

## Коронавирусное благоухание

*Я.М. Хазан, 2020*

Франкфурт-на-Майне, Германия

Поступила 5 сентября 2020 г.

*Все должно быть сделано настолько просто,  
насколько возможно, но не проще.*

A. Einstein [1934]

Показано, что динамика развития эпидемии и общее количество заболевших вирусным заболеванием в замкнутом сообществе критически зависят от длительности периода контагиозности вируса. Время, в течение которого инфицированный человек остается заразным, ограничивается либо его изоляцией, либо естественным уменьшением активности вируса. Из лабораторных данных об изменении активности вируса COVID-19 со временем и на основе изучения динамики эпидемии в различных сообществах следует, что если изоляция инфицированного человека не используется эффективно для борьбы с эпидемией, то индивид, в среднем, остается заразным в течение 9—10 дней после инфицирования. Как показывает моделирование, в этом случае инфицированы будут примерно 15 % замкнутой популяции (включая бессимптомные случаи). Поскольку лишь примерно 20 % инфицированных обращается к врачу и регистрируется в статистике, то следует ожидать, что количество зарегистрированных случаев составит примерно 3 % популяции. В настоящее время только Израиль достиг этого порога.

**Ключевые слова:** COVID-19, период контагиозности, динамика эпидемии.

**Введение.** К коронавирусной ситуации можно притерпеться, как к дурному запаху, но забыть она о себе не дает. У меня на стене с докоронавирусных времен висит китайская резба по дереву, изображающая двух драконов. Раньше не обращал внимания, а сейчас бросилось в глаза, что в самом центре, там, куда направлено внимание драконов, кружок с отростками, удивительно похожий на коронавирус, как он выглядит под электронным микроскопом. Да и чешуйчатые драконы смахивают на помесь летучей мыши с панголином...

Начало карантина наложилось на очередную годовщину Чернобыльской катастрофы. И карантинное состояние напомнило мне 86-й год в Киеве. Такая же невидимая, неслышимая и неосязаемая опасность, такая же замечательная погода и отсутствие детей на улицах. Разве что

маски в Киеве тогда не носили, хотя временами это было бы совсем не лишним, поскольку любой ветерок мог поднять с земли радиоактивные пылинки. Как и тогда, хотелось понять, насколько реальна опасность, и когда все это (благополучно) закончится. Как и в 86-м, сейчас у рядового гражданина в руках весьма мало средств для оценки ситуации. Но кое-что можно понять даже с теми небольшими возможностями, которыми мы располагаем. Об этом и пойдет речь ниже.

Математическая эпидемиология имеет длинную историю, отсчитываемую обычно от работы Д. Бернулли середины 18 в., который оценил, как увеличилась бы средняя продолжительность жизни, если бы удалось избавиться от эпидемий оспы. С последующей увлекательной историей эпидемиологии желающие могут позна-

комиться в обзоре [Dietz, Schenzle, 1985], а более современные методы изложены в работах Brauer [2008], Wu [2008], van den Driessche, Watmough [2008], Neher et al. [2020], Allen [2008]. К сожалению, решение очень заманчивой задачи прогнозирования развития эпидемии в реальном времени, по-видимому, не является достижимым. Как подчеркивает Buchanan [2020], даже в тех случаях, когда модели развития эпидемии не сводятся к простой экстраполяции эмпирических данных, трудно ожидать, что результаты моделирования напрямую применимы к предсказанию развития реальной ситуации. Тому есть объективные и субъективные причины. К объективным следует отнести то, что большая часть информации, необходимой для построения детализированной модели, может стать доступной в полной мере только спустя некоторое время после окончания эпидемии. В частности, чтобы оценить, насколько велик процент людей, которые болеют бессимптомно, оставаясь переносчиками заболевания [Rothe et al., 2020], а также выяснить, сохраняют ли переболевшие иммунитет к заболеванию и в течение какого времени, требуется неоднократное, повторяющееся массовое тестирование. Дополнительно, разработка моделей затрудняется возможным сезонным характером заболевания [Cobey, 2020; Neher, 2020], что в случае COVID-19 проявляется, например, как несинхронность эпидемии в северном и южном полушариях Земли. Наконец, без специальных исследований невозможно определить, одинаков ли штамм инфекции в разных странах и есть ли этническая, расовая и поведенческая составляющая в различиях между развитием эпидемии в них.

К субъективным факторам, затрудняющим разработку моделей в разгар эпидемии, следует отнести, прежде всего, неполноту и низкое качество данных. Данные поступают с задержкой, подвергаются последующим коррекциям, время от времени происходит изменение критериев, по которым случаи относятся к тем или иным группам, и/или изменение карантинных огра-

ничений. Известный пример — это вопрос о том, следует ли смерть с коронавирусом регистрировать как смерть от коронавирусной инфекции. Наиболее удивительным проявлением низкого качества данных является так называемая «исчезнувшая смертность», когда зарегистрированная смертность от COVID-19 оказывается значительно ниже разности между реальной смертностью и многолетним средним [Wu et al., 2020; Viglione, 2020]. После окончания эпидемии статистика (возможно) будет приведена в порядок, но в настоящее время модели могут опираться только на сравнительно низкокачественные данные. Поэтому, например, стохастические модели, в которых имитируется поведение отдельных людей и которые требуют введения огромного количества предположений, не эффективны в качестве инструмента моделирования в реальном времени.

Возникает вопрос, имеет ли, вообще, смысл в этой ситуации заниматься моделированием? Несколько парадоксальный ответ на этот вопрос дали Thompson and Smith [2019]: если невозможно построить модели, которые позволяют прогнозировать будущее развитие ситуации, то имеет смысл, сопоставляя модель с реальной ситуацией, выяснить, в чем причины отклонения первой от второй. Ниже мы воспользуемся так называемой компартментной моделью, предложенной в 1927 г. Кермаком и МакКендриком [Kermack, McKendrick, 1927; Brauer, 2008] (от английского compartment, здесь: группа). В этой модели популяция разбивается на несколько групп, и изменение их численности описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений. Простейший вариант такой модели — SIR-модель, в которой популяция разбивается три группы S — susceptible (уязвимая), I — infected (инфицированная) и R — recovered (восстановившаяся). Предполагается, что члены S группы при контакте с членами группы I могут быть инфицированы (если речь идет о заболевании; модель может быть использована и в других случаях, например, для анализа распространения слухов). Группа

R включает тех, кто уже не является «разным», например, потому что переболел (или скончался) или был изолирован. В такой, простейшей модели предполагается, что инфицированная группа является «разной» неограниченное время, начиная от момента инфицирования. В действительности симптомы любой болезни проявляются спустя некоторое время после инфицирования, по окончании инкубационного периода. При этом в некоторых случаях заражение становится возможным до окончания инкубационного периода.

В настоящей статье представлены модели развития коронавирусной эпидемии в четырех странах: Германии, Израиле, Украине и США. Как мы увидим, Германию и Израиль можно характеризовать как эталонные страны, США — антиэталонную. Украина для нас представляет наибольший интерес.

Модель ниже основывается на следующих предположениях:

1) в событии инфицирования всегда участвуют два индивидуума — один является источником инфекции, а второй — реципиентом. То, что передача инфекции не всегда сопровождается непосредственным контактом, не принципиально (например, если инфицирование произошло в помещении, скажем в лифте, в котором вначале побывал один, а потом второй). Важно, что никакие дополнительные переносчики инфекции (например, животные) в этом не участвовали;

2) симптомы заболевания проявляются (если проявляются) через 4,5—5,8 дней после инфицирования, т. е. средний инкубационный период болезни составляет около 5 дней [Lauer et al., 2020; Sanche et al., 2020];

3) инфицированный человек может быть источником инфекции за несколько дней до проявления первых симптомов;

4) после изоляции или выздоровления человек более не является источником инфекции и имеет иммунитет от болезни.

Важно понимать, как, в целом, развивается эпидемия. Это можно оценить только после ее окончания. В настоящее время (сентябрь 2020) есть два исследования

сообществ, которые после начала эпидемии были изолированы от внешнего мира. Первое исследование относится к эпидемии в округе Хайнсберг (Северный Рейн—Вестфалия, Германия), с которого началась эпидемия в Германии [Streek et al., 2020]. Вспышка произошла после карнавала с примерно 300 участниками, который состоялся 15 февраля. 25-го февраля первый пациент обратился в клинику. 26 февраля были закрыты все школы и начался карантин. К 31 марта, когда началось обследование, прошло 6 недель с начала эпидемии. Тестирование показало, что из 919 тестированных примерно 15 % жителей имели антитела к заболеванию, т. е. были инфицированы. Из числа инфицированных 22,5 % болели бессимптомно, а коэффициент летальности инфекции (Infection Fatality Rate — IFR) (процент летальных исходов относительно полного числа инфицированных, включая бессимптомные или не зарегистрированные случаи) составляет по их оценкам 0,36 %, что несколько ниже, чем по другим оценкам (0,6—1 % [Mallapaty, 2020]).

На круизном корабле Diamond Princess [Russel et al., 2020] было инфицировано около 17 % «населения» при большем IFR (1,3 %), но там возрастной состав был смещен в сторону пожилых людей.

**Модель.** О коронавирусе пока известны только его самые общие свойства. Причем все, что реально наблюдается, — это число зарегистрированных случаев и количество летальных исходов. Поэтому и модель должна быть максимально общей. Мы воспользуемся моделью, идеологически близкой к компартментной модели [Kermack, McKendrick, 1927].

Пусть  $I(t)$  («infected») — полное количество инфицированных за время  $t$ , прошедшее от начала эпидемии в момент времени  $t=0$ , причем  $I(0)=n_0$  — численность группы, с которой началась эпидемия. Подчеркнем, что  $I(t)$  включает всех инфицированных, в том числе тех, кто болеет бессимптомно или заболевание которых не было зарегистрировано. Пусть, далее,  $N$  — полное количество людей, которые могут подвергнуться инфицированию. Эта

величина заранее не известна и ее оценка — главная цель моделирования. Количество,  $S(t)$  («susceptible»), тех, кто еще не инфицирован к моменту времени  $t$ ,

$$S(t) = N - I(t). \quad (1)$$

Поскольку инфицирование происходит при «контакте» инфицированного и неинфицированного, то ситуация очень похожа на парные столкновения в физике. Количество таких «столкновений» пропорционально как числу инфицированных  $I$ , так и числу неинфицированных  $S$ . Предположим, что в момент времени  $t$  происходит контакт неинфицированного человека и того, кто заразился в момент времени  $\tau$ . Вероятность заражения  $\beta(t, \tau)$ , зависит, вообще говоря, не только от момента времени  $t$ , когда происходит контакт, но и от продолжительности развития заболевания инфицированного человека до этого момента, т. е. от  $\tau$ . Поэтому количество инфицирований в единицу времени можно записать следующим образом:

$$\frac{dI}{dt} = (N - I(t)) \int_0^t \beta(t, \tau) \frac{dI(\tau)}{d\tau} d\tau, \quad (2)$$

где  $(dI(\tau)/d\tau)d\tau$  — количество тех, кто был инфицирован в интервале времени от  $\tau$  до  $\tau + d\tau$ . Реально,  $\beta(t, \tau)$  зависит только от разности своих аргументов:  $\beta(t, \tau) = \beta(t - \tau)$ .

Вероятность передачи инфекции зависит как от ее чисто медицинских свойств, так и от переданной дозы и условий контакта, а также от предистории человека, подвергающегося инфицированию, например, от предшествующих вакцинаций. Другими словами, вероятность инфицирования не является свойством только самого вируса, и следует ожидать, что в разных регионах вероятность инфицирования окажется разной. В настоящее время реальная зависимость  $\beta(t - \tau)$  от аргумента не известна и вряд ли будет известна в ближайшее время. Известно, однако, что инкубационный период заболевания, т. е. интервал между инфицированием и проявлением симптомов, равен в среднем 5 дней и с вероятностью 95 % лежит в пределах от 3,5 до 5,1 дней по данным [Sanche

et al., 2020] или от 4,5 до 5,8 дней по данным [Lauer et al., 2020]. При этом данные, представленные на сайте WebMD, говорят о том, что за два-три дня до появления первых симптомов может происходить досимптоматическое заражение, а вероятность передачи инфекции наиболее высока за 1—2 дня до начала симптоматической фазы заболевания. Поэтому в качестве упрощенного варианта основного уравнения (2) можно положить, что  $\beta(t - \tau) = \text{const} = \beta$  при  $t_A < t - \tau < t_B$  и равно 0 в противном случае. Иначе говоря, в этом приближении

$$\frac{dI}{dt} = \beta(N - I(t)) \int_{t-t_B}^{t-t_A} \frac{dI(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (3)$$

или

$$\frac{dI}{dt} = \beta(N - I(t))(I(t - t_A) - I(t - t_B)). \quad (4)$$

Но вначале мы рассмотрим еще более простой вариант модели, предполагающий, что вероятность инфицирования не зависит от того, как долго развивалась болезнь до инфицирования, и допускающий аналитическое решение:

$$\frac{dI}{dt} = \alpha I(t) \left(1 - \frac{I(t)}{N}\right), \quad (5)$$

где  $\alpha = \beta N$ .

Решая это уравнение с начальным условием  $I(t_0) = n_0$ , получаем

$$I = \frac{N}{1 + \frac{N - n_0}{n_0} \exp(-\alpha(t - t_0))}. \quad (6)$$

Поскольку  $N \gg n_0$ , то на начальной стадии при  $\exp(-\alpha(t - t_0)) (N - n_0)/n_0 \gg 1$  второе слагаемое в знаменателе уравнения (6) велико по сравнению с первым и число иницированных возрастает экспоненциально:

$$I = n_0 \exp(\alpha(t - t_0)). \quad (7)$$

В логарифмическом виде эта зависимость является линейной:

$$\ln I = \ln n_0 + \alpha(t - t_0), \quad (8)$$

поэтому  $n_0$  и  $\alpha$  легко находятся из данных для участка экспоненциального роста с помощью линейной регрессии. По мере развития эпидемии второе слагаемое в знаменателе уравнения (6) экспоненциально убывает, так что количество инфицированных возрастает и асимптотически приближается к  $N$ . Производная

$$\frac{dI}{dt} = \alpha N \frac{N - n_0}{n_0} \frac{\exp(-\alpha(t - t_0))}{\left(1 + \frac{N - n_0}{n_0} \exp(-\alpha(t - t_0))\right)^2} \quad (9)$$

представляет собой заболеваемость в единицу времени. Например, если время измеряется в сутках, то это суточная заболеваемость. Мы ниже увидим, что производная (9) имеет характерный колоколообразный вид с максимумом в момент времени

$$t_{\max} - t_0 = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{N - n_0}{n_0}. \quad (10)$$

Если известно, когда суточная заболеваемость прошла максимум, можно оценить, сколько человек будет инфицировано за время эпидемии:

$$N \approx n_0 \exp(\alpha(t_{\max} - t_0)). \quad (11)$$

Выше говорилось о заболевании, которое является следствием инфицирования. Однако абсолютно та же аналогия с «парными столкновениями» справедлива и для случаев, которые закончились летальным исходом. Более того, статистика летальных исходов менее подвержена искажениям, поскольку все летальные исходы регистрируются, а некоторые случаи заболевания могут не попасть в статистику, если заболевание было бессимптомное или малосимптомное. Однако и статистика летальных исходов тоже не является идеальной, поскольку не во всех случаях очевидно, что стало причиной летального исхода [Wu

et al., 2020; Vigilione, 2020]. Естественно, значения эпидемиологических параметров для статистики заболеваемости и летальных исходов различаются.

В следующих разделах приведены данные и результаты моделирования для четырех стран: Германии, Израиля, Украины и США. Поскольку эта статья пишется в разгар эпидемии (начало сентября 2020 г.), и сами данные, и модели не имеют окончательного вида.

**Результаты моделирования для некоторых стран.** 1. *Германия.* То, как Германия проходила эпидемию, и то, как развитие эпидемии отражалось в статистических данных, является примером для всех остальных стран. Несмотря на то, что в Германии была довольно высокая заболеваемость — 270 зарегистрированных случаев на 100 тысяч населения (на 02.09.2020), что близко к среднему по миру (336 случаев/100 тысяч на 02.09.2020), но значительно ниже, чем в европейских странах (кроме стран Северной Европы и

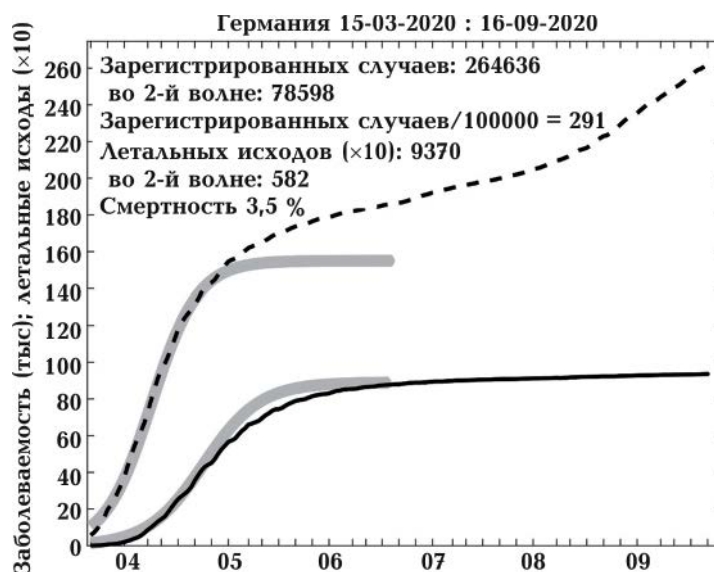


Рис. 1. Количество зарегистрированных случаев заболеваний (штриховая линия) и летальных исходов (сплошная линия) в Германии, вызванных инфицированием COVID-19. Серые линии — модели первой волны эпидемии (уравнение (6)). Первая волна закончилась в первой декаде июня, когда начали снимать карантинные ограничения.

Fig. 1. Number of confirmed cases of diseases (dashed line) and deaths (solid line) in Germany due to COVID-19. The gray lines refer to models of the first pandemic wave (Eq. 6). The first wave ended in early June, when quarantine restrictions were reduced.

Греции), а также США, Бразилии и др., — медицина справилась с нагрузкой, а статистика выдавала объективную информацию. Последнее следует, в частности, из совпадения зарегистрированной смертности от COVID-19 и превышения смертности над многолетней средней [Wu et al., 2020]. Зависимость количества летальных исходов в Германии из-за инфицирования коронавирусом (сплошная линия), начиная с 15 марта 2020, а также полное количество зарегистрированных случаев (штриховая линия) показаны на рис. 1.

Эпидемия началась с очень быстрого экспоненциального роста: до 20 марта количество летальных исходов удваивалось, примерно, за два дня. После 20 марта возрастание числа летальных исходов отклонилось от чисто экспоненциального и из условия минимальности среднеквадратичного отклонения модели от наблюдений стало возможно определить эпидемиологические параметры, входящие в уравнение (6):  $n_0=137$ ,  $\alpha=0,12$ ,  $N=8600$ . Это решение

показано на рис. 1 серой кривой. Вплоть до конца июня наблюдения, в общем, следуют модели, причем оцененное по модели на раннем этапе эпидемии максимальное значение числа летальных исходов подтвердилось наблюдениями. Обращает на себя внимание то, что в этом случае, как и в других, выход эпидемии из очередной волны происходит заметно медленнее, чем предсказывает модель. Это проявляется в отклонении модели для числа зарегистрированных случаев от наблюдений. Можно предположить, что это связано с влиянием локальных вспышек в удаленных друг от друга регионах.

На рис. 2 приведены наблюдавшиеся в Германии суточные приращения числа зарегистрированных случаев (верхняя кривая) и количества летальных исходов (нижняя кривая). Значительная нерегулярность суточных данных связана с существованием в Германии, как и во всех остальных странах, недельного цикла регистрации — в выходные дни число зарегистрированных случаев, включая летальные исходы, значительно меньше, чем в рабочие. В частности, в Германии некоторые федеральные земли в выходные дни не передают данные регистрации заболевших и скончавшихся. Серыми кривыми показаны предсказания уравнения (9). Для числа летальных исходов были использованы те же эпидемиологические параметры, что и для модели, представленной на рис. 1. Для числа зарегистрированных случаев параметры находятся точно так же, как и для числа летальных исходов:  $n_0=9118$ ,  $\alpha=0,145$ ,  $N=155000$ .

Обе модели, представленные на рис. 2, вполне согласуются с наблюдениями. Отклонения от моделей, причем не очень значительные, начались в середине июня, когда Германия ослабила карантинные ограничения. Если на минимуме эпидемии заболеваемость колебалась в преде-

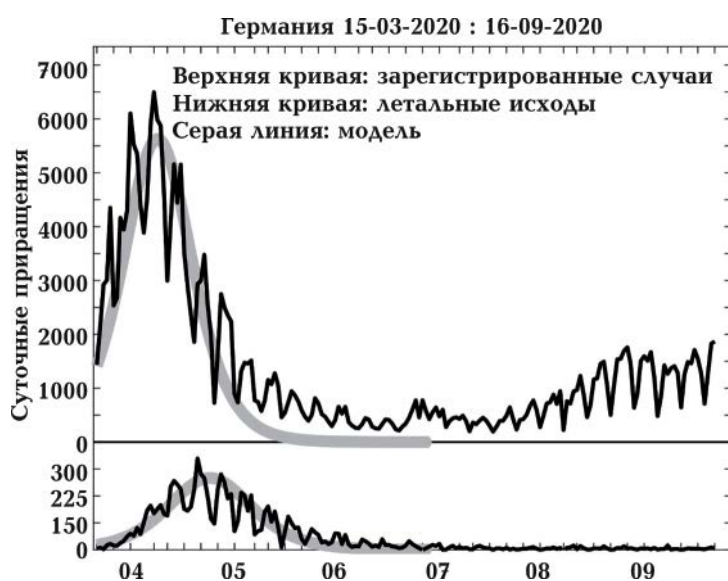


Рис. 2. Суточные приращения количества зарегистрированных случаев (верхняя кривая) и летальных исходов (нижняя кривая) в Германии. Серые линии — решения (9) с параметрами  $n_0=137$ ,  $\alpha=0,12$ ,  $N=8600$  для числа летальных исходов и  $n_0=9118$ ,  $\alpha=0,145$ ,  $N=155000$  для числа зарегистрированных случаев.

Fig. 2. Daily increments in the number of confirmed cases (upper curve) and deaths (lower curve) in Germany. Gray lines are solutions for Eq. (9) with parameters  $n_0=137$ ,  $\alpha=0,12$ ,  $N=8600$  for the number of deaths and  $n_0=9118$ ,  $\alpha=0,145$ ,  $N=155000$  for the number of confirmed cases.

лах 250—400 случаев сутки, то с середины июня интервал колебаний сместился вверх. С тех пор заболеваемость постепенно нарастает и в начале сентября, когда пишется этот текст, уже очевидно, что в Германии, как и во многих других странах, происходит вторая волна эпидемии.

Из наблюдений за развитием эпидемии в Германии можно сделать два важных вывода:

1) при наличии качественной статистики и в условиях постоянства «правил игры», т.е. неизменных правил социального дистанцирования и сохранения способности медицинской системы адекватно реагировать на возрастание нагрузки при эпидемии, даже упрощенная модель (б) правильно описывает развитие эпидемии и правильно предсказывает максимальное количество зарегистрированных случаев и максимальное количество летальных исходов;

2) количество зарегистрированных случаев (для Германии ~200000) мало по сравнению с населением страны (около 84 миллионов). Если справедлива оценка [Streek et al., 2020], показавшая что, примерно, от 80 до 90 % ин-

фицированных болели бессимптомно или симптомы проявлялись слабо, то реальное число инфицированных в Германии во время весенней волны коронавирусной инфекции лежит в пределах от одного до двух миллионов человек, т. е. от 1,2 до 2,5 % населения. В настоящее время не вполне

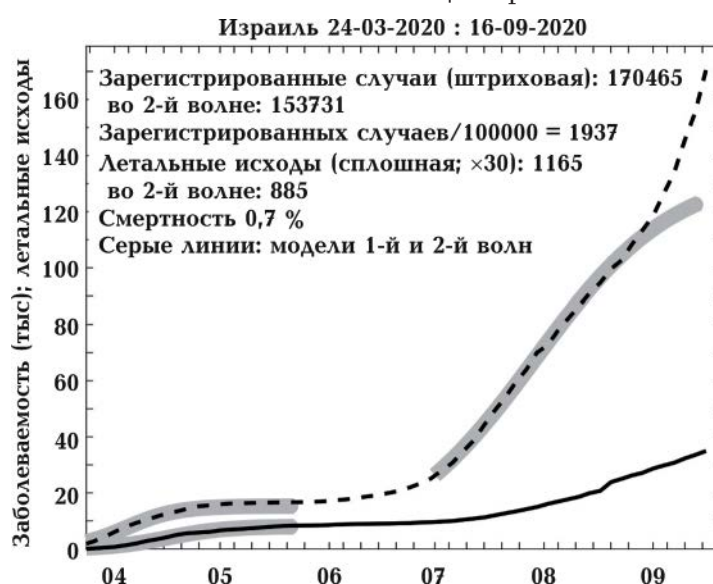


Рис. 3. Количество зарегистрированных случаев (штриховая линия) и летальных исходов (сплошная) связанных с заболеваниями вследствие инфицирования коронавирусом в Израиле. Для наглядности, число летальных исходов показано с множителем 30. Серые линии — модели.

Fig. 3. The number of confirmed cases (dashed line) and deaths (solid) associated with diseases due to COVID-19 in Israel. For clarity the death toll is shown with a factor of 30. Gray lines refer to models.

**Т а б л и ц а . Эпидемиологические параметры моделей**

Страна	Волна	Модель	$n_0$	$\alpha$	$N$
Германия (начиная с 15.03.2020)	Первая (дни 1—90)	заболеваемость	9118	0,145	155000
		лет. исходы	137	0,12	8600
Израиль (начиная с 24.03.2020)	Первая (дни 1—60)	заболеваемость	2303	0,139	15320
		лет. исходы	14	0,12	270
	вторая	заболеваемость	220	0,05	135000
		лет. исходы			
США (начиная с 15.03.2020)	первая	заболеваемость			
		лет. исходы	125	0,13	116500
	Вторая ( $t > 105$ дн.)	заболеваемость	403530	0,06	4590000
		лет. исходы			
Украина	Первая (дни 1—63)	заболеваемость	218	0,13	14600
		лет. исходы	17.8	0,08	760
	вторая (дни 64—114)	заболеваемость	245	0,055	61700
		лет. исходы	117	0,029	2410



Рис. 4. Суточные приращения заболеваемости (верхняя часть рисунка) и смертности (нижняя часть рисунка) в Израиле во время эпидемии коронавируса COVID-19. Серые линии — модели. Выброс числа летальных исходов 18—19 августа связан с добавлением к статистике 53 случаев, которые ранее не учитывались.

Fig. 4. The daily increments in number of confirmed cases (the upper subfigure) and deaths (the lower subfigure) in Israel due to the COVID-19 coronavirus epidemic. Gray lines are models. The huge outbreak in the number of deaths on August 18—19 is associated with the addition of 53 cases to the statistics, which were not previously taken into account.

ясно, означает ли это, что более 97 % населения по тем или иным причинам невосприимчивы к коронавирусу, или что настолько эффективно сработали карантинные мероприятия и самодисциплина германских граждан. Однако по данным института Роберта Коха по состоянию на 21 июля 2020 г. 95 % смертей, связываемых с коронавирусом, — это люди в возрасте старше 60 лет, составляющие около 28 % населения. Иначе говоря, смертность, вызванная инфицированием коронавирусом, среди людей в возрасте 60 лет и старше почти в 50 раз выше, чем смертность более молодых людей. Похоже, что слабая восприимчивость к коронавирусу и низкая летальность последних сыграла в Германии решающую роль в том, что заболеваемость оказалась относительно небольшой, хотя абсолютные цифры, конечно, высокие. Как будет развиваться эпидемия во время второй волны, пока невозможно сказать. Как мы увидим ниже, в Израиле, Украине

и США заболеваемость и смертность во второй волне оказались намного выше, чем в первой.

2. *Израиль*. В Израиле статистика велась столь же скрупулезно, как и в Германии. Как следствие, легко построить модель, которая адекватно описывает развитие эпидемии (рис. 3, 4).

Число зарегистрированных в первой волне эпидемии случаев (178 на 100 тысяч населения) немного меньше, чем в Германии (210 случаев на 100 тысяч), а смертность в Израиле (0,8 % числа зарегистрированных случаев) оказалась значительно ниже, чем в Германии (3,8 %).

К сожалению, Израиль, в отличие от Германии, не справился со второй волной эпидемии, и количество заболевших во второй волне на 03.09.2020 уже впятеро превышает заболеваемость в первой волне. По-видимому, это означает, что сдерживание эпидемии в первой волне связано со своевременным введением жестких карантинных ограничений. Во второй волне власти Израиля не могли реагировать столь же жестко из-за социальных проблем, вызванных более чем 25 % безработицей, порожденной карантинными ограничениями первой волны. На 02.09.2020 Израиль по числу зарегистрированных случаев «обогнал» многие, намного более населенные страны, и почти «догнал» вчетверо большую Украину.

3. *Соединенные Штаты Америки*. Официальные данные о развитии эпидемии в США показаны на рис. 5, 6. Качество данных, относящихся к первой волне, очень низкое, и они, фактически, непригодны для численного моделирования. Например, хорошо видимый разрыв 13—14 апреля на интегральных данных и соответствующий пик на суточных данных возникли из-за сбоя регистрации, когда в базы данных были занесены пропущенные данные за более ранний период. Как следует из ста-



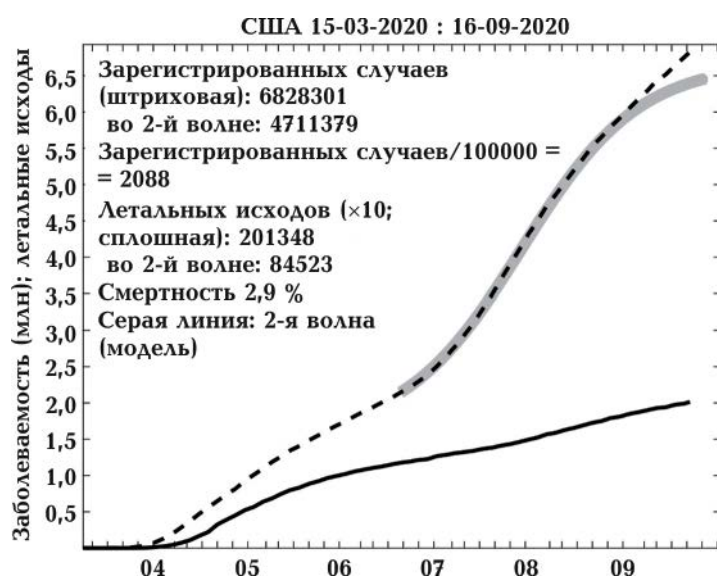


Рис. 5. Статистика подтвержденных случаев (штриховая линия) и летальных исходов (сплошная) в США во время эпидемии COVID-19 (количество летальных исходов для наглядности показано с коэффициентом 10). Серая кривая — численная модель второй волны.

Fig. 5. Statistics of confirmed cases (dashed line) and deaths (solid line) in the USA due to the COVID-19 epidemic (for clarity, the death toll is shown with a factor of 10). The gray curve is a numerical model of the second wave.

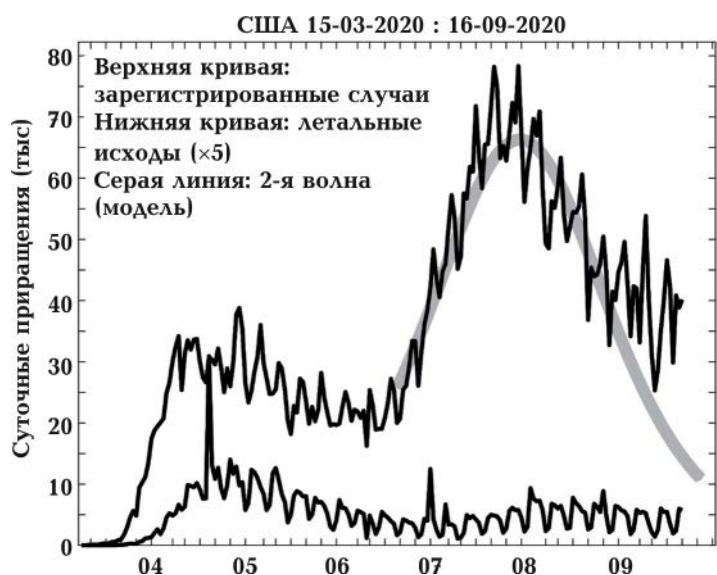


Рис. 6. Суточные приращения числа подтвержденных случаев (верхняя кривая) и летальных исходов (нижняя кривая) в эпидемии COVID-19 в США. Количество летальных исходов показано для наглядности с коэффициентом 5. Серая кривая — модель (см. уравнение (9)).

Fig. 6. Daily increments of confirmed case number (upper curve) and deaths (lower curve) in the US COVID-19 epidemic. For clarity, the death toll is shown with a factor of 5. Gray curve refers to the model (see equation (9)).

тики избыточной смертности [Wu et al., 2020], в марте—июне реальная смертность в США на 21 % превышала зарегистрированную смертность от COVID 19 (это, правда не рекорд. На сегодняшний день рекорд принадлежит Перу, где эта разность составляет около 150 %). Никакая модель не может описать почти постоянные значения суточной заболеваемости, которые наблюдались в США в течение почти трех месяцев с конца марта по начало июня. Возможной причиной такого квазипостоянства может быть ограниченная пропускная способность перегруженной системы регистрации заболеваний, когда фиксировалось не реальное количество заболеваний, а столько, сколько можно было разместить в клиниках. Другой возможный вариант — то, что США является очень неоднородной территорией, на которой разные штаты проходят через эпидемию в различное время. В частности, первая волна была связана, в основном, со вспышкой в Нью Йорке и Нью Джерси. В настоящее время там заболеваемость упала, а центр эпидемии переместился в западные штаты. Именно с ними связана вторая волна. Эта волна началась в первой декаде июня и продолжает нарастать в экспоненциальном режиме. К 20.08.2020 число заболевших во второй волне эпидемии вдвое превысило количество зарегистрированных случаев в первой волне, однако заболеваемость перевалила через максимум и по стоянию на 02.09.2020 идет на спад. Существенным отличием второй волны от первой является вдвое более низкая смертность.

4. *Украина.* Украинская статистика коронавирусной эпидемии до начала второй волны в третьей

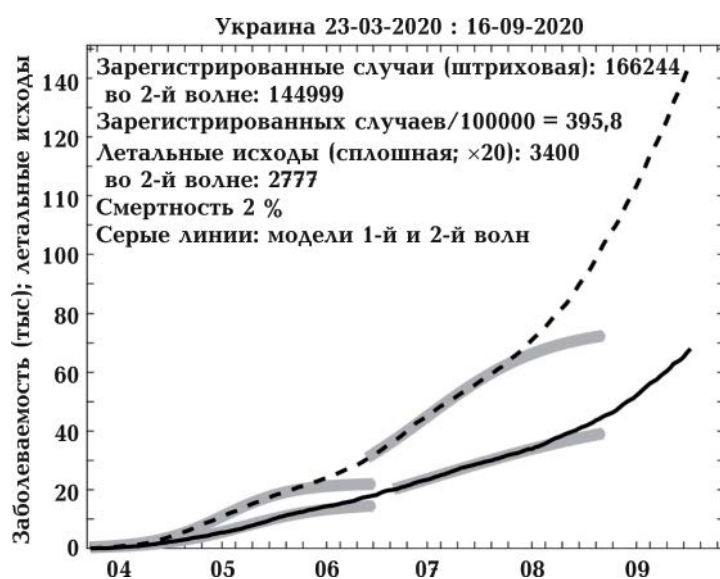


Рис. 7. Статистика зарегистрированных случаев (штриховая линия) и летальных исходов (сплошная) в Украине во время эпидемии COVID-19 (количество летальных исходов для наглядности показано с коэффициентом 20). Серые линии - модели первой и второй волн.

Fig. 7. Statistics of confirmed cases (dashed line) and deaths (solid) in Ukraine due to the COVID-19 epidemic (for clarity, the death toll is shown with a factor of 20). Gray lines refer to models of the first and second waves.



Рис. 8. Суточные приращения заболеваемости (верхняя кривая) и числа летальных исходов (нижняя кривая) вызванных COVID-19 в Украине. Количество летальных исходов показано для наглядности с коэффициентом 10. Серые кривые — модели первой и второй волны, соответственно, (см. уравнение (9)).

Fig. 8. Daily increments of the number of confirmed cases (upper curve) and deaths (lower curve) due to COVID-19 in Ukraine. For clarity, the death toll is shown with a factor of 10. The gray curves refer to the models of the first and second waves (see equation (9)).

декаде мая довольно неплохо описывалась моделью (6), (9). Однако карантинные ограничения были ослаблены, а фактически сняты слишком рано, и вторая волна началась до того, как закончилась первая. Это хорошо видно на рис. 5, 6. В Украине, как и в Израиле, и США количество заболеваний во второй волне уже превзошло заболеваемость в первой. При этом рост заболеваемости не сопровождался ростом смертности. Примерно с 10 июля суточная заболеваемость после трехнедельного падения опять стала расти и к концу июля превзошла значения, достигнутые ранее во второй волне. По состоянию на 20.08.2020 похоже на то, что в Украине началась третья волна эпидемии. Суточная заболеваемость в третьей волне непрерывно растет, начиная с 10.07.2020, и уже почти втрое превысила максимальные значения, достигнутые во второй волне. В настоящее время (02.09.2020) нет никаких признаков того, что третья волна близка к своему максимуму. К сожалению, она сопровождается заметным ростом числа летальных исходов (рис. 7, 8).

**Усовершенствование модели.** Как было видно, решения уравнений (6) и (9) могут быть согласованы с наблюдаемым развитием эпидемии при условии наличия качественной статистики, т. е. если правила регистрации остаются постоянными, а летальные исходы регистрируются без задержек и пропусков. Из трех основных эпидемиологических параметров — вероятности инфицирования  $\alpha$ , величины исходной группы  $n_0$ , и количества  $N$  людей, которые потенциально могут быть инфицированы, — первые два могут быть приблизительно оценены с помощью линейной регрессии

на начальной, экспоненциальной стадии эпидемии (см. уравнение (8)), причем их оценка не требует введения никаких специальных предположений. Третий параметр  $N$ , можно оценить только после того, как нарастание числа зарегистрированных случаев или летальных исходов пройдет точку перегиба, т. е. нарастание суточных характеристик (суточной заболеваемости и суточной смертности) сменится их уменьшением.

В отличие от  $\alpha$  и  $n_0$ , параметр  $N$  не имеет ясного физического смысла. Неясно, как величина  $N$  соотносится с населением страны. Во всех странах, даже в тех, где медицина не смогла справиться с наплывом пациентов, число зарегистрированных случаев мало по сравнению с населением. В США, Бразилии, Панаме, Кувейте, Чили и некоторых других это число (на 22.08.2020) составляет порядка 2 %, в Израиле около 1 %, в Испании, Швеции — 0,8 %, Украине, Германии, Франции — около 0,3 %. Конечно, эпидемия еще далека от завершения и количество заболевших будет возрастать. Однако, судя по массовым тестированиям закончившихся эпизодов в округе Хайнсберг (Германия) [Streek et al., 2020] и на круизном корабле Даймонд Принсесс [Mizumoto et al., 2020], заболеваемость (включая бессимптомные и малосимптомные случаи) составляет около 15 % численности всех групп, охваченных тестированием. Если считать, что эти замкнутые группы являются моделью стран, то численность группы аналогична численности населения страны.

Возможно, такое соотношение числа инфицированных и численности населения связано с чисто медицинскими причинами. Например, может оказаться, что более 80 % населения не восприимчива к вирусу COVID-19, или, скажем, влияет вакцинирование, которое проводилось в предыдущие годы (высказывались предположения, что явное различие заболеваемости между восточной и западной Германией, а также между странами Восточной Европы и Западной может иметь причиной вакцинацию БЦЖ, которая в странах

соцлагеря (и Португалии) проводилась до недавнего времени сразу же после рождения ребенка, но не проводилась в странах Западной Европы). Однако более вероятно, что основной причиной того, что при распространении инфекции в замкнутых группах инфицируется только относительно небольшая часть популяции, является ограниченность времени, в течение которого инфицированный человек может заразить того, кто с ним контактирует.

В работе [Patel et al., 2020] исследованы образцы, взятые у инфицированных людей в различных клинических ситуациях. Они были привиты на клеточные культуры Vero 6, после чего в течение 14 дней отслеживалось появление вызванных вирусом повреждений клеток. Оказалось, что количество тестов, содержащих активный вирус, максимально в момент появления симптомов (>80 %). Несколько меньшее, но также близкое к 80 %, количество тестов содержат активный вирус в дни, предшествующие появлению симптомов. Через семь дней после появления симптомов количество положительных тестов уменьшается вдвое (до 40 %), а через 10 дней количество образцов с активным вирусом можно считать пренебрежимо малым. Инкубационный период (т. е. время от инфицирования до проявления симптомов) составляет от 3,5 до 5,1 дней по данным [Sanche et al., 2020] или от 4,5 до 5,8 дней по данным [Lauer et al., 2020]. Будем считать, что он приблизительно равен 5 дням. Медианное значение продолжительности периода активности вируса после наступления симптомов, которое в работе [Patel et al., 2020] оценено по выборке из 246 образцов, составляет примерно 4 дня, т. е. инфицированный человек перестает быть источником инфекции примерно через девять дней после инфицирования. Таким образом, интервал контагиозности, т. е. интервал, в течение которого заболевший человек может инфицировать другого человека, составляет приблизительно семь дней — три дня до появления симптомов и четыре дня после. На рис. 9 показано распределение плотности вероятности передачи инфекции (т. е.

вероятность передать инфекцию в течение одного дня), построенное по данным [Patel et al., 2020] в предположении, что симптомы появляются на пятый день [Sanche et al., 2020; Lauer et al., 2020], а вирус может быть передан за три дня до появления первых симптомов, т. е.  $\tau_A=2$  дня. Определенный в таких предположениях период контагиозности показан на рис. 9 серой полосой. Естественно, статистика не является достаточной для точных утверждений, все количественные оценки имеют значительный разброс, а ситуация от страны к стране может изменяться. Однако, судя по данным [Patel et al., 2020], через две недели после появления симптомов заболевший чело-

век уже определенно не является заразным. Как отмечают [Patel et al., 2020], 74 % всех передач вируса приходится на первую неделю после появления симптомов, в то время как во вторую неделю происходит только 20 % передач вируса.

Поскольку период контагиозности начинается за два-три дня до появления симптомов, ниже в численных примерах будем полагать  $\tau_A=2$  дня и рассмотрим, как влияет на развитие эпидемии длительность периода контагиозности, который может заканчиваться либо по естественным причинам, либо вследствие (само)изоляции заболевшего человека.

Уравнение (4) легко решается численно.

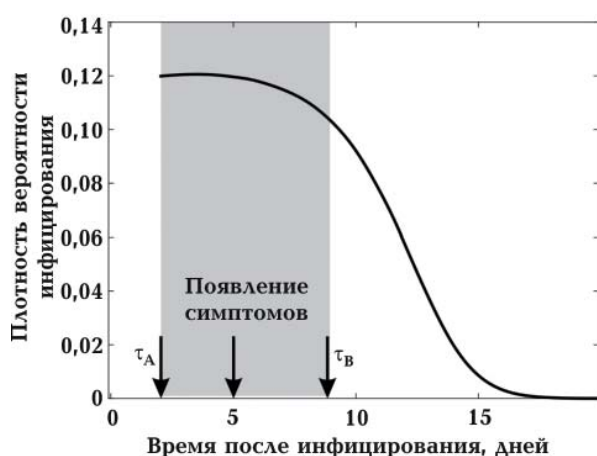


Рис. 9. Плотность вероятности инфицирования по данным Patel et al. [2020]. Предполагается, что симптомы заболевания появляются на пятый день после того, как человек был инфицирован [Lauer et al., 2020; Sanche et al., 2020], а досимптомная передача инфекции возможна, начиная, примерно, со второго дня после инфицирования, т. е., примерно, за три дня до появления симптомов. Интервал контагиозности, построенный в таких предположениях, показан серой полосой.

Fig. 9. The probability density of infection according to Patel et al. [2020]. It is assumed that symptoms of the disease appear on the fifth day after the person got infected [Lauer et al., 2020; Sanche et al., 2020], and pre-symptomatic transmission of infection is possible starting from about the second day after infection, that is, about three days before the onset of symptoms. The contagiousness interval plotted under such assumptions is shown with a gray bar.

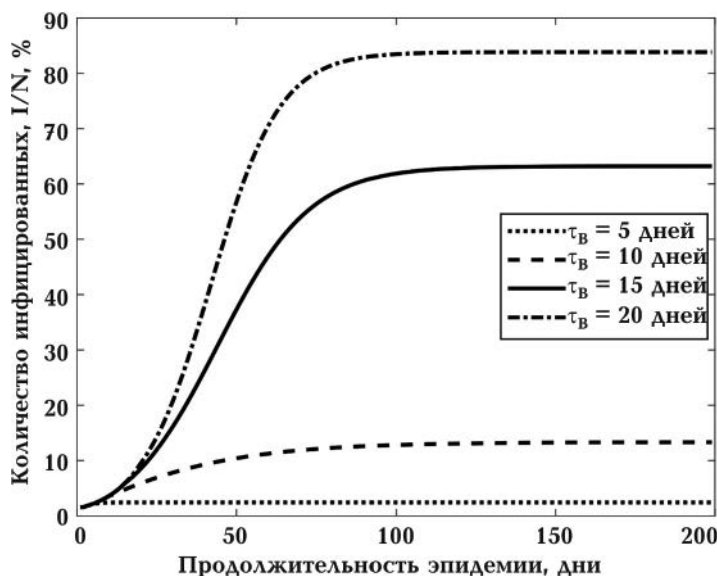


Рис. 10. Развитие эпидемии в зависимости от интервала времени,  $\tau_B$ , между инфицированием и изоляцией больного. Предполагается, что заражение может происходить уже через  $\tau_A=2$  дня после инфицирования. Количество инфицированных показано в процентах относительно всего населения. Используются эпидемиологические параметры, соответствующие первой волне эпидемии в Германии (см. таблицу).

Fig. 10. Development of the epidemic depending on the time interval,  $\tau_B$ , between infection and isolation of the patient. It is assumed that infection can occur as early as  $\tau_A=2$  days after infection. The number of infected persons is shown as a percentage of the total population. Epidemiological parameters used for the modeling correspond to the first wave of the epidemic in Germany (see table).

На рис. 10 показаны решения уравнения (4) методом Рунге—Кутты второго порядка для нескольких значений  $\tau_B$  от 5 до 20 дней. Первое из этих значений соответствует тому, что человек, заболевший COVID-19, изолируется, фактически, сразу после появления симптомов. В этом случае эпидемией будет охвачено не более 1—2 % населения. При  $\tau_B=10$  дней (заболевший изолируется не позднее, чем через 5 дней после появления симптомов) будет инфицировано примерно 13 % населения. Но если большинство заболевших изолируются через время после инфицирования, превышающее две недели ( $\tau_B>15$  дней), то эпидемией будет охвачено более 60 % населения.

**Заключение.** Таким образом, в закрытой популяции полное количество заболевших, включая тех, кто не был зарегистрирован из-за того, что болел бессимптомно или симптомы проявлялись слабо, существенно зависит от продолжительности периода контагиозности вируса или от того, через какое время после инфицирования заболевший был изолирован. Если (само) изоляция начинается сразу после обнаружения симптомов, то инфицированными окажутся только единицы процентов от населения, несмотря даже на существование досимптомного инфицирования. К сожалению, из-за того, что значительная часть инфицированных даже не знает о том, что они больны (например, дети и подростки), индивидуальная изоляция, ориентированная на появление симптомов, не эффективна. Эффективным является тотальный карантин, прерывающий личные контакты. Это можно было наблюдать в Германии, Израиле, Греции и других странах во время первой волны эпидемии (март — начало июня 2020 г.). Однако такой карантин разрушительно действует на экономику. Закрытие многих бизнесов, полное блокирование туризма и соответствующего сервиса, массовая безработица, проблемы с оплатой аренды жилья, нарушение учебного процесса вызывают значительное социальное напряжение, что делает невозможным длительное сохранение тотально-

го карантина. Возможно, именно поэтому вторая волна эпидемии, которая сегодня (начало сентября 2020) еще далеко не достигла максимума, уже оказывается выше и разрушительнее первой. Из тех четырех стран, о которых говорилось в предыдущих разделах, в трех (США, Украине и Израиле) число заболевших во второй волне на 02.09.2020) в несколько раз превышает число заболевших в первой. Поэтому можно полагать, что в эпидемических волнах, следующих за первой, ограничение времени, в течение которого заболевший человек является распространителем болезни, будет определяться, скорее, свойствами самого вируса, а не карантинными запретами. В этом случае, как свидетельствуют данные [Patel et al., 2020], человек может передать инфекцию в течение, примерно, 4 дней после появления симптомов (медианное значение). Весь интервал контагиозности вместе с периодом досимптомного инфицирования, включает 1—2 недели после инфицирования, причем вероятность передать инфекцию в первую неделю в несколько раз выше, чем во вторую.

Из моделей, представленных в предыдущем разделе, следует, что в этом случае инфицированными окажутся порядка 15 % населения. С учетом того, что порядка 80 % заболевших не попадают в статистику, оказывается, что число зарегистрированных случаев COVID достигнет примерно 3 % населения. В настоящее время только США и Израиль приближаются к этим оценкам: в США 3 % населения — это примерно 10 млн человек (в настоящее время зарегистрировано 6,3 млн). В Израиле можно ожидать, что будет примерно 0,3 млн зарегистрированных случаев (в настоящее время — 0,12 млн). В Германии и Украине в настоящее время зарегистрировано только примерно 10 % от вероятного количества инфицированных (2,7 и 1,25 млн соответственно).

Относительно небольшое количество переболевших в первой волне эпидемии означает, что количество тех, кого компарментные модели относят к «уязвимым», после первой волны почти не уменьши-

лось, даже если заболевание оставляет надежный иммунитет (в результате первой волны во всех четырех странах, включенных в рассмотрение выше, уменьшилась смертность. Возможно, это указывает на изменение распределения по возрастам тех, кто еще не переболел COVID-19). Это означает, что после прохождения первой волны ситуация остается неустойчивой и занесение вируса извне может привести к очередной локальной вспышке. Собственно, мы постоянно наблюдаем такие локальные вспышки даже в относительно благополучных странах. Возможно, проявлением такой неустойчивости является и то, что окончание очередной эпидеми-

ческой волны происходит медленнее, чем предсказывает модель. Это хорошо видно на примере первой волны числа зарегистрированных случаев в Германии (см. рис. 1). Вопросы устойчивости предэпидемической ситуации, а также то, как возникают такие локальные вспышки, сейчас являются наиболее важными с практической точки зрения. Современные модели фактически аналогичны одномерным моделям в физике, в то время как распространение инфекции является существенно пространственным явлением. Математически эта задача не является очень сложной, но в настоящее время данные, необходимые для моделирования, отсутствуют.

### Список литературы

- Allen, L.J.S. (2008). An Introduction to Stochastic Epidemic Models. In F. Brauer, P. van den Driessche, J. Wu (Eds.), *Mathematical Epidemiology. Lecture Notes in Mathematics* (Vol. 1945, pp. 81—130). Berlin, Heidelberg: Springer. doi: 10.1007/978-3-540-78911-6\_3.
- Brauer, F. (2008). Compartmental models in epidemiology. In F. Brauer, P. van den Driessche & J. Wu (Eds.), *Mathematical Epidemiology. Lecture Notes in Mathematics* (Vol. 1945, pp. 19—79). Berlin, Heidelberg: Springer. doi: 10.1007/978-3-540-78911-6\_2.
- Buchanan, M. (2020). The limits of a model. *Nature Physics*, 16, 605. doi: 10.1038/s41567-020-0934-5.
- Cobey, S. (2020). Modeling infectious disease dynamics. *Science*, 368, 713—714. doi: 10.1126/science.abb5659.
- Dietz, K., & Schenzle, D. (1985). Mathematical Models for Infectious Disease Statistics. In A.C. Atkinson & S.E. Fienberg (Eds.), *A Celebration of Statistics* (pp. 167—204). New York: Springer-Verlag. doi:10.1007/978-1-4613-8560-8\_8.
- Einstein, A. (1934). On the Method of Theoretical Physics. Herbert Spencer Lecture, Oxford (10 June 1933). *Philosophy of Science*, 1(2), 163—169.
- Kermack, W.O., & McKendrick, A.G. (1927). Contributions to the mathematical theory of epidemics — I. *Proc. Royal Soc.*, 115A, 700—721. doi:10.1016/S0092-8240(05)80040-0.
- Lauer, S.A., Kyra, H., Bi, G., Jones, F.K., Zheng, Q., Meredith, H.R., Azman, A.S., Reich, N.R., & Lessler, J. (2020). The incubation period of coronavirus disease 2019 (COVID-19) from publicly reported confirmed cases: Estimation and application. *Annals of Internal Medicine*, 172(9), 577—582. doi: 10.7326/M20-0504.
- Mallapaty, S. (2020). How deadly is the coronavirus? *Nature*, 582, 467—468. doi: 10.1038/d41586-020-01738-2.
- Mizumoto, K., Kagaya, K., Zarebski, A., & Chowell, G. (2020). Estimating the asymptomatic proportion of coronavirus disease 2019 (COVID-19) cases on board the Diamond Princess cruise ship, Yokohama, Japan, 2020. *EuroSurveillance*, 25(10), 2000180. doi: 10.2807/1560-7917.ES.2020.25.10.2000180.
- Neher, R.A., Dyrda, R., Druelle, V., Hodcroft, E.B., & Albert, J. (2020). Potential impact of seasonal forcing on a SARS-CoV-2 pandemic. *Swiss Medical Weekly*, 150, w20224. doi:10.4414/sm.w.2020.20224.
- Patel, M., Charlett, A., Lopez, B.J., Saliba, V., Ellis, J., Ladhani, S., Zambon, M., & Gopal, R. (2020). Duration of infectiousness and correlation with RT-PCR cycle threshold values in cases of COVID-19, England, January to May 2020. *EuroSurveillance*, 25(32), 2001483. doi: 10.2807/1560-7917.ES.2020.25.32.2001483.

- Rothe, C., Schunk, M., Sothmann, P., Bretzel, G., Froeschl, G., Wallrauch, C. et al. (2020). Transmission of 2019-nCoV infection from an asymptomatic contact in Germany. *The New England Journal of Medicine*, 382, 970—971. doi: 10.1056/NEJMc2001468.
- Russell, T.W, Hellewell, J., Jarvis, C.I., van Zandvoort, K., Abbott, S., Ratnayake, R., CMMID COVID-19 working group, Flasche, S., Eggo, R.M., Edmunds, W.J., & Kucharski, A.J. (2020). Estimating the infection and case fatality ratio for coronavirus disease (COVID-19) using age-adjusted data from the outbreak on the Diamond Princess Cruise ship, February 2020. *EuroSurveillance*, 25(12), 2000256. doi:10.2807/1560-7917.ES.2020.25.12.2000256.
- Sanche, S., Lin, Y., Xu, C., Romero-Severson, E., Hengartner, N., & Ke, R. (2020). High Contagiousness and Rapid Spread of Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2. *Emerging Infectious Diseases*, 26(7), 1470—1477. <https://dx.doi.org/10.3201/eid2607.200282>.
- Streeck, H., Schulte, B., Kuemmerer, B., Richter, E., Hoeller, N., Fuhrmann, C., Bartok, E., Dolscheid, R., Berger, M., Wessendorf, L., Eschbach-Bludau, M., Kellings, A., Schwaiger, A., Martin Coenen, C., Hoffmann, P., Noethen, M., Eis-Huebinger, A-M., Exner, M., Schmithausen, R., Schmid, M., & Hartmann, G. (2020). Infection fatality rate of SARS-CoV-2 infection in a German community with a super-spreading event. *medRxiv*. doi: 10.1101/2020.05.04.20090076.
- Thompson, E.L., & Smith, L.A. (2019). Escape from model-land. *Economics: The Open-Access, Open-Assessment E-Journal*, 13, 1—15. doi: 10.5018/economics-ejournal.ja.2019-40.
- Van den Driessche, P., & Watmough, J. (2008) Further Notes on the Basic Reproduction Number. In F. Brauer, P. van den Driessche, J. Wu (Eds.), *Mathematical Epidemiology. Lecture Notes in Mathematics* (Vol. 1945, pp. 159—178). Berlin, Heidelberg: Springer. doi:10.1007/978-3-540-78911-6\_6.
- Viglione, G. (2020). How many people has the coronavirus killed? *Nature*, 585, 22—24. doi: 10.1038/d41586-020-02497-w.
- Wu, J. (2008). Spatial Structure: Partial Differential Equations Models. In F. Brauer, P. van den Driessche, J. Wu (Eds.), *Mathematical Epidemiology. Lecture Notes in Mathematics* (Vol. 1945, pp. 191—203). Berlin, Heidelberg: Springer. doi:10.1007/978-3-540-78911-6\_8.
- Wu, J., McCann, A., Katz, J., Peltier, E. & Deep, K.S. (2020, October 5). 338,000 Missing Deaths: Tracking the True Toll of the Coronavirus Outbreak. *The New York Times*. Retrieved from <https://www.nytimes.com/interactive/2020/04/21/world/coronavirus-missing-deaths.html>.

## Coronavirus fragrance

*Ya. M. Khazan, 2020*

Frankfurt am Main, Germany

It is shown that epidemic dynamics and total number of people with a viral disease in a closed community critically depend on the duration of the period of virus contagiousness. The time that an infected person remains infectious is limited either by his/her isolation or by a natural decrease in virus activity. From laboratory data on changes in virus COVID-19 activity over time and on the basis of studying the epidemic dynamics in various communities, it follows that if the isolation of an infected person is not effectively used to combat the epidemic, then the individual, on average, remains contagious for 9—10 days after being infected. Modeling shows that in this case approximately 15 % of the closed community population will be finally infected (including asymptomatic cases). Since only about 20 % of those infected go to the doctor and are registered in the statistics, it should be expected that the number of registered cases would be about 3 % of the population. Currently, only Israel has reached this threshold.

**Key words:** COVID-19, contagiousness period, epidemic dynamics.

## Коронавірусні пахоці

Я. М. Хазан, 2020

Франкфурт-на-Майні, Німеччина

Показано, що динаміка розвитку епідемії і загальна кількість захворілих вірусним захворюванням в замкнутій спільноті критично залежать від тривалості періоду контагіозності вірусу. Час, протягом якого інфікована людина залишається заразною, обмежується або його/її ізоляцією, або природним зменшенням активності вірусу. З лабораторних даних про зміну активності вірусу COVID-19 з часом і на основі вивчення динаміки епідемії в різних спільнотах витікає, що якщо ізоляція інфікованої людини не використовується ефективно для боротьби з епідемією, то індивід, в середньому, залишається заразним протягом 9—10 днів після інфікування. Як показує моделювання, в цьому випадку інфікованими будуть приблизно 15 % замкнутої популяції (включаючи безсимптомні випадки). Оскільки лише приблизно 20 % інфікованих звертається до лікаря і реєструється в статистиці, то слід очікувати, що кількість зареєстрованих випадків складе приблизно 3 % популяції. У теперішній час тільки Ізраїль досяг цього порогу.

**Ключові слова:** COVID-19, період контагіозності, динаміка епідемії.

*Дополнение при корректуре.* Очень коротко опишу, как развивались события в течение полутора месяцев после написания статьи.

**Германия.** Период медленного роста заболеваемости сменился в начале октября 2020 г. очень быстрым подъемом, вследствие которого суточные значения превысили «достижения» первой волны. Пока это выглядит как экспоненциальный рост. Летальность при этом остается очень низкой (0,4 % за последние два месяца; значительно ниже, чем в первой волне и чем в любой другой стране Европы).

**Израиль** поставил несколько «мировых рекордов». В списке по абсолютному числу зарегистрированных случаев он поднялся с 56 на 24 место, обойдя много значительно более населенных стран, включая Украину. 23 сентября суточная заболеваемость составила 11000, что в пересчете на 1 миллион населения в несколько раз выше, чем в любой другой стране мира за все время эпидемии. Эту вспышку удалось подавить за две недели. Израиль — первая страна, в которой число зарегистрированных случаев превысило 3 % населения.

**США.** С середины сентября 2020 г. происходит быстрый рост суточной заболеваемости в нескольких штатах (Висконсин, Иллинойс, Калифорния, Флорида). При этом суточное количество летальных исходов даже падает.

**Украина.** С конца июля 2020 г. происходит непрерывный рост суточных значений заболеваемости и числа летальных исходов. Максимумы первых двух волн уже превышены более чем в 6 раз. Летальность по сравнению с первыми волнами незначительно выросла (с 1,9 до 2 %).