

МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭПИДЕМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА, ВЫЗВАННОГО COVID-19

В.В. Бояринцев², Р.С. Пальмин¹, С.А. Пальмин^{1*}, С.Ф. Перцев¹

¹ 12 Центральный научно-исследовательский институт Министерства обороны РФ, Москва,

² ФГБУ ДПО «Центральная государственная медицинская академия» УД Президента РФ, Москва

A TECHNIQUE FOR PREDICTING PARAMETERS OF THE EPIDEMIC PROCESS CAUSED BY COVID-19

V.V. Boyarintsev², R.S. Palmin¹, S.A. Palmin^{1*}, S.F. Pertsev¹

¹ 12th Central Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Moscow, Russia,

² Central State Medical Academy of Department of Presidential Affairs, Moscow, Russia

E-mail: sergej-palmin@yandex.ru

Аннотация

Цель исследования – создание модели распространения эпидемического процесса, разработка на этой основе методов прогнозирования распространения заболевания и рекомендаций по прогнозированию развития эпидемии, обусловленной COVID-19.

Материал и методы. Предложена феноменологическая модель распространения эпидемического процесса в замкнутом конгломерате численностью N человек (без различия в возрасте, поле, условиях проживания и т.п.), не имеющих иммунитета к заражению распространяющимся вирусом. На ее основе получена зависимость для функции распределения доли инфицированных лиц во времени с момента начала эпидемического процесса и рекомендации по прогнозированию числа инфицированных лиц на разных стадиях развития эпидемии. Предложены методы определения параметров функции распределения доли инфицированных лиц каким-либо новым вирусом с учетом имеющихся данных по числу инфицированных в рассматриваемом регионе. На их основе представлены результаты прогнозирования развития эпидемии COVID-19 в различных регионах и странах мира. **Заключение.** Предложенная зависимость для функции распределения числа инфицированных лиц при эпидемии COVID-19 может рассматриваться в качестве альтернативы известным распределениям (нормальное распределение, распределение Эрланга и др.), а предложенный метод прогнозирования – методом прогнозирования развития эпидемического процесса на основе метода SIR.

Ключевые слова: эпидемия, COVID-19, модель распространения эпидемического процесса, пандемия.

Abstract

Purpose: To develop a model of epidemic process spreading; to use the obtained results for working out prognostic techniques on disease spreading as well as to elaborate recommendations on predicting the development of COVID-19 epidemics. **Material and methods.** A phenomenological model of epidemic process spreading in a closed conglomerate of N people (regardless of their age, gender, living conditions, etc.) who have no any immunity to the spreading virus is proposed. Using this model, the researchers calculated the dependence of distribution function of the portion of infected persons over time since the outbreak of the epidemic process. They also suggested recommendations for predicting the number of infected persons at different stages of the epidemic evolution. The researchers proposed techniques for defining parameters of the distribution function of the proportion of infected persons with a new virus, taking into account the available data on the number of infected persons in the analyzed region. The abovementioned techniques were used for predicting the COVID-19 epidemic process in various regions and countries of the world. **Conclusion.** The proposed dependence for the distribution function of the number of infected persons in the COVID-19 epidemic can be considered as an alternative approach to the known distributions (normal distribution, Erlang distribution, etc.), and the proposed predictive technique as an alternative approach to predicting the development of epidemic process calculated with SIR method.

Key words: COVID-19, epidemic, model of epidemic process, pandemic.

Ссылка для цитирования: Бояринцев В.В., Пальмин Р.С., Пальмин С.А., Перцев С.Ф. Метод прогнозирования параметров эпидемического процесса, вызванного COVID-19. Кремлевская медицина. Клинический вестник. 2020; 2: 14–21.

С начала 2020 г. основной лейтмотив новостной ленты связан с распространением пандемии, обусловленной новым, ранее не встречавшимся заболеванием новой коронавирусной инфекцией COVID-19.

Важнейшим инструментом при планировании мероприятий по предотвращению распространения эпидемического процесса является наличие обоснованного прогноза развития заболевания и методов оценки эффективности принимаемых мер.

Одним из признанных в настоящее время ведущими отечественными и зарубежными учеными является метод, основанный на модели, разработанной британскими учеными Андерсоном Кермаком и Уильямом Маккендриком [1, 2], известной как модель SIR. Эта аббревиатура происходит от английских слов Susceptible — Infected — Recovered, буквально означающих «восприимчивые — инфицированные — выздоровевшие». В соответствии с этой моделью в рассмотрение вводятся непрерывные дифференцируемые функции от времени t (t — время в сутках) $S(t)$, $I(t)$, $R(t)$ числа лиц соответствующей категории. Число летальных исходов рассчитывается при этом как некоторая доля от числа выздоровевших пациентов. Для функций $I(t)$, $R(t)$ записываются достаточно простые дифференциальные уравнения с соответствующими коэффициентами, функция $S(t)$ находится из уравнения баланса, отражающего условие того, что сумма всех категорий лиц равняется численности населения рассматриваемого региона.

Начиная с работ О.А.Барояна, Л.А.Рвачева и Ю.Г.Иванникова [3, 4], в практику отечественной эпидемиологии вошли математические модели, построенные на основе феноменологии эпидемического процесса типа SEIRF ($S(t)$ — восприимчивые, $E(t)$ — индивидуумы, находящиеся в инкубации, $I(t)$ — индивидуумы с клиническими проявлениями инфекционной болезни, $R(t)$ — выздоровевшие, $F(t)$ — умершие).

Среди последних работ этого направления, посвященных исследованию эпидемии COVID-19, можно отметить работу Z.Yang и соавт. [5], в которой исследовались тенденции развития эпидемии в Китае в рамках мероприятий общественного здравоохранения.

Не вдаваясь в подробности построения общеизвестных систем дифференциальных уравнений, соответствующих методам SIR и SEIRF, отметим следующие обстоятельства:

большинство исследователей эпидемии COVID-19 на основе этих методов отмечают неустойчивость получаемых решений, что препятствует разработке обоснованных прогнозов развития эпидемического процесса на период, превышающий 1 нед.

в соответствии с моделью SIR прекращение эпидемического процесса обуславливается применением директивных мер вмешательства, направленных на сокращение контактов инфицированных лиц с контактным контингентом, а также разработкой соответствующей вакцины; при этом без ответа остается вопрос о риске последующего заболевания людей, не приобретших иммунитет в результате перенесения заболевания или вак-

цинации. Отсюда неизбежно возникает риск возникновения второй волны эпидемического процесса, что затрудняет решение вопроса об отмене введенных ограничительных мер вмешательства и возвращении экономики региона в нормальное русло.

Причина неустойчивости расчетов по методу SIR объясняется следующим обстоятельством. Уравнение баланса для функций $S(t)$, $I(t)$, $R(t)$ в данном методе записывается для текущего момента времени t , в то время как более логичным было бы считать, что $R(t) \equiv I(t-t')$ (считая, что функция $R(t)$ описывает общее число выздоровевших и умерших пациентов), где t' — среднее время выздоровления (летального исхода).

При таком подходе основной зависимостью, определяющей характер развития эпидемического процесса, является общее число инфицированных лиц в зависимости от времени.

Основное внимание в представленной работе уделено выявлению закономерностей развития эпидемического процесса на основе анализа общего числа $I(t)$ инфицированных лиц. Дополнительным аргументом в пользу использования такого подхода выступает тот факт, что этот параметр является обязательным элементом открытой статистики динамики развития эпидемического процесса во всех регионах мира.

Вопрос о возможности развития второй волны эпидемического процесса после окончания первой в настоящее время не имеет определенного решения. В рамках данного исследования он рассмотрен на основе одной из возможных гипотез о закономерностях распространения COVID-19.

Материалы и методы

В качестве основы для разработки метода прогнозирования параметров эпидемического процесса в конкретной стране (конкретном регионе) предложена модель распространения эпидемического процесса, учитывающая имеющиеся статистические данные о числе зарегистрированных случаев заболевания на момент начала прогнозирования. Соответствующие сведения размещены на многих сайтах в интернете.

В табл. 1 приведены данные об общем числе инфицированных лиц на момент практического окончания эпидемического процесса в некоторых странах Азии, Европы, Австралии и Новой Зеландии.

Отметим, что ни в одной стране, в которой завершилась эпидемия вируса COVID-19, не была зафиксирована вторичная волна заболевания. Данное обстоятельство позволяет предположить, что параметр q может рассматриваться как один из

Доля q инфицированных лиц от численности населения стран на момент окончания эпидемического процесса

Страна	Оценка численности населения, N , млн человек.	Общее число заболевших (официальные данные), Nq , тыс. человек	$q = \frac{Nq}{N}$
Азия, Австралия и Океания			
КНР	1500	84	$5.6 \cdot 10^{-5}$
Южная Корея	5.14	10.74	$2.0 \cdot 10^{-5}$
Таиланд	65.70	3	$4.6 \cdot 10^{-5}$
Австралия	25	6.80	$2.7 \cdot 10^{-4}$
Новая Зеландия	4.95	1.50	$3.0 \cdot 10^{-4}$
Европа			
Швейцария	8.45	30	$3.6 \cdot 10^{-3}$
Израиль	9.14	16.30	$1.8 \cdot 10^{-3}$
Австрия	8.86	16	$1.8 \cdot 10^{-3}$
Норвегия	5.30	8	$1.5 \cdot 10^{-3}$
Чехия	10.60	8	$7.5 \cdot 10^{-4}$
Люксембург	0.58	3.90	$6.8 \cdot 10^{-3}$
Греция	10.75	2.70	$2.0 \cdot 10^{-4}$
Хорватия	4.16	2.10	$5.0 \cdot 10^{-4}$
Словения	2.08	1.45	$7.0 \cdot 10^{-4}$
Словакия	5.46	1.41	$2.6 \cdot 10^{-4}$

основных параметров эпидемического процесса в каждом регионе.

На этой основе была предложена модель роста общего числа $I(t)$ инфицированных лиц, основанная на следующих гипотезах:

– население страны (региона) представляет собой некоторый конгломерат численностью N человек без различия в возрасте, поле, условиях проживания и т.п.;

– в начальный момент развития эпидемического процесса в стране (регионе) имеется N_0 инфицированных лиц, зараженных новым вирусом;

– общее количество N_q инфицированных в результате эпидемического процесса лиц составляет некоторую неизвестную в настоящий момент долю q от всего населения: $N_q = q N$;

– вероятность заражения здорового лица в результате единичного контакта с заболевшим лицом оценивается некоторой неизвестной средней величиной p_0 ;

– ежедневное среднее количество контактов заболевшего лица со здоровыми людьми характеризуется параметром N_k ;

– общее количество заболевших лиц в любой день эпидемического процесса зависит от их количества в предыдущий день по одному и тому же закону;

– после выздоровления человек в течение достаточно длительного времени имеет иммунитет к повторному заражению.

С учетом введенных предположений общее количество I_n инфицированных лиц (в том числе переболевших) в n -ый день эпидемического процесса можно оценить по следующим рекуррентным соотношениям:

$$n = 0: I_0 = N_0;$$

$$n \geq 1: I_n = I_{n-1} \times \left(1 + \lambda \times \left(1 - \frac{I_{n-1}}{N_q} \right) \right), \quad (1)$$

где $\lambda = p_0 \times N_k$.

Для удобства анализа принято, что неизвестный параметр $\lambda = p_0 \times N_k$, характеризующий рост числа инфицированных в результате заражения инфицированным лицом здоровых лиц, можно условно представить в виде произведения двух неизвестных сомножителей, первый из которых является постоянным для всех рассматриваемых условий распространения вируса и представляет собой среднюю вероятность заражения здорового лица в результате единичного контакта с заболевшим лицом (для определенности было принято, что $p_0 = 0.067$), а второй – характеризует сред-

нее число здоровых лиц, с которыми у заболевшего лица в течение дня может произойти потенциально опасный контакт.

По своему физическому смыслу параметр λ на начальном этапе эпидемического процесса (когда число заболевших лиц существенно меньше численности населения) представляет собой вероятность того, что один инфицированный человек в течение дня заразит не менее одного здорового.

С развитием эпидемического процесса данная вероятность в связи с ростом числа инфицированных лиц уменьшается, что учитывается в выражении (1) с помощью сомножителя $\left(1 - \frac{I_{n-1}}{N_q}\right)$.

Величина λ является вторым основным параметром эпидемического процесса.

В устойчивый период развития эпидемического процесса, характеризующийся постоянным значением $\lambda = const$, для модели развития эпидемического процесса, описываемой рекуррентными формулами (1), может быть записано эквивалентное обыкновенное дифференциальное уравнение:

$$\frac{dI(t)}{dt} = \lambda \times I(t) \times \left(1 - \frac{I(t)}{N_q}\right), \quad (2)$$

с начальными условиями: $t = 0; I(0) = N_0$.

Решение этого уравнения для общего числа $I(t)$ инфицированных лиц и ежесуточного прироста их числа $I_i(t)$ имеют вид:

$$I(t) = \frac{N_q \cdot e^{\lambda t}}{\frac{N_q}{N_0} - 1 + e^{\lambda t}}, \quad (3)$$

$$I_i(t) = \frac{dI(t)}{dt}$$

Запишем выражение (3) в приведенном виде для доли $Y(t)$ числа заболевших лиц в момент времени t от всего числа заболевших лиц N_q :

$$Y(t) = \frac{e^{\lambda t}}{\frac{N_q}{N_0} - 1 + e^{\lambda t}}.$$

$$Y_i(t) = \frac{dY(t)}{dt} \quad (4)$$

Выражение (4) может рассматриваться как функция распределения числа инфицированных лиц в зависимости от времени с некоторого начального момента $t = 0$, в который было зафиксировано число инфицированных лиц, равное N_0 . В

силу свойств модели (1) (см. формулу (1)) в качестве момента $t = 0$ может быть выбрана любая дата в период эпидемического процесса.

С учетом полученных выражений для функции распределения числа инфицированных лиц в ходе эпидемического процесса можно предложить следующий алгоритм оценки эффективности управленческих решений по введению мер вмешательства в процесс развития эпидемического процесса. Отметим, что в рамках предложенной модели меры вмешательства могут повлиять только на длительность периода эпидемического процесса, число общее число инфицированных лиц от этих мер не зависит.

В начальный период эпидемического процесса значение параметра λ может быть определено с помощью формулы (1). При условии, что $\frac{I_{n-1}}{N_q} = o(1)$,

выражение (1) может быть записано в виде:

$$\begin{aligned} n = 0: I_0 &= N_0; \\ n \geq 1: I_n &= I_{n-1} \times (1 + \lambda). \end{aligned} \quad (5)$$

Как правило, именно в этот период оперативными штабами принимаются последовательные по жесткости меры вмешательства (предупреждение об опасности, введение режима самоизоляции, карантин, чрезвычайного положения и т.п.). Предполагая наличие недельной цикличности роста числа инфицированных лиц, можно записать следующие выражения:

$$\begin{aligned} \text{при } n \leq 7 \quad I_n &= N_0 \times (1 + \lambda_1)^n; \\ \text{при } 7 < n \leq 14 \quad I_n &= I_7 \times (1 + \lambda_2)^{n-7}; \\ \text{при } 14 < n \leq 21 \quad I_n &= I_{14} \times (1 + \lambda_3)^{n-14}; \end{aligned} \quad (6)$$

и т.д.

В соответствии с выражениями (6) для величин $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \dots$ и соответствующих им значений параметра N_{ki} можно получить следующие оценки:

$$\lambda_i = \left(\frac{I_{7xi}}{I_{7 \times (i-1)}} \right)^{1/7} - 1, \quad N_{ki} = \lambda_i / p_0 \text{ при } i = 1, 2, 3 \dots (7)$$

Следует ожидать, что значения параметра λ , полученные на основе анализа данных для первой и второй недели, будут оценкой параметра λ для нормальных условий жизнедеятельности региона.

Решение о достаточности (недостаточности) мер вмешательства принимается на основе анализа прогнозных значений числа инфицированных лиц и их ежесуточного прироста по формуле (3) с учетом полученных значений $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$. При этом не-

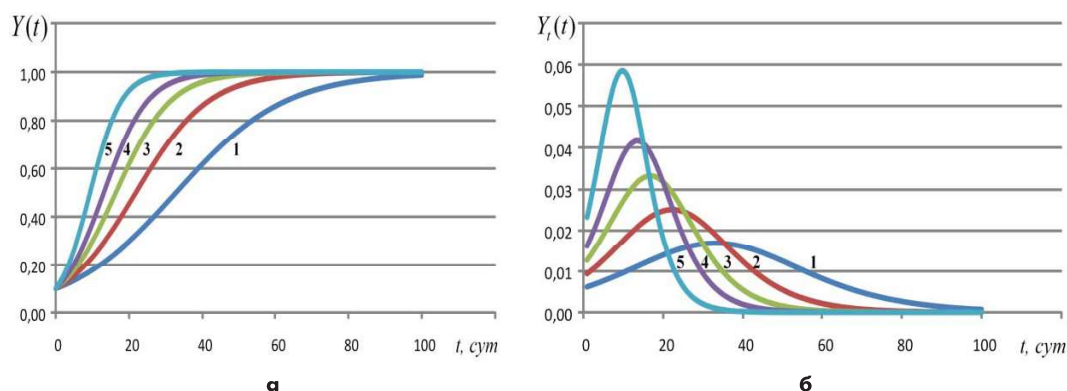


Рис. 1. Оценка эффективности мер вмешательства при их применении в начальный период развития эпидемического процесса при $N_0/N_q = 0$: 1 – $N_k = 1$; 2 – $N_k = 1,5$; 3 – $N_k = 2$; 4 – $N_k = 2,5$; 5 – $N_k = 3,5$.

обходимо иметь в виду, что на начальном периоде эпидемического процесса оценить величину параметра q не представляется возможным.

Временные характеристики эпидемического процесса могут быть оценены с помощью формул (4).

В качестве примера на рис. 1 представлены результаты оценки динамики изменения относительной доли $Y(t)$ инфицированных лиц и ее ежедневного прироста $Y_i(t)$ при возможных сценариях принятых мер вмешательства на этапе, когда число инфицированных лиц составляет 10% от общего числа инфицированных лиц на момент окончания эпидемического процесса. В качестве функций, характеризующих данный процесс, при построении графиков, представленных на рис. 1, выбраны функции $Y(t)$ и $Y_i(t)$ (см. формулу (4)).

Приведенные данные позволяют оценить влияние мер вмешательства на временные параметры развития эпидемического процесса в регионе.

В том случае, если стратегия мер вмешательства выбрана (тем самым зафиксировано значение параметра λ), дальнейшее уточнение прогноза происходит за счет последовательного уточнения параметра q для данного региона в процессе развития эпидемического процесса. В силу симметричности распределения (3) достаточно точную оценку значения параметра q можно получить по формуле:

$$q = 2 \times \frac{I(t_p)}{N}, \quad (8)$$

где t_p – время достижения максимального прироста числа инфицированных лиц.

При предварительных расчетах по формулам (3) в качестве оценочного значения величины параметра q должно выбираться экспертным путем.

Следует подчеркнуть, что выражения (3), (4) получены без учета специфических свойств распространения вируса COVID-19 и могут быть использованы при оценке последствий возникновения новой эпидемии другого типа.

Анализ результатов развития эпидемического процесса COVID-19 в различных странах показывает, что эпидемия прекращается даже в тех странах, правительства которых не предпринимало мер по введению режима самоизоляции, карантина, чрезвычайного положения и т.п. Данное обстоятельство должно быть объяснено в рамках модели развития эпидемического процесса. В соответствии с моделями, основанными на методах модели SIR, доля населения большинства развивающихся и отсталых стран, переболевшего новым вирусом, и длительность эпидемического процесса должны быть большими, чем соответствующие параметры в развитых странах, что явно противоречит наблюдающимся фактам.

Одним из следствий предложенной модели распространения эпидемического процесса является возможность приблизительно определить дату появления «нулевого» пациента, инфицированного COVID-19.

Считая, что «нулевой» пациент появился в одной из стран, в которых эпидемия закончилась раньше всех, получим, что такой страной является КНР.

Строгий карантин был введен в КНР 01.02.2020. На основе анализа величин λ в предшествующий период можно построить ретроспективную кривую развития эпидемического процесса в КНР в предшествующий период. Важным обоснованием такого подхода является то, что соответствующая данному периоду развития эпидемического процесса величина параметра λ практически не зависит от значения параметра q .

Результаты

Для проверки адекватности уравнения (2) и соответствующего ему решения (3) применим полученные зависимости к анализу ситуации в США, Великобритании и Японии.

В качестве примера на рис. 2, 3, 4 приведены результаты расчета по формулам (3) и фактиче-

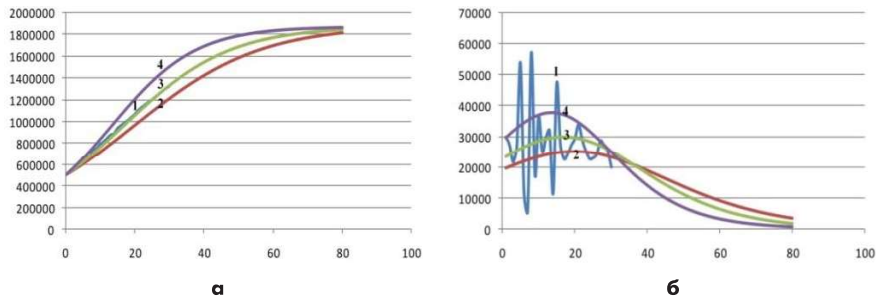


Рис. 2. Прогноз числа инфицированных лиц в США ($q = 061$; $t = 0$ соответствует 10.04.2020; $N_0 = 502878$): 1 – факт; 2 – $N_k = 1$; 3 – $N_k = 1.1$; 4 – $N_k = 1.3$

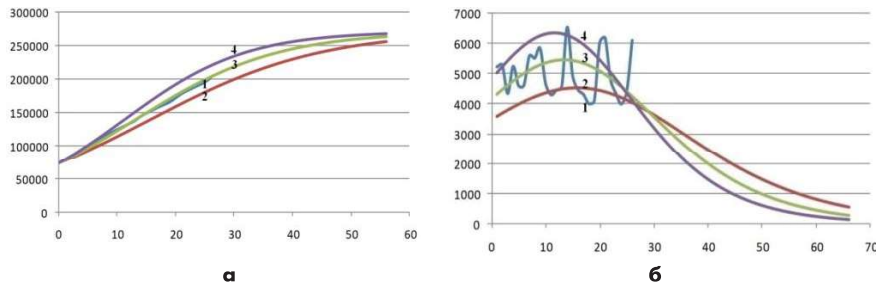


Рис. 3. Прогноз числа инфицированных лиц в Великобритании ($q = 042$; $t = 0$ соответствует 10.04.2020 г.; $N_0 = 73758$): 1 – факт; 2 – $N_k = 1$; 3 – $N_k = 1.2$; 4 – $N_k = 1.4$

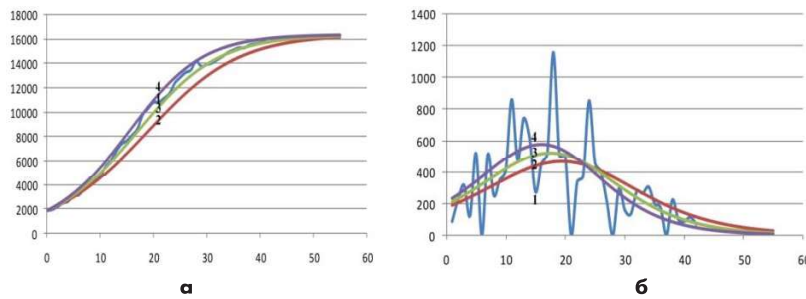


Рис. 4. Прогноз числа инфицированных лиц в Японии ($q = 0013$; $t = 0$ соответствует 30.03.2020; $N_0 = 1866$): 1 – факт; 2 – $N_k = 1$; 3 – $N_k = 1.2$; 4 – $N_k = 1.4$

ские данные по состоянию на 10.05.2020 о числе инфицированных лиц (рис. а) и их ежесуточного прироста (рис. б). На оси абсцисс на этих рисунках отложено число суток после даты, указанной в подрисуночной подписи, на оси ординат указано общее число заболевших лиц. Оптимальные значения параметра q при расчетах выбирались на основе численного эксперимента с учетом соотношения

$$N_q = 2 \times I(t_p), \quad (11)$$

где t_p – время достижения максимального значения функцией $I_i(t)$.

Представленные данные показывают удовлетворительное совпадение расчетов числа инфицированных лиц по формулам (3), (5) с фактическими данными.

Рассмотрим применение разработанного методического аппарата к прогнозу развития эпидемического процесса на примере Москвы.

В качестве начальной даты ($n = 0$) выберем 17.03.2020 ($I_0 = 55$). Значения параметров λ и N_k в последующие 5 нед, рассчитанные по формулам (9), приведены в табл. 2.

При прогнозе развития эпидемического процесса в Москве примем, что $q = 0.0145$. Графики

Таблица 2

Значения параметров λ и N_{ki} для Москвы, рассчитанные для начальных периодов эпидемического процесса

Параметр	Период времени, i				
	1	2	3	4	5
	17.03–23.03	24.03–30.03	31.03–6.04	07.04–13.04	14.04–20.04
	0.25	0.29	0.16	0.12	0.11
N_{ki}	3.7	3.4	2.3	1.8	1.6

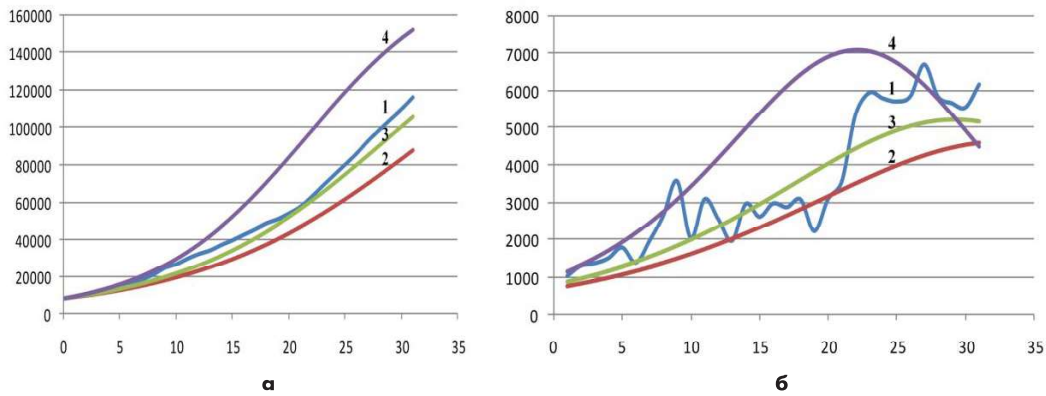


Рис. 5. Расчет числа инфицированных лиц в Москве ($q = 0,0145$; $t = 0$ соответствует 10.04.2020; $N_0 = 7822$): 1 – факт; 2 – $N_k = 1.5$; 3 – $N_k = 1.7$; 4 – $N_k = 2.3$

прогнозного числа инфицированных лиц в Москве для данного значения q и различных значений параметра N_k , рассчитанные для начального момента времени, соответствующего дате 10.04.2020, представлены на рис. 5.

Графики рис. 5 показывают, что наилучшее соответствие расчетных и фактических данных по числу инфицированных лиц достигается при $q = 0,0145$ и $N_k = 1,7$.

На этой основе рассмотрим вопрос о целесообразности ослабления изоляционных мер, принятых оперативным штабом Москвы в период с 12.05.2020. Для сравнения рассмотрим два варианта: 1) полное снятие всех мер по самоизоляции граждан, что соответствует значению параметра $N_k = 3.4$ (см. табл. 2); 2) частичное снятие изоляционных мер, достигнутое к 06.04.2020 ($N_k = 2.3$); 3) сохранение режима самоизоляции, достигнутого к 12.05.2020 ($N_k = 1.7$). Прогнозы развития эпидемического процесса, начиная с 12.05.2020, соответствующие этим сценариям, и фактические данные представлены на рис. 6.

Анализ полученных результатов показывает, что они могли бы стать основой принятия управленческих решений по сохранению (смягчению) режима самоизоляции в Москве, как с 12.05.2020,

так и с любой последующей даты. При этом видно, что относительное смягчение режима самоизоляции, разрешенное руководством Москвы, существенно не повлияло на общие тенденции динамики роста числа инфицированных лиц. Данное обстоятельство позволяет обосновать возможность вывода Москвы из режима самоизоляции без роста числа инфицированных лиц с последовательным смягчением изоляционных мер.

Очевидно, что аналогичный анализ может быть произведен для любого другого региона.

Выводы

Представленные в статье материалы подтверждают принципиальную возможность прогнозирования развития эпидемического процесса в различных регионах на основе предложенного метода.

Показано, что в процессе развития эпидемического процесса прогноз его развития может уточняться с учетом мер вмешательства, применяемых оперативными штабами.

Меры вмешательства, применяемые оперативными штабами в процессе развития эпидемического процесса, позволяют замедлить рост числа инфицированных лиц, но не влияют на их общее число за период эпидемии.

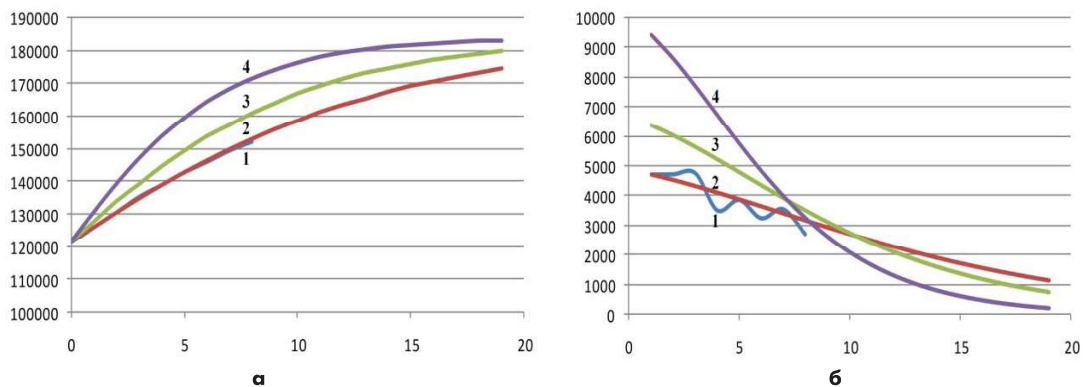


Рис. 6. Прогноз числа инфицированных лиц в Москве ($q = 0,0145$; $t = 0$ соответствует 12.05.2020; $N_0 = 121497$): 1 – факт; 2 – $N_k = 1.7$; 3 – $N_k = 2.3$; 4 – $N_k = 3.4$

Число лиц, инфицированных в странах Азиатского континента, в большинстве случаев существенно отличается от числа лиц, инфицированных в европейских странах и США.

Представленные в статье результаты могут быть полезными при принятии управленческих решений о продлении (частичной отмене) режима самоизоляции.

Литература

1. Kermack W. O., McKendrick A. G. Contributions to the mathematical theory of epidemics? Further studies of the problem of endemicity // *Bulletin of mathematical biology*. — 1991. — V. 53. — №. 1-2. — P. 89-118.

2. Андерсон Р., Мэй Р. Инфекционные болезни человека. Динамика и контроль: пер. с англ. М.: Мир, Научный мир; 2004. С. 784. [Anderson R., May R. *Human Infectious Diseases. Dynamics and control: Per. from English* // Moscow: Scientific World. — 2004. In Russian].

3. Рвачев Л. А. Моделирование медико-биологических процессов в обществе как раздел динамики сплошных сред // Доклады Академии наук. — Российская академия наук, 1972. — Т. 203. — №. 3. — С. 540-542. [Rvachev L. A. *Modeling of biomedical processes in society as a section of the dynamics of continuous media* // *Doklady Akademii Nauk. - Russian Academy of Sciences*, 1972. — Т. 203. — №. 3. — P. 540-542. In Russian].

4. Бароян О. В., Рвачев Л. А., Иванников Ю. Г. Моделирование и прогнозирование эпидемий гриппа для территории СССР // М.: Институт эпидемиологии и микробиологии им. НФ Гамалеи АМН СССР. — 1977. С. 546. [Baroyan O. V., Rvachev L. A., Ivannikov Yu. G. *Modeling and forecasting of influenza epidemics for the territory of the USSR* // Moscow: Institute of Epidemiology and Microbiology named after N.F. Gamalei AMS USSR. — 1977. — P. 546. In Russian].

5. Yang Z. et al. Modified SEIR and AI prediction of the epidemics trend of COVID-19 in China under public health interventions // *Journal of Thoracic Disease*. — 2020. — V. 12. — №. 3. — P. 165. doi: 10.21037/jtd.2020.02.64.