

УДК 911.3

COVID-19: ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ДИНАМИКА И ФАКТОРЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПО РЕГИОНАМ РОССИИ

© 2020 г. С. П. Земцов^{a, b, *}, В. Л. Бабурин^{b, c, **}

^aРоссийская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ, Москва, Россия

^bМосковский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия

^cБалтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

*e-mail: spzemtsov@gmail.com

**e-mail: vbaburin@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.04.2020 г.

После доработки 12.05.2020 г.

Принята к публикации 12.05.2020 г.

В регионах России подтвержденная заболеваемость населения коронавирусной инфекцией в первом приближении подчиняется общим пространственным закономерностям диффузии нововведений. В статье подробно описаны теоретические подходы к анализу распространения социальных заболеваний и обсуждаются методические ограничения, которые снижают возможности прогнозирования подобных явлений и влияют на принятие решений властями. При этом мы считаем, что для большинства регионов, включая Москву, на рассматриваемом периоде до 12 мая 2020 г. динамика подтвержденных случаев есть уменьшенное и запаздывающее отражение реальных процессов. Исходя из этих предпосылок, введение режима самоизоляции в Москве и ряде других крупных регионов повлияло на снижение числа новых подтвержденных случаев через две недели. В соответствии с предложенной моделью носители, заразившиеся за рубежом, на первом этапе концентрировались в регионах с крупными агломерациями, в приморских и приграничных регионах с высокой интенсивностью внутренних и внешних связей. К сожалению, заражение не удалось сдержать, начался этап экспоненциального роста по всей стране. К началу апреля 2020 г. случаи заболевания были зафиксированы в большинстве регионов, кроме наиболее удаленных. Согласно расчетам на 12 мая 2020 г., общее число подтвержденных случаев в России может превысить 480 тыс. чел. К середине мая, по крайней мере, в Москве число новых случаев стало снижаться, что создало предпосылки для снижения ограничений на передвижения жителей. В работе показано с помощью эконометрических методов, что для разных периодов диффузии на распространение заболевания влияют различные характеристики регионов. Среди них можно отметить высокую плотность населения в городах, близость к крупнейшим агломерациям, повышенную долю наиболее активной и часто путешествующей части населения (новаторов, мигрантов), интенсивные связи внутри сообщества и с другими странами и регионами. Скорость распространения выше в регионах с высокой подверженностью населения заболеваниям, что подтверждает тезисы о значимости капитала здоровья региона. На начальном этапе случайные факторы преобладали. В заключении приведены некоторые направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: диффузия инноваций, коронавирусная инфекция, регионы России, факторы распространения заболеваний, капитал здоровья, плотность населения, социальные связи, трудовая миграция, туризм, медицинская география

DOI: 10.31857/S2587556620040159

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия в России и за рубежом наблюдается рост повторяемости опасных природных явлений¹, в том числе эпидемий. Но пандемию COVID-19 отличает масштаб заболеваемости в мире, беспрецедентные действия властей и реакция общества. На середину мая 2020 г.

в мире было зафиксировано более 4.5 млн подтвержденных случаев заражения, из них более 1.56 млн чел. выздоровели, но 0.29 млн чел. погибли². В России на 12 мая 2020 г. более 230 тыс. зарегистрированных случаев заражения коронавирусом SARS-CoV-2, из них около 43 тыс. человек выписаны, но зафиксировано более 2100 смертей³.

¹ IPCC. Fifth Assessment Report (AR5). 2014. <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar5/> (дата обращения 11.05.2020).

² Статистика Коронавируса сегодня. 2020. <https://koronavirus-ncov.ru/> (дата обращения 12.05.2020).

На наш взгляд, рост уязвимости населения к различным заболеваниям определяют несколько глобальных трендов: изменение климата и распространение инфекций и паразитов в не адаптированные к ним природные зоны; увеличение плотности (урбанизация) и мобильности населения, что ведет к быстрому распространению болезней; старение населения и ухудшение экологической ситуации, что приводит к снижению уровня здоровья (иммунитета) и высокой подверженности заболеваниям. Поэтому есть основания полагать, что число локальных вспышек и эпидемий в будущем будет расти.

На наш взгляд, в географии распространения зарегистрированных случаев заболевания прослеживаются классические факторы диффузии нововведений, учитывающей структуру местных сообществ по плотности населения, связям, социальной активности, доходам и т.д. Как нам представляется, здесь вполне уместно использование соответствующих моделей пространственной диффузии [1, 2] с рядом ограничений, подробно рассмотренных в методической части. В данной работе применение модели диффузии направлено не на изучение новых технологий постфактум, а на выявление факторов и сценариев распространения заболевания. Гипотеза исследования состоит в том, что пространственное распространение COVID-19 в России может быть относительно корректно смоделировано с помощью моделей диффузии социальных нововведений, а отклонения от стандартной модели определяются случайными факторами, ограниченностью статистических данных, действенностью карантинных и иных (тестирование) мер властей и реакцией общества на них. В регионах с малым числом выявленных заболевших стохастическая составляющая и субъективные факторы могут приводить к существенным отклонениям от модели. Однако по мере распространения вируса в регионы значение случайных факторов снижается, но растет влияние действий властей.

Цель исследования — описать с помощью модели диффузии нововведений географию и динамику распространения фиксируемых (зарегистрированных, или подтвержденных) случаев COVID-19 в России, а также оценить возможные факторы, влияющие на этот процесс в регионах.

ОБЗОР МОДЕЛЕЙ ДИФфуЗИИ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ СОЦИАЛЬНЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ

Диффузия нововведений — это процесс распространения новых явлений в сообществе по различным коммуникационным каналам [27].

³ Роспотребнадзор России. 2020. Новости о коронавирусе. <https://rosпотребнадзор.ru/about/info/news/> (дата обращения 12.05.2020).

Традиционно распространение нововведений в сообществе изучают социологи [27], экономисты [15, 18] и географы [20], которые накопили большой опыт с точки зрения моделирования социальных изменений (революции, новые институты, законы и т.д.), внедрения новых технологий (интернет, сотовая связь и т.д.), освоения новых продуктов и услуг (компьютеры, смартфоны, интернет-банкинг и т.д.), распространения информации (реклама, пропаганда и т.д.)⁴. Отдельные работы посвящены моделированию социальных заболеваний, таких как ВИЧ/СПИД [16], которые не просто распространяются от одного носителя к другому по принципу заражения (соседства), но и учитывают структуру сообществ. Как мы покажем ниже, COVID-19 также можно отнести к этому типу заболеваний.

Согласно классическим работам [20, 27], не потерявшим своей актуальности, нововведения, в том числе социальные заболевания (среди них и коронавирус), распространяются в сообществе в своей восходящей части (до точки насыщения α) в соответствии с логистической кривой в кумулятивной форме (S -образная светлая кривая на рис. 1а — доля зараженных в отдельные моменты времени) и подчиняются закону нормального распределения для новых заражений (колоколообразная темная кривая) [1].

По времени распространения заболевания от первого зафиксированного случая в сообществе можно выделить несколько групп людей [27] (ось x на рис. 1а; табл. 1), отличающихся по способности воспринимать заболевание (возраст) и переносить его, в первую очередь, исходя из их социальной активности: новаторы (1), ранние последователи (2), раннее большинство (3), позднее большинство (4), отстающие (5).

Новаторы — активные и открытые члены сообщества, склонные к перемещениям за пределы страны. В России это часто молодые люди, студенты, представители творческих профессий, спортсмены, программисты и т.д. Так как они часто посещают другие страны вне зависимости от размера собственных доходов, то могли способствовать распространению вируса на начальных этапах. Заметим, что с точки зрения диффузии заболевания к этой категории можно отнести и отдельных иностранных работников из стран — центров заражения, а также представителей профессий, обслуживающих транспортные, туристические и иные сферы деятельности, связанные с международными контактами.

Ранние последователи — это, чаще всего, люди среднего возраста с высокими доходами и социальным статусом, политики, топ-менеджеры, высшие чиновники, известные ученые, врачи,

⁴ См. подробный обзор в [2, 26].

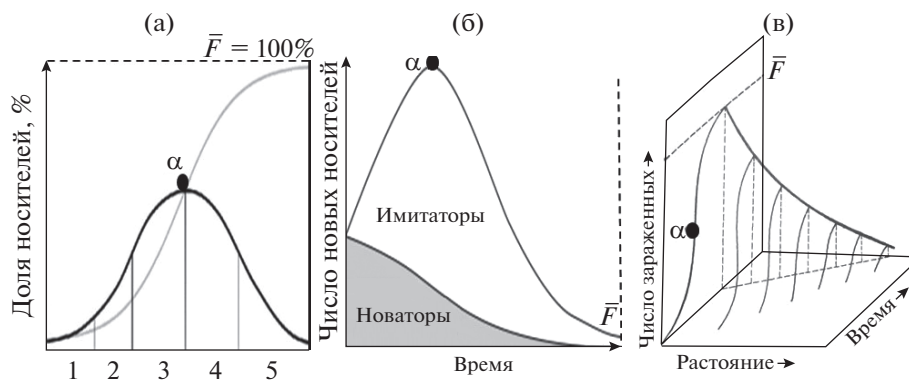


Рис. 1. (а) Доля заразившихся членов сообщества: светлая линия – кумулятивно, темная линия – новых носителей [27]. (б) Соотношение “новаторов” и “имитаторов” среди новых носителей [15]. (в) Зависимость кумулятивного числа носителей от времени и расстояния от источника заражения [25].

популярные представители творческих профессий (актеры, режиссеры, музыканты, писатели и т.д.) и др. Они активно участвуют в различных публичных мероприятиях, посещают зарубежные страны, в том числе в ходе деловых поездок. Благодаря своему статусу они способны игнорировать требования правительства. Ранние последователи сами способны оказывать давление на руководство страны и регионов при принятии тех или иных мер. Способны заразить наибольшее число людей на начальных этапах распространения, так как находятся в центре социальных сетей.

Распространение заболевания можно остановить, в первую очередь, изолировав новаторов и ранних последователей, но именно это – наиболее сложная задача. Заметим, что системы здравоохранения во всем мире не рассчитаны даже на прием новаторов, так как число койко-мест не покрывает и 1.5% жителей в стране-лидере по этому показателю – Японии, а число инфекционных койко-мест еще меньше⁵. Поэтому полная госпитализация зараженных невозможна в большинстве стран, соответственно меры правительства ограничиваются рекомендациями соблюдения карантина и самоизоляции, которые могут быть неэффективны по указанным выше причинам.

Значимым фактором распространения инфекционных заболеваний являются различные формы личных контактов. После того как новаторы и ранние последователи заразились за рубежом, они, часто не подозревая об этом⁶, принесли ин-

фекцию в свои сообщества. Чем выше число потенциальных носителей инфекции, тем выше ее скорость распространения, тем больше новых носителей. Экспоненциальное ускорение процесса происходит до тех пор, пока число зараженных членов общества не достигнет половины от максимально возможного (точка перегиба S-образной кривой – α на рис. 1). После этого процесс сменяется противоположной тенденцией.

Ф. Басс [15] разделил сообщество на две группы в зависимости от модели распространения нововведений (рис. 1б, формула (1)). Первая – новаторы, которые освоили нововведение без взаимодействия с членами своего сообщества. В нашем случае речь идет о первых зарегистрированных зараженных, посетивших очаги заболевания за рубежом (Китай, Италия). Вторая группа – “имитаторы”, освоившие нововведение после личного контакта с новаторами, т.е. заразившиеся уже в России. Таким образом, вероятность заражения человека коронавирусом в момент времени t может быть определена линейной зависимостью от числа носителей вируса в сообществе:

$$P(t) = p + q/F(t), \tag{1}$$

где p – коэффициент первичного заражения, или доля новаторов, q – коэффициент имитации, или доля зараженных от первичных носителей, $F(t)$ – доля носителей инфекции к моменту времени t . В этом случае функция вероятности – это распределение, близкое к нормальному (рис. 1б). Рассчитав производную, получаем функцию плотности вероятности появления нового зараженного в момент времени t ($f(t)$):

$$f(t) = dF(t)/dt = \left[p + \frac{q}{F} F(t) \right] [\bar{F} - F(t)], \tag{2}$$

где \bar{F} – максимальное потенциальное число заболевших.

⁵ OECD. Health Care Resources. 2019. <https://data.oecd.org/healthqt/hospital-beds.htm> (дата обращения 11.05.2020).

⁶ Коронавирусная инфекция в отличие от классической диффузии отличается существенным периодом, когда носитель не знает о своей болезни и не подает внешних признаков, что ускоряет распространение при несоблюдении карантинных мер.

Таблица 1. Характеристики групп людей согласно их подверженности заболеванию (освоению нововведения – в классических работах)

Группа	Возраст	Доход	Способность перенести заболевание без осложнений	Социальный статус	Образование	Поведение при принятии решений	Контакты с внешней средой
Новаторы (1 на рис. 1а; ≈ 2.5%)	Молодой	Разный	Высокая	Разный	Среднее и высшее	Рискованны, менее склонны к выполнению правил	Часты путешествия
Ранние последователи (2; ≈ 13.5%)	Средний	Высокий	Средневысокая	Социальные лидеры	Высшее	Менее рискованны, прагматичны	Часты деловые поездки
Раннее большинство (3; ≈ 34%)	Средний	Средний класс	Средняя	Высокий и средний	Высшее	Прагматичны	Активно посещают мероприятия
Позднее большинство (4; ≈ 34%)	Старший	Ниже среднего	Средняя	Средний и низкий	Среднее	Консервативны, скептики	Менее активны
Отстающие (5; ≈ 16%)	Старший	Низкий	Средненизкая	Низкий	Базовое	Традиционны	Изолированы

Составлено авторами в соответствии с [1, 2, 27].

Развитие подхода привело к появлению новых моделей [25], которые могут быть применимы для анализа распространения заболеваний. Например, пространственные модели описывают особенности распространения вируса в зависимости от близости источника заражения (Китая или Москвы) (рис. 1в): в самом источнике – максимальное число зараженных и скорость распро-

странения, вблизи него эти параметры снижаются, а на периферии – минимальны. При этом можно выделить три механизма пространственной диффузии [2, 4, 20] (рис. 2):

– *контагиозный* (площадной, соседства), предполагающий заражение жителей по модели соседства, или классическое заражение (рис. 2а) – распространяется равномерно во всех направле-

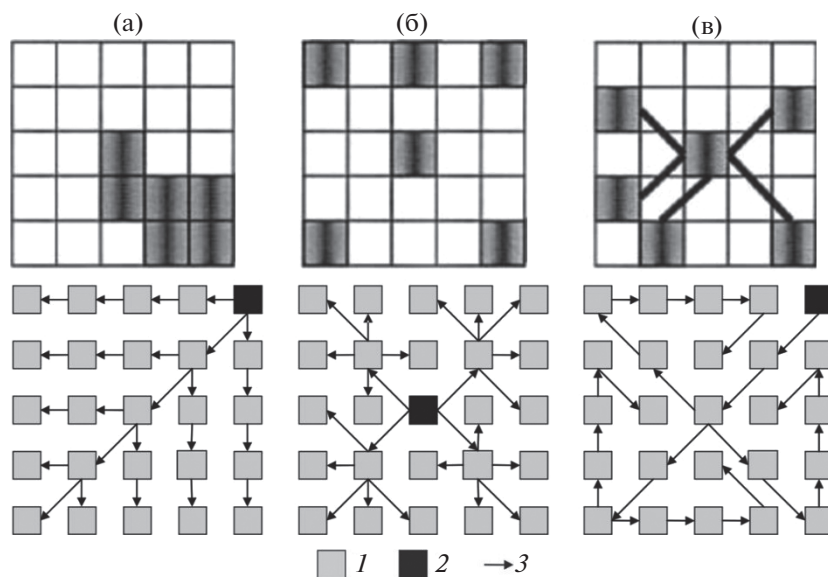


Рис. 2. Механизмы пространственного распространения коронавируса: (а) – контагиозный, (б) – каскадный, (в) – сетевой. 1 – ареал; 2 – ареал-источник заражения; 3 – направление распространения заболевания. Источник: [4, 5].

ниях от источника заражения, например, из Москвы в Московскую область в рамках мобильности между домом и работой, между домом и дачей и т.д.;

– *каскадный* (иерархический), предполагающий первичное заражение в крупнейших агломерациях новаторов, посетивших другие страны; распространяется по иерархии городов (рис. 2б);

– *сетевой* (цепной), совмещающий первые две модели и предполагающий распространение болезни по транспортным сетям (рис. 2в), в нашем случае – аэропортам, авиационным сообщениям, портам; т.е. заражение сначала концентрируется в транспортных хабах⁷.

На микроуровнях (внутри городских сообществ) работает преимущественно контактная модель, а на макроуровне (регионов и стран) преобладает иерархическая и сетевая.

МЕТОДИКА И ЕЕ ОГРАНИЧЕНИЯ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К АНАЛИЗУ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАБОЛЕВАНИЙ

Для применения модели мы предположили, что кривая на рис. 1б может быть описана уравнением параболы, а тогда, преобразовав формулу (2) в недифференциальный вид, мы получим следующее выражение⁸:

$$\Delta F(t) = p\bar{F} + (b\bar{F} - p)F(t) - bF(t)^2 = A_1 + A_2F(t) + A_3F(t)^2 + \varepsilon(t), \quad (3)$$

где $\Delta F(t)$ – число новых зараженных на душу населения в момент t , $\varepsilon(t)$ – остаток. В этом случае достаточно легко найти основные параметры квадратного уравнения: точку перегиба (экстремум α на рис. 1), максимальное значение числа зараженных (\bar{F} на рис. 1). Тем не менее само по себе моделирование возможно только после достижения первого этапа (появления имитаторов), а его точность становится достаточной для построения прогнозов лишь при достижении точки перегиба (экстремум параболы).

Классическая модель распространения инфекционного заболевания SIR, в отличие от описанной нами, учитывает не только *Infectious*, т.е. инфицированных, но и другие связанные с распространением компоненты: *Susceptible* (восприимчивые) и *Recovered* (выздоровевшие) [22, 29]. В модели SIER также рассматриваются *Exposed* (потенциально подверженные, латентные больные), а в модели SEIRD учитываются *Dead* (умершие).

⁷ Замкнутые пространства с большим числом потенциальных носителей (самолеты, автобусы, морские суда и т.д.) способствуют быстрому распространению вируса.

⁸ Также для моделирования может быть использован более точный метод, основанный на оценке максимального правдоподобия.

Таким образом, они дают возможность моделировать самый важный параметр – уровень смертности, и оценивать нагрузку на систему здравоохранения. Модели несовершенны и могут недооценивать пик заболевания и переоценивать его длительность [19, 23]. Контагиозность вируса могла быть недооценена [24]. Одна из сложностей эпидемиологических моделей связана с необходимостью определения потенциального числа подверженных людей, коэффициенты контакта в обществе, в госпитале и т.д. Из-за отсутствия качественных данных часто используются заданные значения указанных параметров, основанные на предшествующих эпидемиях. При этом моделируется реальное число зараженных, а не статистически фиксируемое.

Любая модель – это всегда упрощенное отражение лишь части влияющих на процесс факторов. Медицинскую составляющую достаточно успешно моделируют соответствующие эпидемиологические модели. Предложенная авторами спецификация модели диффузии инноваций (3) лишь с оговорками может служить цели прогнозирования, так как зависит только от предшествующей скорости и числа зараженных. Эти значения сильно волатильны⁹, а различия между малыми числами на первых этапах вовсе могут быть случайными. Остальные факторы, в том числе и действия правительства, предполагаются неизменными. Но очевидно, что, например, продление режима самоизоляции или введение чрезвычайного положения могут кардинально снизить масштабы и скорость заражения. Сами по себе меры и их исполнение могут существенно различаться по регионам России. Это зависит от процедур контроля и принуждения к исполнению, от позиции бизнеса, технических возможностей в отношении удаленной работы, от информационного фона и изменения настроения в обществе и т.д. Но модель может быть применима для задач географического анализа фиксируемых случаев заболевания и наблюдения отклонений в результате действия властей¹⁰.

Модели диффузии основаны на описании социальных процессов, и число подтвержденных случаев служит их отражением, а не исключительно результатом биологических процессов. Дело в том, что ключевой фактор – межличностные контакты, общение, а фиксируемость заболевания зависит от информационного фона (инфодемии) [12] и других социально-экономических факторов: структуры населения, развития

⁹ Crozier C. Forecasting s-curves is hard. <https://constancecrozier.com/2020/04/16/forecasting-s-curves-is-hard/> (дата обращения 11.05.2020).

¹⁰ Кстати, модель SEIR также успешно применялась для моделирования диффузии новых технологий [32], т.е. здесь наблюдается процесс взаимного научного обогащения.

Таблица 2. Предпосылки и ограничения применения модели диффузии нововведений при моделировании эпидемии COVID-19

Предпосылки	Ограничения
Процесс распространения нововведения и его фиксация в статистике точна, непротиворечива и без временных лагов	Соотношение реально существующих случаев заражения (по которым идут процессы передачи вируса) и зарегистрированных случаев (на которых мы строим модельные оценки) могут различаться по нескольким причинам: – нет всеобщего тестирования, а потому потенциальное число зараженных может быть существенно больше ¹ ; – задержка в факте заболевания, обращении к врачу и фиксации в статистике [10]; – ненадежность имеющихся тестов [10], высокая доля ложных результатов; – низкий уровень обеспеченности тестами на ранних этапах ² ; – разные способы организации тестирования по массовости, обязательности и длительности ³ ; – разные методы определения заболевших ⁴
Диффузия повсеместно начинается примерно в одно время	В городах и регионах России начало распространения коронавируса разновременное
Диффузия достигает примерно равного значения насыщения	Доля максимального числа фиксируемых зараженных во всех городах и регионах различна
Форма распространения близка к логистической кривой	Не для всех городов и регионов характерно, зависит от действий властей, структуры сообщества и т.д.
Бинарность процесса принятия нововведения (принял или не принял)	Пациент может выздороветь, может не показывать симптомов, болезнь может не быть зафиксирована

¹ Первые проверки на антитела в США и Италии показали, что большинство носителей не обращались за помощью и не проходили тестирование, так как болезнь протекала в легкой форме. ² По данным на середину апреля 2020 г. это ограничение в России преодолено [10], но все еще возможны региональные диспропорции, особенно с учетом неравномерной представленности частных лабораторий (“Гемотест” и др.). ³ В разных регионах могут одновременно применяться разные подходы: тестируются только госпитализированные с подозрительными симптомами, все контактировавшие с ними, группы риска, все желающие, рандомизированная выборка. Подходы стремительно меняются по мере роста числа заболевших, роста доступности тестов и т.д. В частности, в России 8 апреля разрешено тестирование в частных лабораториях. Даже при близком числе тестов на душу населения разные подходы дадут различающие результаты. Но при анализе на уровне регионов России можно условно говорить о близких требованиях, по крайней мере, в государственных медицинских учреждениях. ⁴ С 8 апреля изменилась методика фиксации диагноза. По рекомендации Минздрава России стали фиксировать наличие заболевания не только по положительным тестам, но и по клиническим признакам.

медицины, обеспеченности тестами, давления правительства и т.д.

Применяя модель диффузии, необходимо учесть ряд ограничений при интерпретации результатов (табл. 2). Особенно важно несоответствие реальных случаев заражения и фиксируемых статистикой, так как фактически мы наблюдаем в статистике Роспотребнадзора и Всемирной организации здравоохранения заниженную и запаздывающую статистику. И есть основания полагать, что масштабы этих искажений изменяются по фазам эпидемии и от страны к стране, от региона к региону и т.д. в зависимости от состояния медицины, обеспеченности тестами, состояния здоровья населения и т.д. Однако, на наш взгляд, это число пропорционально в регионах реальному числу зараженных с определенным лагом (как будет показано далее – примерно две недели),

причем по мере увеличения числа тестов число несоответствий будет уменьшаться.

За неимением более достоверной статистики можно считать, что моделируются только наиболее тяжелые формы распространения заболевания, которые привели человека к необходимости сдать анализы и обратиться к специалистам, то есть не учитываются латентные формы. При этом и масштабы тестирования, и проявления латентных форм заболевания находятся во взаимосвязи с географическими факторами распространения эпидемии (в том числе дихотомия город–деревня). Иными словами, фиксируемая заболеваемость является отражением этих процессов. Есть основания полагать, что корреляция между фиксируемой заболеваемостью и реальной довольно высока на уровне регионов на более поздних стадиях, когда случайные факторы, вопросы тестирования играют меньшую роль¹¹.

В отличие от эпидемиологических моделей нами предполагается симметричность темпов заболевания после точки перегиба, что, например, не характерно для смертности от COVID-19¹² (фактическое число смертей быстро снижается после точки перегиба). В соответствии же с моделью диффузии нововведений, наоборот, нисходящая волна заражений может быть в регионах более растянута (рис. 1в), т.е. затухание может проходить более длительное время, чем в период восходящей волны. Вместе с тем мы моделируем лишь активную часть эпидемии с большим числом новых случаев. Очевидно, что отдельные вспышки заболевания будут фиксироваться долгое время в отсутствие вакцинации населения. Подтвердить или опровергнуть эти предположения удастся в течение ближайших месяцев.

Для преодоления этих и иных ограничений могут использоваться многофакторные модели, которые в качестве контрольных переменных учитывают уровень развития медицины, заболеваемость, тестируемость и иные факторы. Однако подобные модели в условиях быстрого распространения заболевания фактически не позволяют учитывать ежедневное изменение факторов. Большинство индикаторов в российской статистике фиксируются с лагом в один-два года и не имеют помесечной или поквартальной разбивки даже по регионам, не говоря уже о муниципальных образованиях. Поэтому мы вынуждены использовать метод наименьших квадратов для конкретного периода распространения заболевания в регионах России, делая допущение, что сами факторы (независимые переменные) за прошедшее время с момента их фиксации в статистике не изменились и не имеют существенной искажающей внутригодовой динамики¹³.

Частично выбор регионального уровня анализа обусловлен наличием доступной статистики, хотя это дает обобщенные результаты для моделирования явления, которое распространяется при близких контактах между людьми. В то же время подобного рода моделирование возможно лишь на региональном уровне, достаточном для выявления географических закономерностей диффузии. Например, на внутригородском уровне действуют преимущественно микрогеографические и случайные факторы, связанные с разме-

щением больниц, домов престарелых, точек скопления людей и т.д. Разумеется, авторы понимают и роль субъективного фактора, но он также наиболее значим на микроуровне.

Для выявления факторов, оказавших влияние на распространение заражения, в своем исследовании мы использовали следующую модель [1]:

$$\ln \Delta F_{i,t} = \text{const} + \alpha \ln F_{i,t-1} + \beta \ln \bar{F}_i(fn_{i,j}) + \varepsilon(t), \quad (4)$$

где ΔF – число новых зараженных на душу населения за сутки; i – регион России, t – сутки, $F_{(t-1)}$ – число носителей на душу населения в предыдущие сутки; $\bar{F}n$ – максимальное потенциальное число зараженных, которое зависит от n факторов в период j :

– характеристики пространства распространения: плотность населения, концентрация в одном городе, плотность транспортной сети, расстояние до очага заболевания и т.д.;

– характеристики регионального сообщества: доля новаторов, уровень доходов, образования, интенсивность взаимодействия внутри сообщества и с другими сообществами (туристы), действия властей и т.д.;

– характеристики распространения заболевания: число дней с первого заражения, общее число зараженных в регионе, подверженность заболеванию населения (возраст, общий уровень здоровья, обеспеченность медицинской инфраструктурой) и т.д.

Как респираторное заболевание COVID-19 распространяется наиболее быстро благодаря личным контактам. Для их учета необходимо понимать, сколько жителей региона проживает на территориях с разной плотностью населения, что частично позволяет преодолеть недостаток слишком обобщенного уровня анализа. При прочих равных условиях более высокая плотность ведет к большему числу контактов между людьми и более высокой скорости распространения заболевания.

Описание гипотез и всех переменных дано в табл. 3.

Для каждого этапа характерно свое сочетание факторов [1, 2]. На начальном этапе большее значение может иметь положение к источнику инноваций (согласно модели соседства), транспортным центрам (сетевая модель диффузии) и доля потенциальных новаторов. В соответствии с иерархической моделью диффузии наиболее подвержены крупные города, плотно заселенные центры с крупными аэропортами, где выше доля часто путешествующих за рубеж членов сообщества и мигрантов. Большая часть дисперсии остается необъясненной из-за случайных факторов. На этапе быстрого распространения ключевую роль может играть структура сообщества, связи между новаторами и большинством. Заражение

¹¹В России проведено на 11.05.2020 г. свыше 5.4 млн лабораторных исследований на COVID-19, что можно считать довольно высоким охватом населения (<https://gospotrebнадзор.ru/about/info/news/>). Тезис о причинно-следственных связях между фиксируемой заболеваемостью и числом проведенных тестов подробнее обсуждается в [10].

¹²Carl T. Bergstrom. https://twitter.com/CT_Bergstrom/status/1250304069119275009 (дата обращения 12.05.2020).

¹³К сожалению, для большинства показателей это не так, поскольку в России в целом наблюдается сильная сезонная динамика в показателях заболеваемости, смертности и др.

Таблица 3. Основные факторы и индикаторы

Группа факторов	Фактор	Гипотеза о направлении влияния	Обозначение индикатора	Описание	
Характеристики пространства	Плотность потенциального взаимодействия людей	+/-	<i>Pop</i>	Доля жителей региона, проживающих в муниципалитетах с плотностью населения в заданном интервале, % (табл. 4)	
	Концентрация населения	+	<i>Urb</i>	Доля городских жителей, %	
	Близость к крупным источникам потенциального взаимодействия	+	<i>Demo</i>	Демогеографический потенциал региона (численность населения других регионов, деленная на квадрат расстояния до них), чел./км ²	
Характеристики регионального сообщества	Плотность транспортной сети	+	<i>Aero</i>	Пассажиропоток аэропортов региона*, млн чел.	
	Уровень жизни населения	+	<i>Poverty</i>	Уровень бедности, %	
	Доля новаторов		+	<i>Income Min</i>	Среднедушевые доходы населения, отнесенные к прожиточному минимуму, %
				<i>UrbHEd</i>	Доля городских занятых с высшим образованием [31]
	Интенсивность внутреннего взаимодействия, связанная с уровнем доверия в сообществе		+	<i>Online</i>	Доля населения, пользующегося интернетом для заказа товаров и услуг, %
				<i>Crime</i>	Число преступлений на душу населения [3]
	Интенсивность внешних взаимодействий		+	<i>Unform</i>	Доля неформальной занятости в общей занятости, %
<i>Tur2</i>				Число жителей, отправленных в туры в Китай, Италию, Францию и Германию, на 1 млн жителей	
<i>RusTour</i>				Численность граждан России, размещенных в коллективных средствах размещения, на 1 млн жителей региона	
Характеристики заболеваемости и уязвимость сообщества	Подверженность населения заболеваниям и возможности для выявления (фиксации)	+	<i>Migr</i>	Миграционный прирост	
			<i>Desgov</i>	Среднегодовой уровень заболеваемости, фиксируемый государственными медучреждениями, тыс. чел.	
			<i>Medexp</i>	Бюджетные расходы на здравоохранение на душу населения, тыс. руб./чел.	
	Начальный уровень заболеваемости коронавирусом	+	<i>Medpers</i>	Численность среднего медицинского персонала, на тыс. чел.	
			<i>Coron(t-1)</i>	Число носителей (кумулятивное число подтвержденных случаев) на душу населения в регионе день назад ($F_{(t-1)}$) в формуле (4)	
Срок распространения коронавируса		+/- в зависимости от стадии	<i>Day</i>	Число дней, прошедших с начала первого зафиксированного случая	

*<http://www.avia-adv.ru/placement/airports/passenger-traffic.htm> Источник: значения указанных индикаторов рассчитаны авторами на последний доступный год (2018–2020) по данным Росстата и Роспотребнадзора (*Coron (t - 1)*, *Day*), если не указано иное.

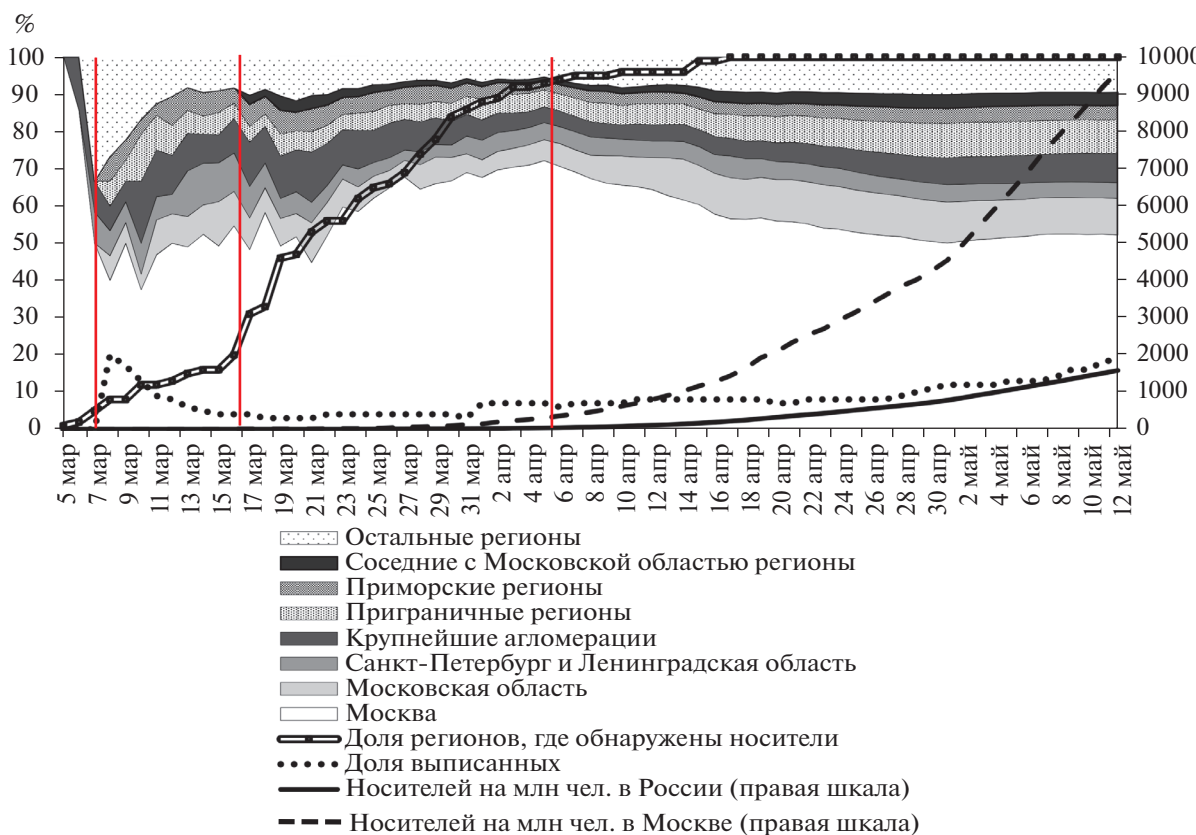


Рис. 3. География и динамика подтвержденных случаев COVID-19 в России. В процентах дана доля различных групп регионов в кумулятивном числе подтвержденных случаев COVID-19.

охватывает регионы вблизи очагов заболевания, а соответственно, значима доля временных мигрантов. Более бедные регионы с высокой общей заболеваемостью могут быть более подвержены распространению COVID-19. Мы использовали уровень преступности и неформальной занятости как обратный индикатор доверия членов сообщества друг другу, а соответственно, как косвенный показатель потенциальных внутренних связей и развития малого и среднего бизнеса (точек притяжения для жителей) [3]. На этапе после точки перегиба снижается роль случайных факторов, число новых заражений растет в удаленных регионах. Чем раньше в регионе зафиксирован первый случай, тем меньше на этом этапе скорость распространения инфекции.

Для описания каждого фактора (и гипотезы) выбрано несколько сильно коррелирующих переменных, поэтому авторы тестировали индикаторы поочередно, выбирая модель с лучшими характеристиками: максимальный R^2 , минимальный критерий Шварца, значимость (*) большего числа переменных. Независимые переменные взяты с лагом, что частично решает возможную проблему эндогенности. Но в регрессиях мы

использовали только пространственные данные без учета изменения переменных во времени, поэтому более корректно говорить не о факторах, определяющих распространение заболевания, а о характеристиках регионов, где заболеваемость была выше.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

География и динамика подтвержденных случаев COVID-19 в России

Рассматривая динамику распространения заболевания по регионам России (рис. 3 и 4), можно проследить классические стадии пространственной диффузии [2, 20].

Первый этап **зарождения** до 7 марта 2020 г.: более 80% первых зарегистрированных зараженных (новаторы) концентрируются рядом с источником заражения (китайские рабочие в Забайкальском крае) и в центре городской иерархии: итальянские работники и российские туристы из Италии в Москве. Остальные – случайным образом среди транспортных хабов и вблизи зарубежного источника заражения. Очаг заражения

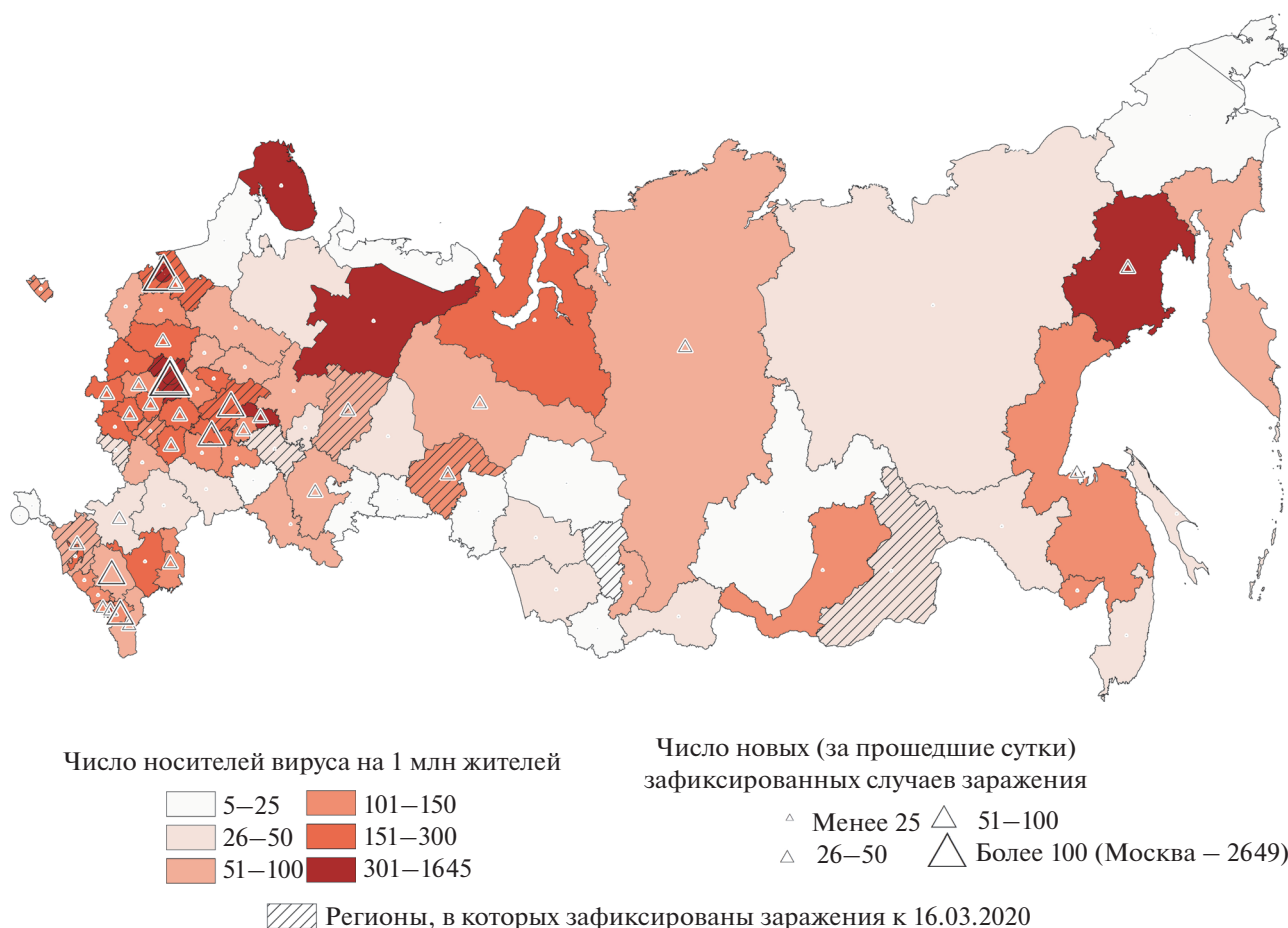


Рис. 4. Подтвержденные случаи COVID-19 в регионах России на 18.04.2020.

(Москва) и новаторы (иностранцы работники) могут быть слабо связаны с другими региональными сообществами. Есть возможность остановить заболевание в рамках строгого карантина и принудительной госпитализации прибывающих [13]. Российские власти эвакуируют российских граждан из китайской провинции Хубэй, наиболее пострадавшей от эпидемии. Всех приезжающих из очагов заболевания помещают на карантин. Правительство временно приостановит выдачу гражданам Китая рабочих виз, ограничено авиасообщение с Китаем и пересечение российско-монгольской границы. Но эти меры оказались недостаточно эффективными и запоздалыми¹⁴, так как далеко не все прибывшие из-за рубежа соблюдали карантин.

На втором этапе *возникновения и медленного распространения* с 7 до 15 марта 2020 г. появились первые зарегистрированные зараженные эффектом соседства внутри страны – имитаторы¹⁵. С

этого момента остановить распространение заболевания становится проблематичным. Около 80% носителей концентрируются в источнике первичного заражения (Москва), центрах городской иерархии (Санкт-Петербург, Нижегородская область, Татарстан, Пермский край) и крупных авиахабах (Краснодарский край, Калининградская область), куда приезжают первые зараженные из-за рубежа. В результате эффекта соседства (имитации) появляются зараженные за пределами крупнейших агломераций – в Московской и Ленинградской областях и первые заражения прибывших из-за рубежа в иных регионах (Липецкая, Кемеровская области). Нет умерших. Это наиболее важный момент для действия властей, так как еще есть возможность ужесточения карантина и госпитализации вновь прибывших, введение режима самоизоляции. Минобрнауки России 16 марта рекомендовало российским вузам перейти на дистанционное обучение. Ограничено авиасообщение со странами Евросоюза.

¹⁴Во всяком случае в сравнении с мерами по борьбе со вспышкой эпидемии холеры на юге СССР в 1970 г. [13].

¹⁵Роспотребнадзор рассказал о трех случаях заражения коронавирусом внутри России. <https://tass.ru/obschestvo/7983369> (дата обращения 12.05.2020).

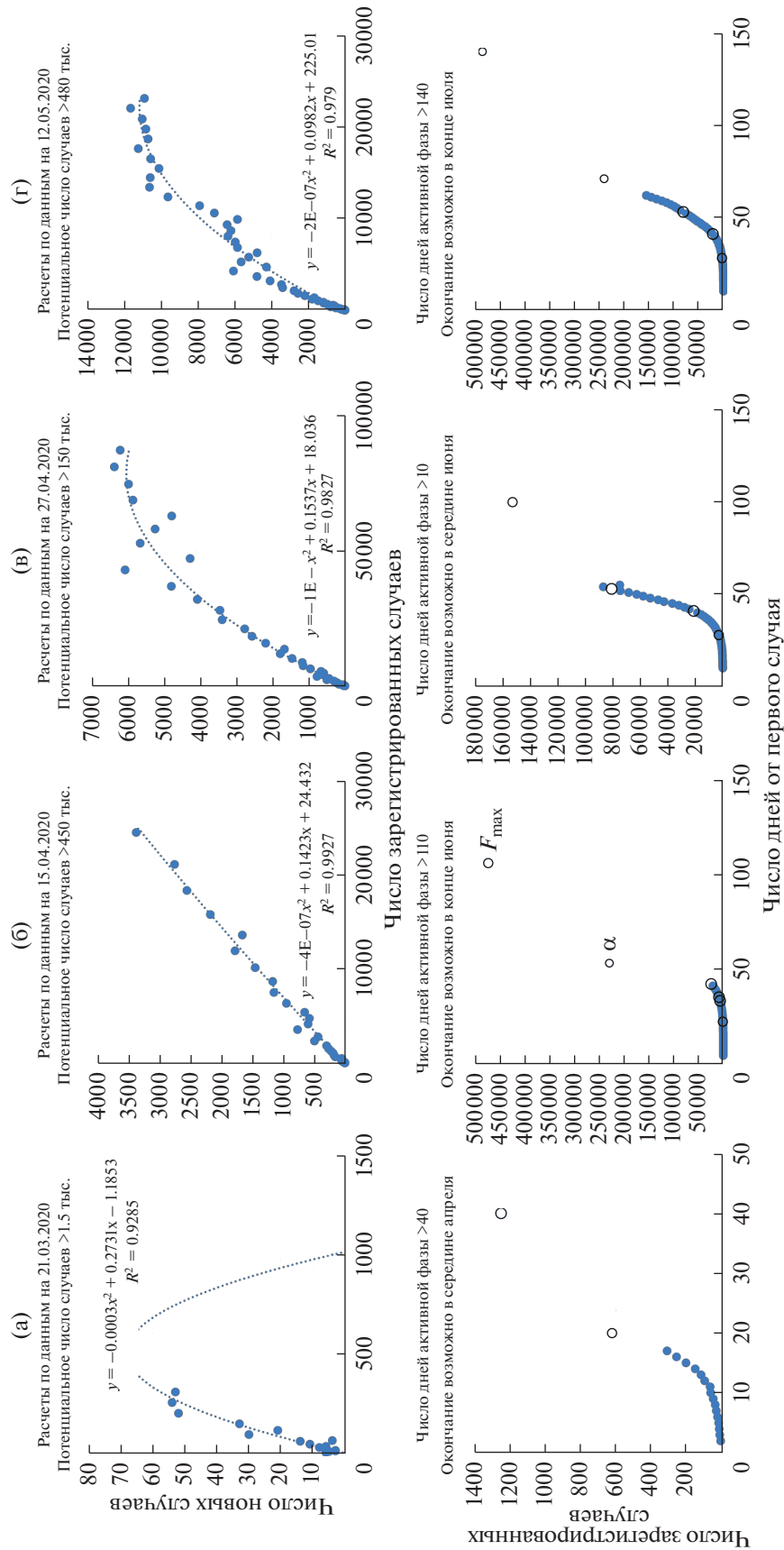


Рис. 5. Сценарии распространения подтвержденных случаев COVID-19 в России в зависимости от даты, на которую были проведены расчеты. *Примечание:* на графиках в нижнем ряду незакрашенные точки обозначают смоделированные значения точки перегиба (когда заканчивается экспоненциальный рост, экстремум на параболе в верхнем ряду) и максимального числа носителей.

Премьер-министр России поручил подготовить план мер в связи с коронавирусом. В Новой Москве начали строить лечебные корпуса инфекционного центра. С 21 марта в Москве запретили проведение мероприятий с числом участников более 50 человек, все школьники отправлены на каникулы.

С 16 марта наступает этап *быстрого распространения* коронавирусной инфекции: экспоненциальный рост числа зафиксированных новых зараженных — прирост за день с 67 до 97 чел. На следующий день число регионов, где обнаружено заболевание, выросло с 14 до 26, 19 марта — до 39 регионов. С 6 апреля концентрация в Москве начинает снижаться за счет быстрого роста числа носителей в ближней периферии Московской и Санкт-Петербургской агломераций (эффект соседства): Московская, Ленинградская, Тульская области, а также в крупнейших агломерациях: Нижегородская, Екатеринбургская, Краснодарская, Казанская, Челябинская, Пермская, Самарская, Воронежская, Новосибирская. Появляются первые очаги за пределами крупных агломераций, связанные с наличием постоянного авиасообщения (сетевая модель диффузии), мигрантов, вахтовиков и высокой плотности внутри городов: Коми, Дагестан, Крым, Саратовская область, Ханты-Мансийский и Ямало-Ненецкий автономные округа. В этот же день официально подтверждена первая смерть больного с коронавирусом¹⁶. Диффузия распространилась на всю территорию страны — 80 регионов из 85: до середины апреля не охваченными оставались только наиболее удаленные регионы с низкой транспортной доступностью и низкой плотностью населения: Ненецкий автономный округ, Республика Алтай, Республика Тыва и Чукотский автономный округ. К 17 апреля во всех регионах зафиксированы случаи заболевания, к концу апреля в большинстве регионов наблюдались смертельные исходы. На этой стадии прекратить распространение заболевания становится невозможным. 31 марта власти 26 регионов, включая крупнейшие: Москва, Санкт-Петербург, Московская, Нижегородская, Свердловская, Ростовская области, Татарстан, ввели режим самоизоляции, что должно было замедлить процесс распространения и позволить системе здравоохранения справиться с наплывом заболевших и снизить число дополнительных смертей.

Обращает на себя внимание, что на экспоненциальной стадии высок уровень заражения в Мурманской области и Республике Коми (см. рис. 4): в северных регионах население концентрируется в нескольких городах, где высока доля

мигрантов и активно взаимодействие с другими городами и странами. Временные работники приезжают из Москвы, например, на строящиеся объекты компании ПАО «НОВАТЭК» в Мурманске, а местные жители выезжают на отдых южнее.

Предположительно, в начале мая распространение заболевания находится перед этапом *накопления* вблизи точки перегиба. Произошло повсеместное распространение со снижающейся скоростью в крупнейших центрах, растет доля регионов без крупных агломераций, увеличилась доля выздоровевших (см. рис. 3). При этом удельное число новых случаев заражения минимально в крупнейших городах (за исключением двух столиц и Нижнего Новгорода) и периферийных удаленных регионах. Если устойчивое снижение числа новых случаев будет зафиксировано в течение двух ближайших недель, то возможно снятие первых ограничений [11]. 7 мая 2020 г. зарегистрировано максимальное число новых подтвержденных случаев заболевания в Москве, после чего оно снижалось. С высокой вероятностью в Москве точка перегиба была пройдена.

Впереди стадия *насыщения*: затухающее распространение, во многих регионах массово не фиксируются новые случаи заражения, можно говорить об окончании активной стадии эпидемии, наблюдается экспоненциальный рост доли выздоровевших. На стадии *завершения* фиксируются единичные случаи и очаги. Возможно снятие почти всех ограничений. К сожалению, в отличие от диффузии технологий COVID-19 не исчезнет окончательно до изобретения вакцины и всеобщей вакцинации.

Моделирование динамики подтвержденных случаев COVID-19 в России

Для построения модели распространения COVID-19 в России по формуле (3) мы выбрали несколько периодов (рис. 5).

Первый период до 21.03.2020, когда наблюдалось небольшое снижение в числе зарегистрированных зараженных сразу после введения дополнительных противоэпидемических мероприятий в Москве. Согласно расчетам на эту дату в соответствии с предпосылками модели число подтвержденных случаев не превысило бы 1500 чел., а окончание активной стадии эпидемии пришлось бы на середину апреля (рис. 5а). Очевидно, что в этот период действовало большое число случайных факторов, малая охваченность тестами, что могло легко ввести руководство страны и ученых в заблуждение относительно будущих масштабов и опасности заболевания. Возможно, если бы максимально жесткие карантинные меры [13] по отношению к приезжающим из-за рубежа

¹⁶В России зафиксирована первая смерть от коронавируса. <https://lenta.ru/news/2020/03/19/infect/> (дата обращения 11.05.2020).

были введены сразу по всей стране в марте, описываемый сценарий мог быть реализован. Вместе с тем это было невозможно политически при столь малом числе зараженных. Некоторые члены российского общества и сегодня считают принятые меры чрезмерным ограничением свободы. Сценарий противоречит опыту Китая, где карантинные мероприятия были строже, но эпидемия длилась более трех месяцев. Хотя скорость и масштаб распространения в России согласно предпосылками модели пространственной диффузии (см. рис. 1в) могли снизиться по мере распространения от очага заболевания (Китай), так как накапливался опыт борьбы, могла быть выше готовность системы здравоохранения и т.д. Этот сценарий не был реализован, а число подтвержденных случаев в регионах стало расти экспоненциально.

Двадцать девятого марта в Москве и многих регионах ввели режим самоизоляции и население крупнейших городов снизило интенсивность передвижения¹⁷ и социальные контакты. До 15.04.2020 число новых случаев росло экспоненциально (рис. 5в), и в соответствии с предпосылками модели число всех случаев могло превысить 450 тысяч к концу июня. Но скорость распространения удалось снизить, а по данным на 27.04.2020 можно увидеть отклонение тренда от экспоненциального, которое началось через две недели после введения режима самоизоляции в Москве и ряде крупных городов (рис. 5в). На наш взгляд, это результат введенных ограничений и правильной реакции граждан. Новый сценарий предполагал уже около 150 тыс. зафиксированных случаев по всей стране и предположительное окончание активной стадии эпидемии к середине июня. Так как фактически в расчетах большинство зараженных — это москвичи, следует говорить, что эти предположения в большей мере применимы для столичной ситуации и крупных агломераций, но в других регионах возможно продолжение эпидемии.

Но этот оптимистичный сценарий не был реализован. В первые дни мая доля Москвы снова начала расти (см. рис. 3) при фактической стабилизации в половине регионов на протяжении недели. Возможно, это связано с введением пропусков в Москве, когда в середине апреля в метро образовались очереди. Между увеличением или снижением заражения и фиксацией заболеваний в статистике наблюдается примерно двухнедельный лаг. Расширение тестирования и начало те-

стирования на антитела также могли повлиять на динамику.

Как хорошо видно из графиков (см. рис. 5), модели диффузии, как и построенные по реальным данным эпидемиологические модели, довольно плохо предсказывают развитие событий на ранних этапах, так как не учитывают действия властей и реакции общества на них. Кроме того, малое число случаев повышает стохастическую составляющую. Предполагаемые сценарии на основе фактических данных будут существенно различаться для разных регионов России (см. рис. 1в), а для большинства подобные расчеты не применимы вовсе из-за преобладания случайных факторов и различий в условиях. Приходится признать, что предложенная модель не применима для прогнозирования из-за существенных искажений в статистике, непредсказуемости действий властей и реакции жителей, но может быть использована для описания процесса постфактум.

Факторы распространения COVID-19 в регионах России

Для выявления наиболее значимых региональных характеристик, влияющих на скорость распространения заболевания вначале мы проверяли гипотезу о высокой значимости плотности населения (табл. 4) с учетом контрольных переменных — кумулятивное число носителей на душу населения в регионе день назад ($Corona_{t-1}$), а также число дней, прошедших с начала первого зафиксированного случая (Day) [28]. В первый период до введения ограничений на передвижения (на 15.03.20) значимым региональным условием распространения была только доля жителей, проживающих в муниципалитетах, где плотность населения выше 3000 чел./км² ($Pop10000$). Преимущественно это наиболее плотно заселенные районы крупнейших агломераций страны (например, центральные районы Москвы) и транспортные хабы, как уже описывалось выше.

Во втором периоде, через две недели после введения ограничений (на 13.04.20), положительно значимым стал достигнутый уровень насыщения ($Corona_{t-1}$) и число дней с начала эпидемии (Day), т.е. число ранее заболевших, так как проявился эффект соседства и экспоненциального роста. При этом эпидемия не достигла наименее плотно населенных муниципалитетов, поэтому скорость распространения заболевания ниже в регионах, где высока доля жителей, проживающих в муниципалитетах с плотностью населения менее 8 чел./км² ($Pop8$). В период экспоненциального роста процесс охватил всю страну, а в регионах, где он начался раньше, скорость снизилась

¹⁷ Индекс самоизоляции. Яндекс. <https://yandex.ru/maps/covid19/isolation?ll=41.775580%2C54.894027&z=3> (дата обращения 11.05.2020).

Таблица 4. Результаты оценки влияния плотности населения в муниципалитетах на распространение COVID-19 по регионам России

Зависимая переменная – число новых подтвержденных случаев COVID-19 на душу населения в регионе России на указанную дату. Метод наименьших квадратов. Робастные стандартные ошибки. 83 региона

Переменная/ Дата	На 15.03.20		На 13.04.20		На 27.04.20		На 12.05.2020	
	1a	1b	3a	3b	4a	4b	5a	5b
<i>Const</i>	-0.12	0.14***	0.76	0.51	3.47*	2.5	-3.99	-1.42***
<i>l_Corona(t-1)</i>	0.029	-0.0075	0.30**	0.29**	0.84***	0.88***	0.73***	0.73***
<i>l_Day</i>	-0.052	-0.042	0.32	0.39**	-1.2***	-1.2**	0.41	
<i>l_Pop1</i>	0.034		-0.12		-0.12*		-0.004	
<i>l_Pop8</i>	0.0033		-0.18**	-0.19**	-0.07		0.07	
<i>l_Pop100</i>	0.035		-0.20*	-0.19**	-0.13		0.10	
<i>l_Pop500</i>	0.020		-0.20**	-0.20**	-0.07		0.07	
<i>l_Pop1000</i>	0.013		0.076		0.01		0.05	
<i>l_Pop3000</i>	0.028		-0.025		-0.04		0.11	
<i>l_Pop10000</i>	0.090**	0.072**	0.027		0.06	0.11*	0.16***	0.12***
R^2	0.09	0.07	0.31	0.29	0.66	0.63	0.58	0.51
Испр. R^2	-0.02	0.04	0.22	0.24	0.61	0.62	0.52	0.50
Критерий Шварца	78.8	54.2	270	255	198	177	207	188

Примечание: 1. Доля населения региона в муниципалитетах, где плотность населения составляет значение в заданном интервале (%): *Pop1* – <1 чел./км²; *Pop8* – 1–8; *Pop100* – 8–100; *Pop500* – 100–500; *Pop1000* – 500–1000; *Pop3000* – 1000–3000; *Pop10000* – >3000. 2. Звездочками указана значимость (*p*-value): *** 0.01; ** 0.05; * 0.1.

(отрицательный коэффициент при переменной *Day*). В последнем периоде при приближении к точке перегиба снова наблюдалось увеличение числа случаев в наиболее плотно заселенных районах (*Pop10000*), где уже была высока плотность подтвержденных носителей (*Corona_{t-1}*). Это связано с ростом числа новых случаев в Москве, Московской и Нижегородской областях, что может объясняться расширением тестирования¹⁸.

Хорошо видно по росту R^2 , как процесс из стохастического и почти необъяснимого на начальном этапе (R^2 немногим выше нуля) становится

все более детерминированным (R^2 выше 0.6), за исключением последнего периода, когда доля необъясненной дисперсии снова выросла (см. табл. 4 и 5).

Затем мы тестировали все указанные в табл. 3 гипотезы, поочередно тестируя показатели для каждого из интересующих нас факторов, и отбирали модели с наилучшими характеристиками, где все переменные значимы (табл. 5).

На *первом этапе* диффузии до 15 марта одним из наиболее значимых факторов следует отметить общую ежегодную заболеваемость населения. Если общая заболеваемость в регионе (*Desgov*) в прошлом году была на 1% выше, чем в других регионах, то число новых подтвержденных случаев COVID-19 на 1 млн жителей было на 0.042% больше. При этом неясно, какой эффект здесь преобладает – низкий уровень здоровья населения [8] и его подверженность инфекциям или хорошее развитие системы здравоохранения и тестирования, способной выявить новую инфекцию. Среди лидеров по общей фиксируемой заболеваемости

¹⁸Есть и другое предположение. В отдельных регионах в мае повторяются одни и те же значения ежедневного числа новых случаев, что статистически маловероятно. Ряд демографов и статистиков считают, что данные могут быть недостоверны и требуют дополнительной проверки. По утверждениям экспертов, региональные власти и местный бизнес могут быть заинтересованы в преждевременном снятии карантина, а соответственно – в занижении числа новых случаев. Впрочем, доказательство этой гипотезы не входило в цели нашего исследования.

Таблица 5. Результаты оценки факторов распространения COVID-19 по регионам России

Зависимая переменная – число новых подтвержденных случаев COVID-19 на душу населения в регионе России на указанную дату. Метод наименьших квадратов. Робастные стандартные ошибки. 83 региона

Фактор	Переменная	На 15.03.2020	На 13.04.2020	На 27.04.2020	На 12.05.2020
Спецификация модели		1	2	3	4
Плотность населения	<i>l_Pop10000</i>	0.06**			
	<i>l_Pop8</i>		-0.20*		
Концентрация в городах	<i>l_Urb</i>		1.3**		
	<i>l_EGP</i>	0.04**		0.09*	
Близость и размер регионов-соседей	<i>l_Demo</i>		0.34***		0.36***
	<i>l_Online</i>	0.14*			
Доля новаторов	<i>l_UrbHEd</i>		0.28**		2.0***
	<i>l_Poverty</i>		2.3***		0.88**
Уровень жизни в регионе	<i>l_IncomeMin</i>			1.02**	
	<i>l_Crime</i>	-0.24**	-1.0***		
Внутреннее взаимодействие, доверие	<i>l_Unform</i>				0.8**
	<i>l_Tur2</i>	0.06**		0.14***	
Внешнее взаимодействие	<i>l_Migr</i>	0.15*			
	<i>l_Rustur</i>		0.66***		
	<i>l_Desgov</i>	0.043**	0.20***	-0.19***	
Подверженность заболеваниям	<i>l_Medexp</i>		1.5***		
	<i>l_Medpers</i>			-1.24***	
	<i>l_Day</i>	-0.12**			
Продолжительность эпидемии					
Константа	<i>Const</i>	-0.88**	-20***	10.9***	10.9***
Критерии качества модели	R^2	0.27	0.49	0.73	0.38
	Испр. R^2	0.2	0.43	0.70	0.34
	Критерий Шварца	56.2	245.4	168.4	221.6

Примечание: звездочками указана значимость (p -value): *** 0.01; ** 0.05; * 0.1.

Мурманская, Архангельская, Нижегородская, Калужская области и др. Как и предполагалось, положительно значима на начальном этапе более высокая доля новаторов: ежегодно посещавшие страны — очаги заболевания (*Tur2*) и имеющие технологические навыки (*Online*). Доля новаторов выше в крупнейших агломерациях, северных добывающих центрах и вблизи крупных российских и зарубежных рынков (*EGP*) [6]. Из-за начала пандемии в Китае (крупнейший мировой рынок) и в Москве выгодное для экономических агентов в нормальных условиях экономико-географическое положение могло способствовать первичному заражению сообщества. Ниже скорость распространения в регионах, где ниже уровень доверия в обществе из-за высокой преступности (*Crime*) и, соответственно, ниже интенсивность взаимодействия внутри сообщества, здесь же ниже плотность малого бизнеса, а соответственно, точек пересечения и межличностного общения наиболее социально активной части жителей [3]. Примерами здесь могут служить республики Тыва, Бурятия и Алтай.

Ни в одной из моделей при прочих равных не были значимы характеристики транспортной доступности (*Aero*), хотя предполагалось, что крупные аэропорты могли быть источниками заражения. Скорее всего, так и было, но наличие плотно заселенного (*Pop10000*) и близость крупного центра, измеряемая различными индикаторами географического положения (*EGP, Demo*), были более значимы. Иными словами, важно не наличие аэропорта, а размер центра, в котором он расположен, потому что на заражение влияла высокая плотность социальных контактов, а авиасообщение постепенно было ограничено.

Значимость наличия (*Urb*) и близости крупных городов (*Demo*) в регионе увеличилась на *экспоненциальной стадии роста*. Так проявлялся эффект соседства: инфекция распространялась из крупных центров (Москва) в соседние регионы благодаря возвращению временных трудовых мигрантов, миграции жителей на дачи, что хорошо видно на рис. 4. На этапе экспоненциального роста (по данным на 13.04.2020), несмотря на принимаемые меры по самоизоляции, число новых случаев заражения на душу населения на 0.14% больше в регионах, где на 1% выше доля граждан России, размещенных в гостиницах (*Rostur*), то есть с высокой интенсивностью деловых поездок из других регионов. В регионах, где выше ежегодно фиксируемая общая заболеваемость населения (*Desgov*) и выше расходы на здравоохранение (*Medexp*), число новых случаев также больше. В этих регионах выше плотность лабораторий, лучше качество оборудования для фиксации заболевания, а население чаще в среднем обращается к врачам, потенциально ниже уровень здоровья и выше доля пожилых. В регионах, где выше уро-

вень преступности (*Crime*), а соответственно, ниже плотность малого бизнеса и социального взаимодействия, скорость проникновения COVID-19 ниже. Число новых случаев больше на 2.2% в регионах, где уровень бедности (*Poverty*) на 1% выше, так как заражение охватило бедные регионы, а бедное население не может в полной мере адаптироваться: прекратить работу, перейти на удаленную деятельность, переехать на дачу, использовать онлайн-заказы продуктов и т.д.

На *позднем экспоненциальном этапе* (по данным на 27.04.2020) влияние некоторых факторов изменилось на противоположное. Например, в регионах с более высоким общим уровнем заболеваемости (*Desgov*) и обеспеченностью медицинским персоналом (*Medpers*) скорость распространения стала ниже. Очевидно, что диффузия в крупных городах замедлилась, а болезнь охватила регионы с менее развитой системой здравоохранения. В северных регионах с высокими подушевыми доходами (*Income_Min*) и высокой концентрацией населения в отдельных муниципалитетах число новых случаев больше.

На *последнем этапе* диффузия достигла северных крупногородских регионов с высокой долей горожан с высшим образованием (*UrbHEd*), а также наименее развитых регионов с высокой долей занятых в неформальном секторе (*Unform*) и высоким уровнем бедности (*Poverty*).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И НАПРАВЛЕНИЯ БУДУЩИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Модель диффузии нововведений согласно проведенному исследованию с рядом оговорок и ограничений может быть применена для пространственного анализа распространения фиксируемых случаев COVID-19. Под объектом исследования мы рассматриваем лишь тяжелые, фиксируемые статистикой случаи. А реальные масштабы заражения неизвестны из-за предположительно двухнедельного лага между реальной и фиксируемой заболеваемостью, отсутствия всеобщей проверки на антитела¹⁹ и других ограничений, подробно описанных в методической части.

Диффузия COVID-19 преимущественно на ранних стадиях, рассмотренных в статье, определяется ситуацией в Москве, поэтому следует оговорить, что рассмотренные авторами сценарии скорее характеризуют ситуацию в столице, где можно ожидать окончания активной фазы эпидемии к началу июля, если не будет кардинального роста числа контактов в результате преждевременного снятия карантинных мер. При этом це-

¹⁹Отечественная система тестирования на антитела была зарегистрирована 10 апреля, 15 апреля началось тестирование медицинских работников [10]. Уже известно, что большинство населения переносит заболевание бессимптомно.

лый ряд факторов влияет на распространение и фиксацию заболевания в регионах России, поэтому для остальной территории страны распространение заболевания может продолжиться. Отдельные случаи и новые, но более слабые волны будут фиксироваться до формирования коллективного иммунитета и/или полной вакцинации населения.

Первые зафиксированные носители коронавируса пребывали из-за рубежа и изначально концентрировались в крупнейших агломерациях, портовых центрах и соседних с Китаем регионах, но распространение заболевания не удалось сдержать. Опыт таких стран, как Республика Корея, Тайвань, Япония, Сингапур, показывает важность массового, оперативного и качественного тестирования и отслеживания всех контактов зараженных на начальном этапе. Такой подход при качественном исполнении позволяет сдержать распространение эпидемии без широкомасштабных карантинных мер. Но в России эффективность подобных мер на начальном этапе оказалась недостаточной. К середине апреля первые случаи были зарегистрированы во всех регионах России. Поэтому режим самоизоляции, который позволяет снизить нагрузку на систему здравоохранения в период экспоненциального роста числа зараженных, стал необходим. Но его действенность в статистике была зафиксирована лишь через две недели как отклонение от экспоненциального тренда. В то же время в Швеции (на начальном этапе) не вводились жесткие ограничительные меры, а лишь последовали рекомендации властей по снижению социальных и иных контактов. Но в этом случае важен уровень доверия граждан правительству, их возможность и желание следовать рекомендациям. В России с низким уровнем обобщенного доверия в большинстве регионов [9] подобная политика не работала до введения запретительных мер. Это хорошо видно по динамике индекса самоизоляции Яндекса, оценивающего отсутствие машин на автодорогах. Индекс повысился только 19 марта после введения режима самоизоляции.

Среди других характеристик регионов, определяющих распространение вируса, можно отметить высокую плотность населения как косвенный индикатор социальных контактов на транспорте, в жилых домах и т.д. в отдельных муниципалитетах, близость к крупнейшим агломерациям как очагам заражения, высокую долю наиболее активной и часто путешествующей части населения, интенсивность связей внутри сообщества и с другими странами и регионами. Скорость экспоненциального распространения выше в регионах с высокой подверженностью населения заболеваниям, что подтверждает соответствующие тезисы о значимости капитала здоровья региона. При этом факторы существенно отлича-

ются на разных этапах распространения. На начальных стадиях влияние случайных событий высоко, что снижает возможности корректного моделирования процессов.

Мы рассматриваем только зарегистрированные случаи заболевания. Без данных о превышении смертности в марте–апреле над смертностью в эти месяцы в среднем в предыдущие годы, мы не можем говорить о наиболее значимых последствиях эпидемии из-за статистических и иных искажений в настоящий период [17, 21]. Например, многие умершие с COVID-19 страдали хроническими заболеваниями. Уже есть отдельные данные по регионам Италии, Великобритании²⁰, где зарегистрировано значимое (до 60%) превышение общей смертности в марте–апреле. При этом корректные и конечные данные по смертности даже в Европейском Союзе будут доступны не ранее чем через два месяца, а в России – по результатам года. По предварительным данным по Москве, смертность в апреле 2020 г. на 20% выше, чем в среднем за предыдущее десятилетие: 11846 смертей в сравнении с 9866²¹. Можно ожидать, что дополнительная смертность в России в сравнении с предыдущими годами от всех причин смерти также возрастет. Например, ранее была недооценена смертность от волн жары и задымления в европейской части страны в 2010 г., по итогам же года дополнительная смертность превысила 55 тыс. случаев, в Москве – 11 тыс. случаев, или выросла на 60% в сравнении с предыдущими годами [14]. Это также может стать основанием для дополнительных исследований.

Социально-экономические последствия эпидемии COVID-19 в 2020 г. в России только предстоит оценить, но рост заболеваемости, смертности, внедрение карантинных мероприятий ведут к снижению занятости и темпов экономического роста во всем мире. Наиболее негативное влияние будет оказано на предпринимательский сектор [7]. Если в Москве большая часть работников может уйти в удаленный режим, а в индустриальных ареалах с производствами непрерывного цикла люди могут и обязаны работать, то в регионах, зависящих от туризма, от малого бизнеса в сфере розничной торговли и бытовых услуг, последствия могут быть более существенными. Причем в крупных агломерациях возможности адаптации и населения, и бизнеса высоки благодаря распространению различных форм удаленной работы, высокой обеспеченности интерне-

²⁰EuroMOMO. <https://euromomo.eu/> (дата обращения 11.05.2020).

²¹Портал открытых данных Правительства Москвы. <https://data.mos.ru/opendata/770411479-dinamika-registratsii-aktov-grajdanskogo-sostoyaniya/row/1035521177?pageNumber=13&versionNumber=3&releaseNumber=42> (дата обращения 11.05.2020).

том и его использованию для заказа товаров и услуг. Кардинальным образом повысится уровень цифровизации экономики. Ранее уже давались оценки возможностей и рисков цифровой экономики [30]. Это также является перспективной темой, так как позволит понять, в каких регионах и городах при продлении режима самоизоляции возможны более заметные социальные изменения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в рамках госзадания 2020 г. РАНХиГС, а также поддержано в рамках реализации Программы по повышению конкурентоспособности 5-100 БФУ имени И. Канта.

FUNDING

The study was carried out as part of the state task of 2020, RANEPH, and was also supported in the framework of the implementation of the Program for improving the competitiveness of 5-100 IKBFU.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят В.М. Кидяеву, Н.К. Куричеву, Т.Н. Михайлову, И.С. Кашницкого, анонимных рецензентов статьи и других коллег за обсуждение и ценные комментарии.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful to V.M. Kidyayeva, N.K. Kurichev, T.N. Mikhailova, I.S. Kashnitsky, anonymous reviewers of the article and other colleagues for discussion and comments.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бабури В.Л., Земцов С.П.* Регионы-новаторы и инновационная периферия России. Исследование диффузии инноваций на примере ИКТ-продуктов // Региональные исследования. 2014. № 3. С. 27–37.
2. *Бабури В.Л., Земцов С.П.* Инновационный потенциал регионов России: монография. М.: КДУ Университетская книга, 2017. 356 с.
3. *Барина В.А., Земцов С.П., Царева Ю.В.* Предпринимательство и институты: есть ли связь на региональном уровне в России // Вопросы экономики. 2018. Т. 6. С. 92–116.
4. *Блануца В.И.* Диффузия почтовых нововведений в досоветской Сибири // География и природные ресурсы. 2012. № 4. С. 30–39.
5. *Блануца В.И.* Пространственная диффузия нововведений: сфера неопределенности и сетевая модель // Региональные исследования. 2015. № 3. С. 4–12.
6. *Земцов С.П., Бабури В.Л.* Оценка потенциала экономико-географического положения регионов России // Экономика региона. 2016. Т. 12. № 1. С. 117–138.
7. *Земцов С., Царева Ю.* Тенденции развития сектора малых и средних предприятий в условиях пандемии и кризиса // Мониторинг экономической ситуации в России: тенденции и вызовы социально-экономического развития. 2020. № 10 (112). С. 155–166.
8. *Канева М.А.* Влияние капитала здоровья населения на экономический рост регионов РФ // Регион: экономика и социология. 2019. № 1. С. 47–70.
9. *Косарев В., Павлов П., Каукин А.* Социальный капитал как фактор экономического роста российских регионов // Экономическая политика. 2019. Т. 14. № 5. С. 144–149.
10. *Назаров В., Сисигина Н.* Сравнительный анализ подходов к тестированию на заболевание коронавирусом COVID-19 в России и зарубежных странах // Мониторинг экономической ситуации в России. Тенденции и вызовы социально-экономического развития. 2020. № 9 (111). Апрель. С. 22–38.
11. *Назаров В.С., Сисигина Н.Н., Авксентьев Н.А.* Подходы к снятию ограничений, принятых в целях сдерживания распространения новой коронавирусной инфекции // Мониторинг экономической ситуации в России. Тенденции и вызовы социально-экономического развития. 2020. № 11 (113). С. 21–31.
12. *Петров Н., Архипова А., Спиридонов В., Пейгин Б.* Инфодемия: существующие подходы к анализу паник, фобий, слухов, фейков во время эпидемий и предложения по борьбе с ними // Мониторинг экономической ситуации в России. Тенденции и вызовы социально-экономического развития. 2020. № 8 (110). С. 70–78.
13. *Попов В.Ф.* Эпидемия холеры в СССР в 1970 г. // БИОпрепараты. Профилактика, диагностика, лечение. 2011. № 2 (42). С. 36–38.
14. *Ревич Б.А.* Волны жары, качество атмосферного воздуха и смертность населения европейской части России летом 2010 года: результаты предварительной оценки // Экология человека. 2011. № 7. С. 3–9.
15. *Bass F.M.* A new product growth for model consumer durables // Management sci. 1969. Т. 15 № 5. P. 215–227.
16. *Bertrand J.T.* Diffusion of innovations and HIV/AIDS // J. Health Communication. 2004. V. 9. № S1. P. 113–121.
17. *Chen N., Zhou M., Dong X., Qu J., Gong F., Han Y., Qiu Y., Wang J., Liu Y., Wei Y., Xia J., Yu T., Zhang X., Zhang L.* Epidemiological and clinical characteristics of 99 cases of 2019 novel coronavirus pneumonia in Wuhan, China: a descriptive study // Lancet Infect. Diseases. 2020. V. 10223. № 395. P. 507–513. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30211-7](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30211-7)

18. *Comin D.A., Dmitriev M., Rossi-Hansberg E.* The spatial diffusion of technology // National Bureau of Economic Research. 2012. 39 p.
19. *Grant A.* Dynamics of COVID-19 epidemics: SEIR models underestimate peak infection rates and overestimate epidemic duration // medRxiv. 2020.
20. *Hagerstrand T.* Innovation diffusion as a spatial process. Chicago, USA: Univ. Chicago Press, 1968. 334 p.
21. *Hauser A., Counotte M., Margossian C., Konstantinou G., Low N., Althaus C., Riou J.* Estimation of SARS-CoV-2 mortality during the early stages of an epidemic: a modelling study in Hubei, China and Northern Italy // medRxiv. 2020. <https://doi.org/10.1101/2020.03.04.20031104>
22. *Kucharski A.J., Russell T.W., Diamond C., Liu Y., Edmunds J., Funk S., Eggo R.M.* Early dynamics of transmission and control of COVID-19: A mathematical modelling study // Lancet Infect. Diseases. 2020. V. 20. № 5. P. 553–558. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(20\)30144-4](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(20)30144-4)
23. *Korolev I.* Identification and Estimation of the SEIRD Epidemic Model for COVID-19. 2020. <https://ssrn.com/abstract=3569367> or <https://doi.org/10.2139/ssrn.3569367> (accessed: 12.05.2020).
24. *Liu Y., Gayle A.A., Wilder-Smith A., Rocklöv J.* The reproductive number of COVID-19 is higher compared to SARS coronavirus // J. Travel Medicine. 2020. V. 27. № 2.
25. New-product diffusion models / Mahajan V., Muller E., Wind Y. (Eds.). Springer Science & Business Media, 2000. V. 11. 355 p.
26. *Meade N., Islam T.* Modelling and forecasting the diffusion of innovation—A 25-year review // International J. of Forecasting. 2006. V. 22. № 3. P. 519–545.
27. *Rogers E.M.* Diffusion of innovations. Simon and Schuster, 2010. 518 p.
28. *Shet A., Ray D., Malavige N., Santosham M., Bar-Zeev N.* Differential COVID-19-attributable mortality and BCG vaccine use in countries. 2020. <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.04.01.20049478v1.full.pdf?fbclid=IwAR38RiJFdGqpsqZPHHT2FD1zmRDyDo3-zLN-OrTRUv9r2e11-VIMMLmYh2CE> doi 10.1101/2020.04.01.20049478
29. *Wu J.T., Leung K., Leung G.M.* Nowcasting and forecasting the potential domestic and international spread of the 2019-nCoV outbreak originating in Wuhan, China: a modelling study // Lancet Infect. Diseases. 2020. V. 395. № 10225. P. 689–697.
30. *Zemtsov S., Barinova V., Semenova R.* The Risks of Digitalization and the Adaptation of Regional Labor Markets in Russia // Foresight and STI Governance. 2019. V. 13. № 2. P. 84–96. <https://doi.org/10.17323/2500-2597.2019.2.84.96>
31. *Zemtsov S., Kotsemir M.* An assessment of regional innovation system efficiency in Russia: the application of the DEA approach // Scientometrics. 2019. V. 120. № 2. P. 375–404.
32. *Zhao D. Sun J., Tan Y., Wu J., Dou Y.* An extended SEIR model considering homepage effect for the information propagation of online social networks // Phys. A: Statist. Mechanics Appl. 2018. V. 512. P. 1019–1031.

COVID-19: Spatial Dynamics and Diffusion Factors across Russian Regions

S. P. Zemtsov^{1, 2, *} and V. L. Baburin^{2, 3, **}

¹Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Moscow, Russia

²Lomonosov Moscow State University, Department of Geography, Moscow, Russia

³Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

*e-mail: spzemtsov@gmail.com

**e-mail: vbaburin@yandex.ru

Confirmed cases of coronavirus infection, at first approximation, corresponds to models of diffusion of innovations. We applied models to analyze spatial patterns in Russia. The article describes in detail statistical and other restrictions that reduce the possibility of predicting such phenomena and affect decision-making by the authorities. Keeping current trends according to our estimates, as of May 12, the dynamics of confirmed cases will begin to decline in the second half of May, and the end of the active phase of the epidemic, at least in Moscow, can be expected by the end of July. The dynamics of confirmed cases are a reduced and delayed reflection of real processes. Thus, the introduction of a self-isolation regime in Moscow and many other regions has affected the decrease in the number of new confirmed cases in two weeks. In accordance with the model, carriers infected abroad (innovators) were concentrated at the first stage in regions with large agglomerations, in coastal and border regions with a high intensity of internal and external relations. Unfortunately, the infection could not be contained; the stage of exponential growth across the country began. By mid-April 2020, cases of the disease were recorded in all Russian regions; several cases were in the most remote and least connected regions. Among the econometrically identified factors that determine the spread of the disease, one can note a high population density in cities, proximity to the largest metropolitan areas, an increased share of the most active and often traveling part of the population (innovators, migrants), intensive ties within the community and with other countries and regions. The spread rate is higher in regions with a

high population exposure to diseases, which confirms the theses on the importance of the region's health capital. Moreover, the combination of factors and their influence changed in accordance with the stages of diffusion, and at the initial stage, random factors prevailed. In conclusion, some directions for further research are given.

Keywords: diffusion of innovations, coronavirus infection, Russian regions, disease factors, health capital, population density, social connections, labor migration, tourism, medical geography

REFERENCES

- Baburin V.L., Zemtsov S.P. Regions-innovators and innovative periphery of Russia. The study of diffusion of innovations on the example of ICT products. *Reg. Issled.*, 2014, no. 3, pp. 27–37. (In Russ.).
- Baburin V.L., Zemtsov S.P. *Innovatsionnyi potentsial regionov Rossii* [Innovation Potential of the Russian Regions]. Moscow: KDU Publ., 2017. 356 p.
- Barinova V.A., Zemtsov S.P., Tsareva Yu.V. Entrepreneurship and institutions: does the relationship exist at the regional level in Russia? *Vopr. Ekon.*, 2018, vol. 6, pp. 92–116. (In Russ.).
- Blanutsa V.I. Diffusion of postal innovations in pre-Soviet Siberia. *Geogr. Prir. Resur.*, 2012, no. 4, pp. 30–39. (In Russ.).
- Blanutsa V.I. Spatial diffusion of innovations: the sphere of uncertainty and the network model. *Reg. Issled.*, 2015, no. 3, pp. 4–12. (In Russ.).
- Zemtsov S.P., Baburin V.L. Assessing the potential of economic-geographical position for Russian regions. *Ekonomika Regiona*, 2016, vol. 12, no. 1, pp. 117–138. (In Russ.).
- Zemtsov S., Tsareva Yu. Trends in the development of the sector of small and medium enterprises in a pandemic and crisis. *Monitoring Ekon. Situatsii v Rossii: Tendentsii i Vyzovy Sotsial'no-Ekon. Razvitiya*, 2020, vol. 112, no. 10, pp. 155–166. (In Russ.).
- Kaneva M. A. Influence of public health capital on the economic growth of regions of the Russian Federation. *Region: Ekonomika i Sotsiologiya*, 2019, no. 1, pp. 47–70. (In Russ.).
- Kosarev V., Pavlov P., Kaukin A. Social capital as a factor in the economic growth of Russian regions. *Ekon. Politika*, 2019, vol. 14, no. 5, pp. 144–149. (In Russ.).
- Nazarov V., Sisigina N. Comparative analysis of approaches to testing for COVID-19 coronavirus disease in Russia and foreign countries. *Monitoring Ekon. Situatsii v Rossii: Tendentsii i Vyzovy Sotsial'no-Ekon. Razvitiya*, 2020, vol. 111, no. 9, pp. 22–38. (In Russ.).
- Nazarov V.S., Sisigina N.N., Avksent'ev N.A. Approaches to removing the restrictions adopted in order to curb the spread of a new coronavirus infection. *Monitoring Ekon. Situatsii v Rossii: Tendentsii i Vyzovy Sotsial'no-Ekon. Razvitiya*, 2020, vol. 113, no. 11, pp. 21–31. (In Russ.).
- Petrov N., Arkhipova A., Spiridonov V., Peigin B. Infodemia: existing approaches to the analysis of panic, phobias, rumors, fakes during epidemics and proposals for dealing with them. *Monitoring Ekon. Situatsii v Rossii: Tendentsii i Vyzovy Sotsial'no-Ekon. Razvitiya*, 2020, vol. 110, no. 8, pp. 70–78. (In Russ.).
- Popov V.F. The cholera epidemic in the USSR in 1970. *BIOPreparaty. Profilaktika, Diagnostika*. 2011, vol. 42, no. 2, pp. 36–38. (In Russ.).
- Revich B.A. Heatwaves, air quality and mortality in the European part of Russia in the summer of 2010: preliminary assessment results. *Ekologiya Cheloveka*, 2011, no. 7, pp. 3–9. (In Russ.).
- Bass F.M. A new product growth for model consumer durables. *Manag. Sci.*, 1969, vol. 15, no. 5, pp. 215–227.
- Bertrand J.T. Diffusion of innovations and HIV/AIDS. *J. Health Commun.*, 2004, vol. 9, no. S1, pp. 113–121.
- Chen N., Zhou M., Dong X., Qu J., Gong F., Han Y., Qiu Y., Wang J., Liu Y., Wei Y., Xia J., Yu T., Zhang X., Zhang L. Epidemiological and clinical characteristics of 99 cases of 2019 novel coronavirus pneumonia in Wuhan, China: a descriptive study. *The Lancet*, 2020, vol. 395, no. 10223, pp. 507–513. doi 10.1016/S0140-6736(20)30211-7
- Comin D.A., Dmitriev M., Rossi-Hansberg E. *The Spatial Diffusion of Technology*. National Bureau of Economic Research, 2012. 39 p. doi 10.3386/w18534
- Grant A. Dynamics of COVID-19 epidemics: SEIR models underestimate peak infection rates and overestimate epidemic duration. Preprint, medRxiv, 2020. doi 10.1101/2020.04.02.20050674
- Hagerstrand T. *Innovation Diffusion as a Spatial Process*. Chicago, USA: Univ. Chicago Press, 1968. 334 p.
- Hauser A., Counotte M., Margossian C., Konstantinoudis G., Low N., Althaus C., Riou J. Estimation of SARS-CoV-2 mortality during the early stages of an epidemic: a modelling study in Hubei, China and northern Italy. Preprint, medRxiv, 2020. doi 10.1101/2020.03.04.20031104
- Kucharski A.J., Russell T.W., Diamond C., Liu Y., Edmunds J., Funk S., Eggo R.M. Early dynamics of transmission and control of COVID-19: a mathematical modelling study. *Lancet Infect. Dis.*, 2020, vol. 20, no. 5, pp. 553–558. doi 10.1016/S1473-3099(20)30144-4
- Korolev I. *Identification and Estimation of the SEIRD Epidemic Model for COVID-19*. SSRN, 2020. Available at: <https://ssrn.com/abstract=3569367> (accessed: 12.05.2020). doi 10.2139/ssrn.3569367
- Liu Y., Gayle A.A., Wilder-Smith A., Rocklöv J. The reproductive number of COVID-19 is higher compared to SARS coronavirus. *J. Travel Med.*, 2020, vol. 27, no. 2. doi 10.1093/jtm/taaa021

25. *New-Product Diffusion Models*. International Series in Quantitative Marketing, vol. 11. Mahajan V., Muller E., Wind Y., Eds. Springer Science & Business Media, 2000. 355 p.
26. Meade N., Islam T. Modelling and forecasting the diffusion of innovation—A 25-year review. *Int. J. Forecast.*, 2006, vol. 22, no. 3, pp. 519–545.
27. Rogers E.M. *Diffusion of Innovations*. Simon and Schuster, 2010. 518 p.
28. Shet A., Ray D., Malavige N., Santosham M., Bar-Zeev N. Differential COVID-19-attributable mortality and BCG vaccine use in countries. Preprint. 2020. doi 10.1101/2020.04.01.20049478
29. Wu J.T., Leung K., Leung G.M. Nowcasting and forecasting the potential domestic and international spread of the 2019-nCoV outbreak originating in Wuhan, China: a modelling study. *The Lancet*, 2020, vol. 395, no. 10225, pp. 689–697.
30. Zemtsov S., Barinova V., Semenova R. The risks of digitalization and the adaptation of regional labor markets in Russia. *Foresight and STI Governance*, 2019, vol. 13, no. 2, pp. 84–96. doi 10.17323/2500-2597.2019.2.84.96
31. Zemtsov S., Kotsemir M. An assessment of regional innovation system efficiency in Russia: the application of the DEA approach. *Scientometrics*, 2019, vol. 120, no. 2, pp. 375–404.
32. Zhao D. Sun J., Tan Y., Wu J., Dou Y. An extended SEIR model considering homepage effect for the information propagation of online social networks. *Physica A*, 2018, vol. 512, pp. 1019–1031.