \mathcal{R}_0 = \frac{\beta(1-p(1-r_{IRS}))}{\gamma + \delta + \mu}.$$

3. Стратегии борьбы с эпидемией на основе \mathcal{R}_0 . Эффективность масочного режима и вакцинации

Эластичность — мера чувствительности одного из параметров к изменению другого, показывающая, на сколько процентов изменится первый показатель при изменении второго на 1%. Эластичность \mathcal{R}_0 к параметру x рассчитывается как $\epsilon_x^{\mathcal{R}_0} = \frac{\partial \mathcal{R}_0}{\partial x} \frac{x}{\mathcal{R}_0}$. Вычислим эластичности \mathcal{R}_0 к параметрам модели:

$$(9) \quad \begin{aligned} \epsilon_\beta^{\mathcal{R}_0} &= 1, & \epsilon_\sigma^{\mathcal{R}_0} &= 0, & \epsilon_p^{\mathcal{R}_0} &= \frac{p(r_I r_S - 1)}{r_I r_S - p + 1}, \\ \epsilon_\gamma^{\mathcal{R}_0} &= -\frac{\gamma}{-\delta + \gamma + \mu}, & \epsilon_\mu^{\mathcal{R}_0} &= -\frac{\mu}{-\delta + \gamma + \mu}, \\ \epsilon_\delta^{\mathcal{R}_0} &= -\frac{\delta}{\delta + \gamma + \mu}, & \epsilon_{r_I}^{\mathcal{R}_0} &= \epsilon_{r_S}^{\mathcal{R}_0} = \frac{p r_I r_S}{r_I r_S - p + 1}. \end{aligned}$$

Таким образом, величина \mathcal{R}_0 не зависит от σ , возрастает по β, r_I, r_S и убывает по γ, μ, δ, p .

Интенсивность заражения β является показателем заразности заболевания, а коэффициенты γ, μ зависят от достижений медицины в лечении данного заболевания и их невозможно изменить политикой государственных ограничений. Параметр δ показывает важность введенных карантинных мер и самоизоляции. Обозначим p^* – минимальную долю населения, которой необходимо соблюдать масочный режим для нераспространения эпидемии в точке DFE. Из части 2 следует, что эпидемия не будет развиваться при $\mathcal{R}_0 < 1$. Таким образом,

$$(10) \quad p^* = \frac{1}{1 - r_I r_S} \left(1 - \frac{\gamma + \delta + \mu}{\beta} \right).$$

То есть для того чтобы эпидемия не начала развиваться в точке DFE, необходимо соблюдения масочного режима более $p > p^*$ доли населения. Если $r_I = 0$ и $r_S = 0$, получаем, что ношение маски может означать полную непередачу инфекции и может интерпретироваться как вакцинация. Пусть p^{**} – минимальная доля населения, которую необходимо вакцинировать для нераспространения эпидемии в точке DFE, тогда

$$(11) \quad p^{**} = 1 - \frac{\gamma + \delta + \mu}{\beta}.$$

4. Численное моделирование

В Москве, как и в других частях мира, эпидемия коронавируса проходила волнами, после каждой волны происходил локальный спад, эпидемия шла на убыль, а потом снова вспыхивала в виде новой волны. В этом разделе моделируется одна из волн эпидемии в период с июня по сентябрь 2021 года в г. Москва. Параметры модели оцениваются методом наименьших квадратов, т.е. для различных параметров модели методом Рунге – Кутты моделируются системы дифференциальных уравнений (1) и минимизируется квадратичное отклонения между моделируемыми значениями и статистическими данными. Статистические данные содержат сведения по числу заболевших, выздоровевших и умерших. Число людей, которые могут потенциально заболеть,

вычисляется исходя из вышеуказанных данных и общего количества проживающих в г. Москва.

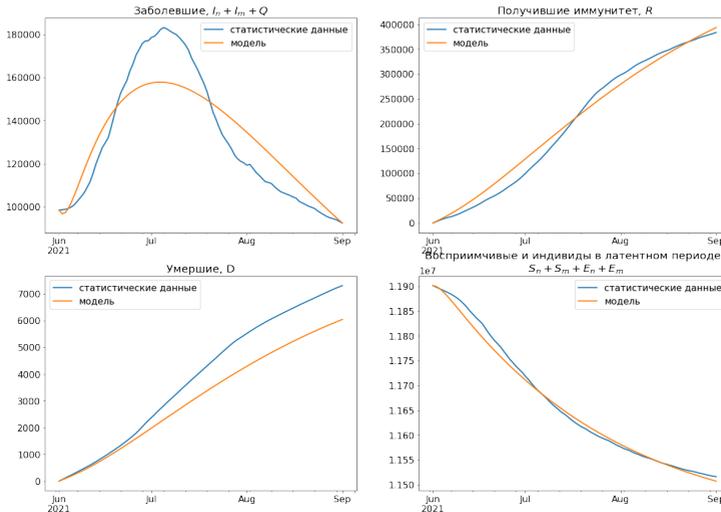


Рис. 1. Статистические данные и модель SEIQRD для г. Москва

Итак, в нашей модели статистическим данным о заболевших соответствует $I_n + I_m + Q$, о выздоровевших – R , умерших – D , и о тех, кто потенциально может заболеть, – $S_n + S_m + E_n + E_m$. Также полагаем, что параметр $p = 0,8$, т.е. предполагается, что большая часть людей добросовестна и соблюдает масочный режим. Согласно многим исследованиям в среднем $r_I = 0,3, r_S = 0,95$ [5, 6, 10, 16]. На рис. 1 представлены сравнения статических данных и модели. Значения оцененных параметров методом наименьших квадратов следующие: $\beta = 0,268, \gamma = 0,035, \sigma = 0,20, \delta = 0,18, \mu = 0,0005$. Таким образом, за данный период времени средняя продолжительность латентного периода равна $1/\sigma = 5$ дней, средняя продолжительность заболевания $1/\gamma = 28$ дней, и, согласно формуле (8), $\mathcal{R}_0 = 0,86$.

Промоделируем развития эпидемий с оцененными параметрами при разной степени соблюдения масочного режима ($p \geq 0,5$ – на рис. 2 и $p < 0,5$ – на рис. 3). Из рис. 2 видно, что при

$p = 0,8$, т.е. при условии соблюдения масочного режима более 80%, смертность падает в 5 раз по сравнению с гипотетическим соблюдением правил половиной населения, а количество заболевших на конец периода сокращается в 10 раз. Рис. 3 показывает сценарии развития эпидемии при малой степени соблюдения масочного режима, $p = 0$, т.е. при полном отсутствии масочного режима смертность и количество заболевших возрастают примерно в 4 раза по сравнению со случаем $p = 0,5$.

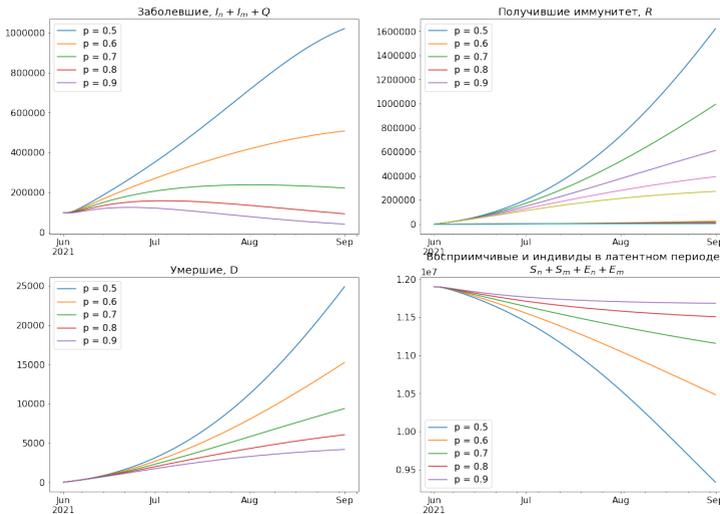


Рис. 2. Модель SEIQRD для г. Москва при $p \in [0,5, 0,9]$

Кроме сравнения конечного значения переменных моделей, вычислим функционал A – совокупное число больничного периода, характеризующий суммарную нагрузку на систему здравоохранения:

$$A = \int_0^{+\infty} [I_n(t) + I_m(t)] dt.$$

Результаты значения функционала A и показателя репродукции \mathcal{R}_0 при различных p приведены на рис. 4. Мы видим, что функционал A убывает достаточно быстро, и при соблюдении

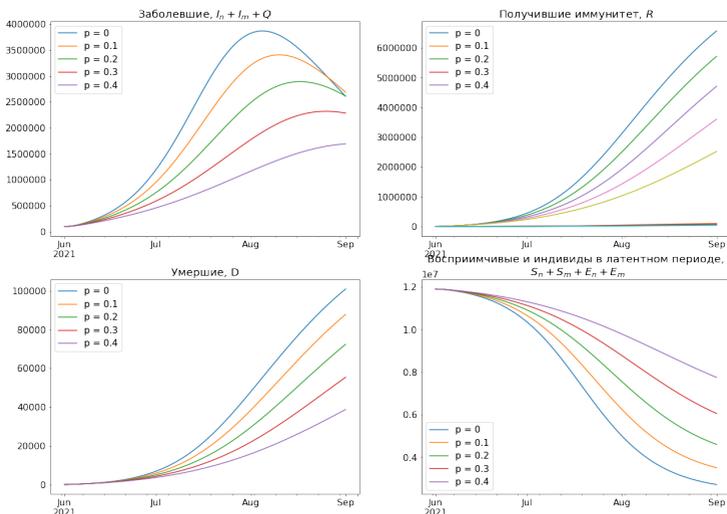


Рис. 3. Модель SEIQRD для г. Москва при $p \in [0, 0,4]$

масочного режима половиной население ($p = 0,5$) функционал A падает примерно в 5 раз. Показатель репродукции $\mathcal{R}_0(p)$, вычисленный согласно формуле (8), убывает линейно по p , и при $p = 0$, т.е. при полном отсутствии масочного режима, $\mathcal{R}_0(p) \approx 2$, что соответствует оценке распространения коронавируса, проведенной многими экспертами [4, 11, 17]. С учетом оцененных параметров модели вычислим минимальную долю населения p^* , которой необходимо соблюдать масочный режим для нераспространения эпидемии в рассматриваемую волну эпидемии. Согласно формуле (10), получаем $p^* \approx 0,7$, т.е. как минимум 70% населения необходимо соблюдать масочный режим.

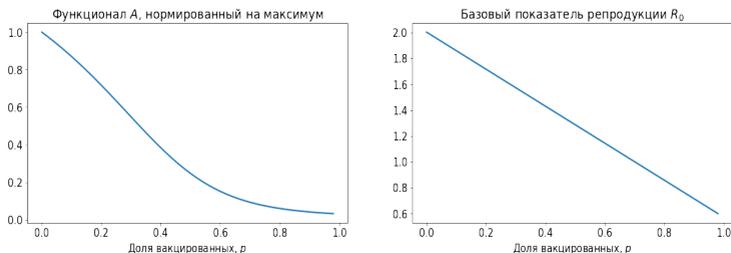


Рис. 4. Функционал A (слева) и базовый показатель репродукции \mathcal{R}_0 (справа)

5. Заключение

В работе рассмотрена модель SEIQRD, в которой ключевые переменные разделены на группы соблюдающих и не соблюдающих масочный режим. Для данной модели был рассчитан базовый показатель репродукции \mathcal{R}_0 . Из условия $\mathcal{R}_0 < 1$ выводится критическая доля населения p^* , которой необходимо соблюдать масочный режим для нераспространения эпидемии.

Методом наименьших квадратов проведена оценка параметров модели для одной из волн эпидемии в г. Москва и смоделированы сценарии развития эпидемий при различных p . Полученные результаты показывают, что при увеличении p существенно снижаются показатель репродукции (с 2 при полном отсутствии масочного режима до 0,6 при условии соблюдения масочных мер каждым индивидом), смертность и совокупная продолжительность больничного периода населения. Критическая доля населения, которой необходимо соблюдать масочный режим для нераспространения эпидемии для г. Москва, $p^* \approx 0,7$. Таким образом, приведенный анализ подтверждает правильность решения о действии масочного режима в г. Москва в период с июня по сентябрь 2021 года, а также показывает, что эпидемия во многих случаях может быть подавлена строгим соблюдением масочного режима.

Дальнейшие исследования могут быть связаны с расширением и усложнением модели, в том числе: изменение степе-

ни масочного режима с течением времени, введением в модель нескольких центров и миграции, построение объединенной модели для всех волн в течение периода эпидемии, а также рассмотрение масочного режима в стохастических моделях распространения эпидемии. В конечном счете в модель могут быть добавлены функционалы финансовой нагрузки на население, такие как стоимость страхового взноса и суммарные денежные потери от эпидемии.

Литература

1. ANDERSON R.M., MAY R.M. *Infectious Diseases of Humans: Dynamics and Control*. – Oxford University Press, Oxford, 1991. – 768 p.
2. ARON J.L., SCHWARTZ I.B. *Seasonality and period-doubling bifurcations in an epidemic model* // Journal of theoretical biology. – 1984. – Vol. 110, No. 4. – P. 665–679.
3. BERMAN A., PLEMMONS R. *Nonnegative Matrices in the Mathematical Sciences*. – Classics in Applied Mathematics. Society for Industrial and Applied Mathematics, 1994. – 360 p.
4. CHEN D., ZHOU T. *Evaluating the effect of chinese control measures on COVID-19 via temporal reproduction number estimation* // PLOS ONE. – 2021. – Vol. 16, No. 2. – P. 1–13.
5. CHENG Y., MA N., WITT C., RAPP S., WILD P., ANDREAE M., POSCHL U., HU S. *Face masks effectively limit the probability of SARS-CoV-2 transmission* // Science. – 2021.
6. CHUA M.H., GOH S.S., KONG J., LI B., LIM J.Y.C., MAO L., WANG S., XUE K., YANG L., YE E., ZHANG K., CHET W., CHEONG D., TAN B.H., LI Z., LOH X.J. *Face masks in the new COVID-19 normal: Materials, testing, and perspectives* // Research. – 2020.
7. DIEKMANN O., HEESTERBEEK J.A.P., METZ J.A.J. *On the definition and the computation of the basic reproduction ratio r_0 in models for infectious diseases in heterogeneous*

- populations* // Journal of Mathematical Biology. –1990. – Vol. 28, No.4. – P. 365–382.
8. GONDIM J.A. *Preventing epidemics by wearing masks: An application to COVID-19* // Chaos, Solitons & Fractals. – 2021. – Vol. 143.
 9. KERMACK W.O., MCKENDRICK A.G. *A contribution to the mathematical theory of epidemics* // Proc. of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. –1927. – Vol. 115, No. 772. – P. 700–721.
 10. LI T., LIU Y., LI M., QIAN X., DAI S.Y. *Mask or no mask for COVID-19: A public health and market study* // PLOS ONE. – 2020. – Vol. 15, No. 8. – P. 1–17.
 11. LOCATELLI I., TRACHSEL B., ROUSSON V. *Estimating the basic reproduction number for COVID-19 in western europe* // PLOS ONE. – 2021. – Vol. 16, No. 3. – P. 1–9.
 12. MACDONALD G. *The epidemiology and control of malaria.* – Oxford University Press, London, 1957. – 201 p.
 13. MACDONALD G. *The analysis of equilibrium in malaria* // Tropical diseases bulletin. – 1952. – Vol. 49, No. 9. – P. 813–829.
 14. MARTCHEVA M. *An Introduction to Mathematical Epidemiology.* – Springer US, 2015. – 453 p.
 15. ROSS R. *The Prevention of Malaria.* – John Murray Publishing House, London, 1910. – 669 p.
 16. SHAKYA K., NOYES A., KALLIN R., PELTIER R. *Evaluating the efficacy of cloth facemasks in reducing particulate matter exposure* // J Expo Sci Environ Epidemiol. – 2020. – Vol. 27, No. 3. – P. 352–357.
 17. SY K. T. L., WHITE L.F., NICHOLS B.E. *Population density and basic reproductive number of COVID-19 across united states counties* // PLOS ONE. –2021. – Vol. 16, No. 4. – P. 1–11.
 18. VAN DEN DRIESSCHE P. *Reproduction numbers of infectious disease models* // Infectious Disease Modelling. –2017. – Vol. 2, No. 3. – P. 288–303.

19. VAN DEN DRIESSCHE P., WATMOUGH J. *Reproduction numbers and sub-threshold endemic equilibria for compartmental models of disease transmission* // *Mathematical Biosciences*. –2002. – Vol. 180, No. 1. – P. 29–48.
20. WHO *Coronavirus disease 2019 (COVID-19): situation report* // World Health Organization. – 2020. – Vol. 51.
21. WHO *WHO coronavirus (COVID-19) dashboard* // World Health Organization. – 2021.

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF THE MASK REGIME DURING THE COVID-19 EPIDEMIC IN MOSCOW IN SEIQRD MODEL

Alexey Chernov, HSE University, Moscow, PhD student
(chernov125@mail.ru).

Abstract: The aim of this work is to evaluate the effectiveness of the widespread use of medical masks to control the epidemic. The epidemic spread is described by the model SEIQRD (susceptible – exposed – infected – quarantined – recovered – deaths), where the key variables responsible for the epidemic development are divided into 2 groups: complied and noncomplied to mask regime. The baseline reproduction rate, elasticities to model parameters, and the minimum percentage of the population that needs to adhere to the mask regime to prevent the epidemic are calculated for the model. Model parameters are estimated using statistical data from the COVID-19 epidemic in Moscow and then scenarios of the epidemic development with different degrees of mask compliance are numerically simulated.

Keywords: COVID-19, mask regime, epidemics, SEIR, reproduction number.

УДК 578

ББК 28.3

DOI: 10.25728/ubs.2022.97.3

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии Э.Ю. Калимулиной.*

Поступила в редакцию 26.04.2022.

Дата опубликования 31.05.2022.