

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ СТАТЬЯ



<https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2023-2-1>

УДК 51-7

JEL C610

И. В. Лутошкин  , М. С. Рыбина 

Ульяновский государственный университет, г. Ульяновск, Российская Федерация

МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ЭКОНОМИКОЙ РЕГИОНА В УСЛОВИЯХ МАССОВЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ¹

Аннотация. Глобализация экономических процессов, интенсификация логистических взаимодействий, рост численности мирового населения и повышение его мобильности существенно способствуют возникновению массовых заболеваний, которые становятся фактором, определяющим поведение многих экономических субъектов в мировом пространстве. В статье разрабатывается инструмент анализа управления экономикой региона в условиях массовых заболеваний. Особенностью инструмента явилась интеграция как социально-биологических, так и экономических факторов в рамках единого подхода и соответствующей экономико-математической модели. Предлагаемая экономико-математическая модель основана на описании динамики развития заболеваемости по группам населения (модели компартиментализации типа SIR или SEIR) с учетом соответствующего изменения в ряде социально-экономических показателей. В качестве управляющих воздействий на экономическую систему в модели рассматриваются вложения в переоборудование существующих койко-мест, вложения в строительство новых больниц, вложения в информационную кампанию по борьбе с заболеванием. Таким образом, предлагаемый инструмент позволяет управляющей системе региона количественно оценить и, соответственно, сравнить возможные управленческие решения на фиксированном горизонте планирования, учитывая взаимное влияние биологических и социально-экономических факторов. В качестве информационной базы выступили существующие математические модели популяционной биологии и эпидемиологии. Для построения инструмента и оценки его параметров использовались методы регрессионно-корреляционного анализа, имитационного моделирования, численного анализа системы дифференциальных уравнений. На основе статистической информации о пандемии COVID-19 в Российской Федерации и Ульяновской области в 2020 г. в работе были произведены оценки параметров предлагаемой математической модели. С помощью разработанного авторского программного комплекса проведено моделирование стратегий поддержания регионам ограничительных мер или отсутствия таких мер в течение рассматриваемого периода, дан сравнительный анализ. Данный инструмент может быть адаптирован для оценивания стратегий управления экономическими субъектами различных масштабов. Перспектива развития инструмента состоит в дополнении его критериями качества и соответствующими алгоритмами поиска оптимальных стратегий управления экономикой региона в условиях массовых заболеваний.

Ключевые слова: экономика региона, математическая модель, экономическая модель динамики, пандемия, массовое заболевание, COVID-19, стратегия управления регионом, имитационное моделирование, численный анализ, оценивание управленческих решений

Для цитирования: Лутошкин, И. В., Рыбина, М. С. (2023). Моделирование управления экономикой региона в условиях массовых заболеваний. *Экономика региона*, 19(2), 299-313. <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2023-2-1>

¹ © Лутошкин И. В., Рыбина М. С. Текст. 2023.

Modelling of Regional Economic Management in Conditions of Mass Diseases

Abstract. Economic globalisation, logistics intensification, world population growth and increasing mobility lead to the emergence of mass diseases, determining the behaviour of various economic agents. The article offers a new tool for analysing regional economic management in conditions of mass diseases, which combines both socio-biological and economic factors in one economic and mathematical model. The proposed model is based on the description of disease dynamics among various population groups (SIR or SIER compartmental models) and corresponding socio-economic changes. Investments in the improvement of hospital beds, in the construction of new hospitals, and in information campaigns to combat the disease are considered as control actions on the economic system. Thus, the regional management system can apply this tool to quantify and compare possible management decisions, taking into account the mutual influence of biological and socio-economic factors. Mathematical models in population biology and epidemiology were analysed in order to construct the tool and assess its parameters by the methods of regression correlation analysis, simulation modelling, and numerical analysis of the differential equation system. In particular, statistical information on the COVID-19 pandemic in Russia and Ulyanovsk oblast for 2020 was examined during the research. The developed software package was utilised to model the presence or absence of restrictive measures during the reviewed period; then, a comparative analysis of these strategies was conducted. The described tool can be adapted to assess the management strategies of various economic agents. It can be further supplemented with quality criteria and appropriate algorithms for selecting optimal strategies to manage regional economy in conditions of mass diseases.

Keywords: regional economy, mathematical model, economic dynamics model, pandemic, mass disease, COVID-19, regional management strategy, simulation, numerical analysis, assessment of management decisions

For citation: Lutoshkin, I. V. & Rybina, M. S. (2023). Modelling of Regional Economic Management in Conditions of Mass Diseases. *Ekonomika regiona / Economy of regions*, 19(2), 299-313. <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2023-2-1>

Введение

В результате роста численности мирового населения и глобализации экономических процессов массовые заболевания становятся фактором, определяющим поведение всех экономических субъектов в мировом пространстве. Такие заболевания способны оказывать сильное влияние как на экономические взаимоотношения внутри конкретного региона (например, области, страны, содружества стран и т. д.), так и на межрегиональные связи. В частности, они затрагивают социальную сферу, поскольку заболеваемость сказывается на количестве трудоспособных лиц, а в некоторых случаях и на общей численности населения (Кулькова, 2020). Кроме того, происходят изменения в экономической сфере: при введении ограничительных мер с целью предотвращения роста заболеваемости снижается деловая активность экономических субъектов (Бобков & Верещагина, 2020). В сложившихся условиях перед руководством региона возникает ряд управленческих задач, связанных с необходимостью минимизировать негативные воздействия массового заболевания. К таким задачам можно отнести определение объема расходов

на госпитализацию заболевших и оказание им медицинской помощи, информирование граждан о заболевании и способах борьбы с ним, принятие решения о вводе ограничительных мер (Funk et al., 2009). Для их эффективного решения необходимо иметь инструмент, позволяющий количественно оценить влияние массовой заболеваемости на социально-экономические факторы и определить стратегию управления в сложившихся условиях.

Недавним примером массового заболевания, затронувшего экономику всего мира, является пандемия COVID-19. Из-за скорости распространения заболевания возникла необходимость оперативно принимать решения о распределении ресурсов, выделенных на здравоохранение и социальную поддержку, и о необходимости введения ограничительных мер. В качестве эффективных инструментов, позволяющих реализовывать указанные действия, могут выступать математическая модель, описывающая данную ситуацию, и программный продукт, предназначенный для ее анализа. В актуальных статьях (Brauer & Castillo-Chavez 2012; Britton, 2003; Volz & Meyer, 2007; Arino et al., 2006) и монографии

(Castillo-Chaves et al., 2002), посвященных моделированию динамики массовых заболеваний, учитывается только социально-биологический аспект развития эпидемии (используются модели компарментализации типа SIR или SEIR), однако не менее важным является также сопутствующий анализ экономических показателей, которые находятся в тесной взаимосвязи с социально-биологическими факторами.

В ряде работ (Sha et al., 2020; Atkeson, 2020; Ali et al., 2020; Матвеев, 2020) рассматриваются модели типа SIR и SEIR. Приведена модель динамики инфекционных заболеваний, основанная на SEIR-модели (Sha et al., 2020). Динамика рассматривается как дискретный процесс, в котором переход индивида из одной группы в другую описывается случайными величинами. Параметры модели оцениваются на основе данных о распространении COVID-19 в КНР. Рассматриваются четыре сценария развития эпидемии в зависимости от величины горизонта, а также интенсивности контакта между группами. Прогнозируется динамика эпидемии с помощью экспериментов с различными значениями параметров, для оценки которых используются статистические данные о распространении COVID-19 в США (Atkeson, 2020). Особо отмечается необходимость количественных оценок взаимосвязи пандемии с экономикой и здравоохранением для построения стратегий управления ими. Кроме того, стратегии управления введены в нее опосредованно: через предполагаемые значения параметров, соответствующих биологическим характеристикам популяции.

Таким образом, существующие модели не позволяют в полной мере оценивать влияние массовых заболеваний на экономику, поскольку предназначены для описания их воздействия только на популяцию. Это приводит к необходимости создания новой математической модели. Требуемая модель должна описывать ситуацию, складывающуюся на пересечении биосоциальной среды, экономики и здравоохранения. Кроме того, модель должна позволять прогнозировать динамику массовых заболеваний и оценивать стратегии сдерживания заболеваний через управление социально-экономической сферой.

Математическая модель влияния массовых заболеваний на экономику

Проблема влияния пандемии на экономику рассматривается в ряде работ (Miao et al., 2020; Лутошкин, Рыбина, 2021а; Лутошкин, Рыбина,

2021b). Настоящее исследование посвящено развитию модели (Лутошкин, Рыбина, 2021а; Лутошкин, Рыбина, 2021b), учитывающей социальные, биологические, экономические факторы.

Рассматривая биологический аспект влияния массового заболевания, введем разбиение населения (N , чел.) региона на следующие группы: P — соблюдающие ограничительные меры (например, режим самоизоляции) и тем самым минимизирующие для себя риск заражения, S — не соблюдающие ограничительные меры и, следовательно, потенциально подверженные заражению, E — заразившиеся, у которых заболевание находится в инкубационной стадии, I — заболевшие (учитываются лица как с бессимптомной формой заболевания, так и с явной), Q — заболевшие, которые были госпитализированы, R — выздоровевшие, D — умершие.

Социально-экономический аспект представим следующими показателями: Y — валовый выпуск (руб.), π — прибыль экономического субъекта (руб.), K — стоимость основных фондов экономического субъекта (руб.), L — объём результативного труда (чел.), Z — количество койко-мест в госпиталях для размещения заболевших (ед.).

Кроме того, рассмотрим вложения в реализацию управляющих воздействий органов власти: U_1 — вложения в переоборудование существующих койко-мест для размещения заболевших (руб.), U_2 — вложения в увеличение числа койко-мест за счет строительства новых больниц (руб.), U_3 — вложения в информационную кампанию по борьбе с заболеванием (руб.). А также моменты принятия управленческих решений: τ_1 — момент времени, когда органы управления вводят ограничительные меры, τ_2 — момент времени, когда происходит снятие ограничений.

Эффект от принимаемых управленческих решений может быть описан следующим образом:

если $t = \tau_1$, то $S(t) = (1 - a)S(t)$, $P(t) = P(t) + aS(t)$;
если $t = \tau_2$, то $S(t) = S(t) + bP(t)$, $P(t) = (1 - b)P(t)$,

где a — доля группы «потенциально подверженные заражению», переходящая в группу «соблюдающие защитные меры» в момент τ_1 ; b — доля группы «соблюдающие защитные меры», переходящая в группу «потенциально подверженные заражению» в момент τ_2 .

Сформулируем математическую модель в виде системы дифференциальных и алгебраических связей.

Динамика численности лиц, подверженных риску заражения:

$$\frac{dS}{dt} = k_{PS}P(t) + k_{RS}R(t - \tau) - \left(k_{SE} \left(\frac{I(t)}{N(t)} \right) + k_{SP}(U_3(t)) - \rho \right) S(t), \quad (1)$$

где ρ — естественный прирост населения в долях от общей численности населения; τ — время, в течение которого сохраняется иммунитет у выздоровевших; k_{SP} — интенсивность перехода лиц, подверженных риску заражения, в группу соблюдающих ограничительные меры; k_{SE} — интенсивность перехода лиц из числа подверженных риску заражения в группу носителей заболевания в инкубационном периоде; k_{RS} — интенсивность повторной заболеваемости; k_{PS} — интенсивность выбытия людей из числа соблюдающих ограничительные меры.

В общем случае k_{SE} представляет собой функцию от отношения численности заболевших к общей численности населения, а k_{SP} является функцией от объема вложений в информационную кампанию. Тогда

$$\frac{dP}{dt} = k_{SP}(U_3(t))S(t) - k_{PS}P(t). \quad (2)$$

Прирост количества лиц с заболеванием в инкубационной стадии:

$$\frac{dE}{dt} = k_{SE} \left(\frac{I(t)}{N(t)} \right) S(t) - k_{EI}E(t), \quad (3)$$

k_{EI} — интенсивность перехода заразившихся, у которых заболевание находится в инкубационной стадии, в число заболевших.

Изменение количества заболевших:

$$\frac{dI}{dt} = k_{EI}E(t) - (k_{IQ} + k_{IR} + k_{ID})I(t), \quad (4)$$

k_{IQ} — интенсивность госпитализации заболевших; k_{IR} — интенсивность выздоровления негоспитализированных больных; k_{ID} — интенсивность смертности негоспитализированных больных.

Динамику госпитализации заболевших представим в виде

$$\frac{dQ}{dt} = k_{IQ}I(t) - (k_{QD} + k_{QR})Q(t), \quad (5)$$

k_{QD} — интенсивность смертности госпитализированных больных; k_{QR} — интенсивность выздоровления госпитализированных больных.

Прирост количества выздоровевших лиц:

$$\frac{dR}{dt} = k_{IR}I(t) + k_{QR}Q(t) - k_{RS}R(t). \quad (6)$$

Изменение количества умерших:

$$\frac{dD}{dt} = k_{QD}Q(t) + k_{ID}I(t). \quad (7)$$

Изменение количества койко-мест:

$$\frac{dZ}{dt} = g(U_2(t)) - \mu Z(t) + kU_1, \quad (8)$$

где $g(U_2)$ — функция, ставящая в соответствие вложениям в строительство новых больниц увеличение количества койко-мест; μ — амортизация больничных фондов; k — параметр, определяющий соотношение количества койко-мест, переоборудованных для размещения заболевших, и вложений в их переоборудование.

Общая численность населения региона предполагается равной совокупной численности следующих групп: соблюдающие ограничительные меры, потенциально подверженные заражению, заразившиеся, у которых заболевание находится в инкубационной стадии, заболевшие, госпитализированные, выздоровевшие:

$$N(t) = P(t) + S(t) + E(t) + I(t) + Q(t) + R(t). \quad (9)$$

Общий объем результативного труда предполагается равным суммарному результативному труду лиц, входящих в следующие группы: соблюдающие ограничительные меры; потенциально подверженные заражению; заразившиеся, у которых заболевание находится в инкубационной стадии, выздоровевшие. Величина вложений в результативный труд определяется коэффициентами s_1, s_2, s_3, s_4 :

$$L(t) = s_1P(t) + s_2S(t) + s_3E(t) + s_4R(t), \quad (10)$$

где $s_k = e_k \cdot m$, $k = \underline{1, 4}$; m — доля трудоспособного населения от общей численности населения; e_1 — коэффициент эффективности труда здорового человека, соблюдающего ограничительные меры и работающего удаленно; e_2 — коэффициент эффективности труда здорового человека, работающего очно; e_3 — коэффициент эффективности труда человека, у которого заболевание находится в инкубационной стадии; e_4 — коэффициент эффективности труда выздоровевшего человека, работающего очно. Таким образом, s_1 — доля вложений результативного труда лиц, работающих дистанционно; s_2 — доля вложений результативного труда лиц, работающих очно и подверженных риску заражения; s_3 — доля вложений результативного труда лиц, у которых заболевание находится в инкубационной стадии; s_4 — доля

вложений труда выздоровевших лиц, работающих очно.

Величина валового выпуска экономического субъекта определяется производственной функцией F , аргументы которой — стоимость основных фондов экономического субъекта и объем результативного труда:

$$Y(t) = F(K(t), L(t)). \quad (11)$$

Заметим, что величина $L(t)$, согласно формуле (10), учитывает влияние массового заболевания. Тем самым оно опосредованно содержится в величине валового выпуска Y .

Прибыль региона предполагается равной его валовому выпуску за вычетом вложений в переоборудование существующих койко-мест, инвестиций в строительство новых больниц, инвестиций в информационную кампанию. Валовой выпуск, как было показано выше, зависит от биосоциального эффекта массового заболевания. Следовательно, величина прибыли также опосредованно учитывает данный эффект:

$$\pi(t) = Y(t) - U_1(t) - U_2(t) - U_3(t). \quad (12)$$

Объемы вложений предполагаются ограниченными:

$$\begin{aligned} 0 &\leq U_i(t), \\ \int_0^T U_i(t) dt &\leq B_i, \\ i &= 1, 2, 3. \end{aligned} \quad (13)$$

Здесь B_1 — объем бюджета, выделяемого на переоборудование существующих койко-мест; B_2 — объем бюджета, выделяемого на строительство новых больниц; B_3 — объем бюджета, выделяемого на информационную кампанию по доведению до населения необходимых сведений по борьбе с массовым заболеванием.

Предполагается, что общее число госпитализированных больных не превышает число койко-мест, предназначенных для их размещения:

$$Q(t) \leq Z(t). \quad (14)$$

Система (1)–(14) позволяет отслеживать динамику биосоциальных и экономических показателей при конкретной стратегии управления, включающей вложения в переоборудование существующих койко-мест, в строительство новых больниц, в информационную кампанию, а также моменты введения и отмены ограничительных мер.

В случае необходимости выбора некоторой управленческой стратегии из множества возможных возникает проблема определения

наилучшего варианта. Для ее разрешения необходимо ввести критерий качества, позволяющий определить оптимальный вариант управления системой на множестве управленческих решений (Андреева & Семькина, 2005; Ovsyannikova, 2017), в том числе с учетом специфики COVID-19 (Macalisang et al., 2020; İğret Araz, 2020; Zamir et al., 2021). Система (1)–(14) в сочетании с критерием качества может представлять собой задачу оптимального управления с запаздыванием. Для ее решения требуется применение специализированных численных методов (Лутошкин, 2011; Самарский, 2005). Один из вариантов развития приводимой модели заключается в ее адаптации для постановки и решения такой задачи.

Оценка параметров модели

Для практического использования модели (1)–(14) следует вычислить ее параметры, основываясь на статистических данных о социальном и экономическом положении в определенном регионе, а также на информации об особенностях распространения и течения рассматриваемого массового заболевания.

В качестве примеров применения модели рассмотрим экономику Российской Федерации и экономику Ульяновской области в период эпидемии COVID-19 в 2020 г. Каждый параметр модели (1)–(14) для данных примеров был оценен, согласно его смыслу, в виде константы или же в виде функции. Оценка производилась на основе данных, полученных из открытых источников в сети «Интернет». При таком оценивании неизбежны затруднения, обусловленные отсутствием в открытом доступе достоверных данных по ряду показателей (Лутошкин & Рыбина 2021b; Miller, 2014). Например, в открытом доступе отсутствовали статистические данные о частоте случаев повторной заболеваемости в РФ, а ее экспертные оценки являлись неактуальными на момент написания статьи. В силу этого при расчетах использовались актуальные оценки повторной заболеваемости новой коронавирусной инфекцией в других странах. Кроме того, вычисление некоторых параметров (а именно — интенсивности смертности негоспитализированных лиц k_{ID}) было затруднено в силу отсутствия статистических данных, обусловленного объективной трудностью их получения, и отсутствия экспертных оценок. Это привело к необходимости делать упрощающие предположения относительно модели.

С учетом изложенного выше были оценены параметры модели для РФ и для Ульяновской

области. При оценке предполагалось, что временной квант равен одному месяцу.

Коэффициент a для РФ был оценен на основе данных компании «Яндекс» о динамике индекса самоизоляции¹. Индекс самоизоляции принимает значения от 0 до 5, при значении индекса, равном 5, 100 % людей соблюдают самоизоляцию, а при отсутствии самоизоляции индекс равен 0. Необходимо подчеркнуть, что здесь и далее при использовании индекса самоизоляции не рассматриваются его значения в выходные дни (суббота, воскресенье), когда значение индекса резко возрастает в силу естественных причин и представляет собой статистические «выбросы». Значение индекса в РФ 27.03.2020 (будний день, предшествовавший введению ограничительных мер 30.03.2020²) составляло 1,53, а 30.03.2020 оно возросло до 2,97. Это позволяет вычислить добавленную долю a населения, которая стала следовать ограничительным мерам:

$$a^{pф} = \frac{2,97 - 1,53}{5 - 1,53} = 0,415. \text{ Аналогично можно}$$

оценить коэффициент a для Ульяновской области, используя соответствующую выборку из данных о динамике индекса самоизоляции. Значение индекса самоизоляции 27.03.2020 составляло 1,40, а 30.03.2020 оно стало равным 2,90. $a^{yo} = \frac{2,90 - 1,40}{5 - 1,40} = 0,416.$

Для вычисления коэффициента b для РФ также использовались данные о динамике индекса самоизоляции. Значение индекса 11.05.2020³ (когда было объявлено о завершении периода нерабочих дней) равнялось 2,84, а 12.05.2020 оно снизилось до 2,07. Таким образом, доля населения, переставшего соблюдать ограничительные меры: $b^{pф} = \left| \frac{2,07 - 2,84}{2,84} \right| = 0,271.$ Для Ульяновской области значение индекса самоизоляции 11.05.2020 составило 2,65, а 12.05.2020 — 1,65. Следовательно, $b^{yo} = \left| \frac{1,65 - 2,65}{2,65} \right| = 0,377.$

Параметр k_{ps} для РФ также был оценен с помощью данных о динамике индекса самоизоляции в России. Значение параметра рас-

считывалось как противоположное значение к тангенсу угла наклона прямой, аппроксимирующей график индекса самоизоляции в отсутствие ограничительных мер с 12.05.2020 по 11.06.2020. Значение индекса 12.05.2020, после отмены локдауна, равнялось 2,07, а 11.06.2020 оно составило 1,43. Таким образом,

$$k_{ps}^{pф} = -\frac{(1,43 - 2,07)}{1} = 0,64. \text{ Аналогично вычислим}$$

значение параметра k_{ps} для Ульяновской области, используя соответствующие значения индекса самоизоляции в те же даты:

$$k_{ps}^{yo} = -\frac{(1,15 - 1,65)}{1} = 0,5.$$

Коэффициент k_{sp} оценивался в виде функции $k_{sp} = c_1 + c_2 U_3$, где c_1, c_2 — константы, требующие определения. Постоянная часть параметра k_{sp} для РФ была вычислена на основе данных о динамике индекса самоизоляции. Для этого были рассмотрены данные за начало 2020 г., когда не проводилась информационная кампания против коронавируса. Отслеживание динамики индекса было начато «Яндексом» 24.02.2020. Датой начала информационной кампании предполагается 16.03.2020, когда был запущен сайт «Стопкоронавирус.рф»⁴. В промежутке между этими датами значение индекса самоизоляции оставалось примерно неизменным, что позволяет составить следующее уравнение баланса:

$$k_{sp} S = k_{ps} P.$$

Поскольку колебания индекса были незначительны, будем считать его значение постоянным и равным средней его величине за указанный период. Она составляет 1,068. Тогда из уравнения баланса, принимая во внимание диапазон значений индекса, получим следующее соотношение: $\frac{k_{sp}}{k_{ps}} = \frac{1,068}{5 - 1,068} = 0,272.$

Постоянная часть параметра $k_{sp}^{pф} : c_1^{pф} = 0,272 \times k_{ps}^{pф} = 0,174.$ Значение постоянной части параметра k_{sp} для Ульяновской области было вычислено аналогично. Использовалось среднее значение индекса самоизоляции в области за указанный выше период, равное 0,981. Таким образом, $c_1^{yo} = 0,244 \cdot k_{ps}^{yo} = 0,122.$

Параметр c_2 для РФ был оценен с использованием данных о затратах на организацию и проведение информационной кампа-

¹ Коронавирус: дашборд. <https://datalens.yandex/covid19> (дата обращения: 29.05.2021).

² Нерабочие дни с 30 марта по 30 апреля и с 6 по 8 мая 2020 года в вопросах и ответах // Гарант.ру. Информационно-правовой портал. <https://base.garant.ru/77398903/> (дата обращения: 29.11.2021).

³ Там же.

⁴ Правительство запустит сайт стопкоронавирус.рф // Российская газета. <https://rg.ru/2020/03/16/pravitelstvo-zapustit-sajt-stopkoronavirusrf.html> (дата обращения: 29.11.2021).

нии против COVID-19 в РФ¹ и данных о динамике индекса самоизоляции в РФ. Значение индекса 16.03.2020 составило 1,19, а 30.12.2020 – 1,63. Изменение доли населения, начавшей соблюдать ограничительные меры в этот период, выражается через значения индекса как $\frac{1,63-1,19}{5}$. Предположим, что это изменение

обусловлено только информационным воздействием. Следовательно, можно вычислить переменную часть параметра k_{SP} , разделив полученную величину изменения на стоимость информационной кампании и на длительность ее проведения. Преобразовав выражение, имеем: $c_2^{PФ} = \frac{1,63-1,19}{5 \cdot 9,5 \cdot 502 \cdot 10^6} = 1,845 \cdot 10^{-11}$. Таким образом, параметр k_{SP} был оценен как функция, имеющая вид: $k_{SP}^{PФ} = 0,174 + 1,845 \cdot 10^{-11} \cdot U_3$.

Для Ульяновской области, произведя аналогичные вычисления и полагая, что в области проводилась только федеральная информационная кампания и у руководства области не было необходимости осуществлять вложения в организацию локальной информационной кампании, имеем: $c_2^{YO} = \frac{1,60-1,10}{5 \cdot 9,5 \cdot 502 \cdot 10^6} = 2,097 \cdot 10^{-11}$. Следовательно, $k_{SP}^{YO} = 0,122 + 2,097 \cdot 10^{-11} \cdot U_3$.

Параметры k_{SE} , k_{EP} , k_{IQ} , k_{IR} , k_{QD} , k_{QR} оценивались на основе методологии имитационного моделирования «черный ящик». С использованием авторского программного комплекса производилось решение обратной задачи: подбор параметров под известные значения показателей численности заболевших, выздоровевших, умерших, полученные из официальной статистики о COVID-19.

Параметр k_{SE} для РФ был оценен как функция, имеющая вид $k_{SE} = c_3 I$ (Brauer & Castillo-Chavez, 2012), с использованием статистической информации о числе случаев заболевания коронавирусной инфекцией в РФ на 31.12.2020² и о численности постоянного населения РФ на 01.01.2020³: $k_{SE}^{PФ} = 1,11 \cdot 10^{-7} I$.

¹ Субсидия 30320P4O000 // Госрасходы. https://spending.gov.ru/subsidies/subsidies_list/30320P4O000/ (дата обращения: 29.11.2021).

² Коронавирус: дашборд. URL: <https://datalens.yandex/covid19> (дата обращения: 29.11.2021).

³ Витрина статистических данных. Численность постоянного населения на 1 января // Федеральная служба государственной статистики. URL: <https://showdata.gks.ru/report/278928/> (дата обращения: 29.05.2021).

Параметр k_{SE} для Ульяновской области был оценен аналогично, с использованием статистической информации о числе случаев заболевания на 31.12.2020⁴ и о численности ее постоянного населения на 01.01.2020⁵: $k_{SE}^{YO} = 7,7 \cdot 10^{-6} I$.

Значение параметра k_{EI} для РФ рассчитывалось на основе данных о количестве заболевших COVID-19 в 2020 г.: $k_{EI}^{PФ} = 2,12$. С использованием статистики о количестве заболевших COVID-19 в Ульяновской области было получено значение параметра $k_{EI}^{YO} = 2,12$.

Параметр k_{IQ} для РФ был оценен с использованием данных о численности лиц, госпитализированных с COVID-19 в России⁶, и о количестве заболевших COVID-19 в стране в 2020 г. $k_{IQ}^{PФ} = 4,814$. Для Ульяновской области на основе аналогичных данных по региону⁷ было получено: $k_{IQ}^{YO} = 1,72$.

Параметр k_{QD} для РФ был оценен с использованием информации о числе погибших вследствие заболевания COVID-19 в РФ в 2020 году⁸: $k_{QD}^{PФ} = 0,1$. Для Ульяновской области значение было рассчитано с использованием данных по области⁹: $k_{QD}^{YO} = 0,13$.

Параметры k_{IR} и k_{QR} для РФ были оценены с использованием данных о числе выздоровевших от COVID-19 в стране¹⁰: $k_{IR}^{PФ} = 2,8$, $k_{QR}^{PФ} = 2,0$. Параметры k_{IR} и k_{QR} для Ульяновской области были оценены с использованием данных о числе выздоровевших от COVID-19 в регионе¹¹: $k_{IR}^{YO} = 2,36$, $k_{QR}^{YO} = 2,8$.

Выздоровевшие после перенесенного заболевания COVID-19 могут в течение года заболеть повторно, так как иммунитет к новому коронавирусу, по данным «Nature», со-

⁴ Коронавирус: дашборд. <https://datalens.yandex/covid19> (дата обращения: 29.11.2021).

⁵ Витрина статистических данных. Численность постоянного населения на 1 января // Федеральная служба государственной статистики. <https://showdata.gks.ru/report/278928/> (дата обращения: 29.05.2021).

⁶ Отчёт о результатах деятельности ФОМС за 2020 год. https://www.ffoms.gov.ru/system-oms/about-fund/fund-activities/1_ОТЧЕТ_о_результатах_деятельности_ФОМС_за_2020_год.pdf (дата обращения: 29.11.2021).

⁷ Почти 13,2 млрд рублей составило финансирование медицинских организаций Ульяновской области за 11 месяцев // Территориальный фонд обязательного медицинского страхования Ульяновской области. <http://ultfoms.ru/novosti-foms/371-pochti-132-mlrd-rublej-sostavilo-finansirovanie-meditsinskih-organizacij-uljanovskoj-oblasti-za-11-mesjacev.html> (дата обращения: 30.11.2021).

⁸ Коронавирус: дашборд. <https://datalens.yandex/covid19> (дата обращения: 30.11.2021).

⁹ Там же.

¹⁰ Там же.

¹¹ Там же.

храняется от 6 до 12 месяцев (Edridge et al., 2020). Параметр k_{RS} был оценен как среднее значение отношения числа случаев повторной заболеваемости в некоторых странах, экспертную оценку которого приводит «Science»¹, к общему числу выздоровлений от коронавирусной инфекции в этих странах²: $k_{RS} = 0,0002$. Предполагается, что полученное значение актуально также для РФ и Ульяновской области.

Значение параметра k для РФ было вычислено как отношение количества переоснащенных и модернизированных койко-мест к объему затрат на их переоборудование³: $k^{PF} = \frac{279 \cdot 10^5}{81,7 \cdot 10^9} = 3,415 \cdot 10^{-6}$. Для Ульяновской области данный параметр был рассчитан аналогично, использовались соответствующие данные⁴: $k^{YO} = \frac{2053}{755 \cdot 10^6} = 2,719 \cdot 10^{-6}$.

Параметр k_{ID} как для РФ, так и для Ульяновской области предполагается равным нулю: $k_{ID} = 0$.

Коэффициент m для России был оценен на основе данных за 2011–2019 гг. как среднее значение отношения среднегодовой численности занятых⁵ к общей численности на-

селения⁶: $m^{PF} = 0,482$. Для Ульяновской области данный коэффициент был рассчитан аналогично по данным за 2011–2019 гг.⁷: $m^{YO} = 0,467$.

Значение коэффициента e_1 было определено на основе экспертной оценки⁸: $e_1 = 0,879$. Коэффициент e_2 предполагается равным 1 в силу того, что эффективность труда здорового человека, работающего очно, принимается за 100 %, что в долях составляет 1. Значение коэффициента e_3 было определено на основе экспертной оценки⁹: $e_3 = 0,43$. Коэффициент e_4 на основании содержания модели принимается равным e_2 в соответствии с предположением, что эффективность труда выздоровевшего человека, вернувшегося к очной работе, эквивалентна эффективности труда здорового человека. Значения коэффициентов e , $i = 1,4$, предполагаются совпадающими для РФ и Ульяновской области.

Значение параметра ρ для РФ было оценено, по данным за 2016–2019 гг., как среднее значение отношения естественного прироста населения¹⁰ к общей численности населения¹¹: $\rho^{PF} = -9,516 \cdot 10^{-5}$. Для Ульяновской обла-

¹ More people are getting COVID-19 twice, suggesting immunity wanes quickly in some // Science. <https://www.sciencemag.org/news/2020/11/more-people-are-getting-covid-19-twice-suggesting-immunity-wanes-quickly-some> (дата обращения: 09.02.2021).

² COVID-19 Dashboard by the Center for Systems Science and Engineering (CSSE) at Johns Hopkins University (JHU). <https://gisanddata.maps.arcgis.com/apps/opsdashboard/index.html#/bda7594740fd40299423467b48e9ecf6> (дата обращения: 09.02.2021).

³ Об итогах работы Министерства здравоохранения Российской Федерации в 2020 году и задачах на 2021 год // Министерство здравоохранения Российской Федерации. https://static-0.minzdrav.gov.ru/system/attachments/attaches/000/055/642/original/MZRF_2021_All_08-04-2021-Preview.pdf?1619014721 (дата обращения: 29.11.2021).

⁴ Более 1,7 млрд рублей было выделено на здравоохранение из резервного фонда Ульяновской области в 2020 году // Губернатор и Правительство Ульяновской области. Официальный сайт. <https://ulgov.ru/news/index/permlink/id/58829/> (дата обращения: 29.11.2021); Выступление Министра здравоохранения Ульяновской области Мишарина В.М. перед депутатами ЗСО. «Отчёт о результатах деятельности Министерства здравоохранения Ульяновской области по итогам 2020 года» // Губернатор и Правительство Ульяновской области. <https://ulgov.ru/page/index/permlink/id/21783/> (дата обращения: 29.11.2021).

⁵ Среднегодовая численность занятых по видам экономической деятельности в 2000-2015 гг. // Федеральная служба государственной статистики. <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/05-05.xls> (дата обращения:

29.05.2021); Среднегодовая численность занятых по видам экономической деятельности (начиная с 2015 года) // Федеральная служба государственной статистики. https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/05-05_2015.xls (дата обращения: 29.05.2021); Среднегодовая численность занятых по видам экономической деятельности с 2017 года (ОКВЭД2) // Федеральная служба государственной статистики. https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/d6ZKIh10/05-05_2017-2019.xls (дата обращения: 29.05.2021).

⁶ Численность населения // Федеральная служба государственной статистики. URL: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/demo11.xls> (дата обращения: 29.05.2021).

⁷ Регионы России. Социально-экономические показатели. 2020: Стат. сб. // Федеральная служба государственной статистики. Москва, 2020. 1242 с. с. 489.

⁸ The impact of the COVID-19 pandemic on the euro area labour market // ECB Economic Bulletin, Issue 8/2020. https://www.ecb.europa.eu/pub/economic-bulletin/articles/2021/html/ecb.ebart202008_02~bc749d90e7.en.html#toc3 (дата обращения: 29.05.2021).

⁹ Как снизить абсентеизм и презентеизм в коллективе и повысить производительность труда? // Новости Франко-Российской торгово-промышленной палаты. URL: <https://www.ccifr.ru/news/kak-snizit-absenteizm-i-prezenteizm-v-kollektive-i-povysit-proizvoditelnost-truda> (дата обращения: 29.05.2021).

¹⁰ Рождаемость, смертность и естественный прирост // Федеральная служба государственной статистики. [https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/demo21\(1\).xls](https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/demo21(1).xls) (дата обращения: 29.05.2021).

¹¹ Численность населения // Федеральная служба государственной статистики. URL: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/demo11.xls> (дата обращения: 29.05.2021).

сти данный параметр был оценен аналогично, как среднее значение отношения естественного прироста населения¹ к численности населения на конец года², по данным за 2017–2019 гг.: $\rho^{yo} = -3,636 \cdot 10^{-3}$.

Значение параметра μ для России было оценено по данным статистического ежегодника «Здравоохранение в России»³ как среднее значение коэффициента выбытия основных фондов сферы здравоохранения в 2016–2018 гг.: $\mu^{пф} = 8,33 \cdot 10^{-3}$. Для Ульяновской области значение коэффициента μ^{yo} предполагается равным $\mu^{пф}$, поскольку в открытом доступе отсутствовали требуемые для его вычисления данные.

Функция $g(U_2)$ для РФ была задана как отношение объема инвестиций в возведение новых больниц к частному стоимости сооружения одной больницы и количества койко-мест в ней⁴: $g^{пф}(U_2) = \frac{U_2}{7237788}$. В Ульяновской области в 2020 г. не потребовалось возводить специальные стационары, поскольку размещение госпитализированных было организовано за счет переоборудования существующих койко-мест в больницах. Следовательно, $g^{yo}(U_2) = 0$.

Относительно функции $F(K(t), L(t))$ было сделано предположение о том, что она относится к классу производственных функций Кобба — Дугласа. Данная функция для РФ была оценена с использованием годовой статистики за 2011–2019 гг. о стоимости основных фондов предприятий⁵, о среднегодовой численности занятых⁶ и величине

ВВП⁷. Оценивание производилось с помощью построения линейной многофакторной регрессионной модели на основе логарифмированных рядов исходных данных. Пусть в течение года структура зависимости выпуска F от факторов K, L не меняется. Тогда выпуск за месяц можно оценить как

$$F^{пф}(K, L) = \frac{8,96 \cdot 10^{-4} \cdot K^{0,4387} \cdot L^{1,3667}}{12} = 7,47 \cdot 10^{-5} \cdot K^{0,4387} \cdot L^{1,3667}$$

(коэффициент детерминации 0,914, уровень значимости 0,0006). Зависимость стоимости основных фондов от времени предполагается экспоненциальной: $K^{пф}(t) = 3,4973 \cdot 10^{14} \cdot e^{0,0102t}$ (детерминация 0,9035). Обобщая две функции, с учетом формулы (10) можно записать:

$$F^{пф}(K(t), L(t)) = 7,47 \cdot 10^{-5} \cdot K(t)^{0,4387} \cdot L(t)^{1,3667}.$$

Для Ульяновской области с использованием соответствующих данных за 2011–2019 гг. о стоимости основных фондов предприятий, о среднегодовой численности занятых⁸ и величине ВРП⁹ были получены оценки функций:

$$F^{yo}(K, L) = \frac{338,739 \cdot K^{0,3815} \cdot L^{0,5728}}{12} = 28,228 \cdot K^{0,3815} \cdot L^{0,5728}$$

(коэффициент детерминации 0,911, уровень значимости 0,0007), $K^{yo}(t) = 1,256128 \cdot 10^{12} \times e^{0,01178t}$ (детерминация 0,949). С учетом (10) имеем:

$$F^{yo}(K(t), L(t)) = 28,228 \cdot K(t)^{0,3815} \cdot L(t)^{0,5728}.$$

¹ Основные демографические показатели по Ульяновской области // Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Ульяновской области. [https://uln.gks.ru/storage/mediabank/ОСНОВНЫЕ_ДЕМОГРАФИЧЕСКИЕ_ПОКАЗАТЕЛИ\(1\).docx](https://uln.gks.ru/storage/mediabank/ОСНОВНЫЕ_ДЕМОГРАФИЧЕСКИЕ_ПОКАЗАТЕЛИ(1).docx) (дата обращения: 29.11.2021).

² Регионы России. Социально-экономические показатели. 2020: Стат. сб. / Федеральная служба государственной статистики. Москва, 2020. 1242 с. С. 489.

³ Здравоохранение в России — 2019 г. https://gks.ru/bgd/regl/b19_34/Main.htm (дата обращения: 29.05.2021).

⁴ Распоряжение Правительства Российской Федерации от 06.08.2020 № 2041-р // Официальный интернет-портал правовой информации. <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202008110020> (дата обращения: 29.11.2021).

⁵ Наличие основных фондов по полной учётной стоимости на конец отчётного года // Федеральная служба государственной статистики. https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/kAFrpbG/NAL_vs.xlsx (дата обращения: 29.05.2021).

⁶ Среднегодовая численность занятых по видам экономической деятельности в 2000–2015 гг. // Федеральная служба государственной статистики. <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/05-05.xls> (дата обращения: 29.05.2021).

⁷ Валовой внутренний продукт. Годовые данные. В текущих ценах // Федеральная служба государственной статистики. <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/94cQBmp/tab1.htm> (дата обращения: 29.05.2021).

⁸ Регионы России. Социально-экономические показатели. 2020: Стат. сб. // Федеральная служба государственной статистики. Москва, 2020. 1242 с. С. 489.

⁹ ВРП с 1998 года // Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Ульяновской области. [https://uln.gks.ru/storage/mediabank/ВРП_с_1998_года\(46\).xlsx](https://uln.gks.ru/storage/mediabank/ВРП_с_1998_года(46).xlsx) (дата обращения: 29.11.2021).

В следующих вычислительных экспериментах полученные значения параметров используются для демонстрации возможного способа оценки эффективности управленческого решения, которое было принято в период пандемии COVID-19 в РФ и Ульяновской области в 2020 г.

Вычислительные эксперименты

Оценить эффективность управленческой стратегии можно с помощью анализа значений определенных целевых показателей. Для региона как экономической системы таким целевым показателем зачастую является величина валового выпуска. В условиях массового заболевания руководству региона необходимо также контролировать численность заболевших: желательнее, чтобы она была как можно меньше. Таким образом, в случае эпидемии значения двух указанных целевых показателей могут использоваться для оценивания эффективности стратегии управления. При этом очевидно, что значения таких показателей находятся не только в зависимости от управленческих воздействий, но и от факторов внешней среды (особенности массового заболевания, социально-демографическая ситуация в регионе, состояние экономики и т. д.).

Поскольку модель (1)–(14) позволяет вычислять значения вышеназванных целевых показателей, а также учитывает требуемые внешние факторы, при ее помощи можно оценить эффективность выбранной управленческой стратегии, используя методологию имитационного моделирования (Arsekar et al., 2013).

Проведем на основе модели (1)–(14) и оценок ее параметров вычислительный эксперимент, направленный на исследование значений целевых показателей (количества заболевших и величины валового выпуска) при изменении значений параметров модели, которые учитывают условия внешней среды, социально-экономические факторы, особенности управленческих решений.

В РФ во время пандемии COVID-19 в 2020 г. было реализовано следующее управленческое решение. Через 2 недели после того, как уровень заболеваемости принял критическое значение, было объявлено о введении ограничительных мер; спустя 2 месяца они были сняты. Были выделены средства на переоборудование существующих койко-мест для размещения заболевших новой коронавирусной инфекцией, на увеличение числа койко-мест за счет строительства новых больниц, на информационную кампанию по борьбе с заболеванием. В модели

(1)–(14) это соответствует следующим значениям переменных: $\tau_1 = 0,5$ мес., $\tau_2 = 2,5$ мес., $T = 9,5$ мес., $U_1 = 81,7$ млрд руб., $U_2 = 28,951$ млрд руб.¹, $U_3 = 0,502$ млрд руб.

В Ульяновской области в период пандемии COVID-19 управленческая стратегия во многом определялась решениями, принимаемыми на федеральном уровне. Поэтому моменты введения и отмены ограничительных мер в данном регионе совпадают с указанными для России. Кроме того, федеральная информационная кампания против коронавируса проводилась в том числе и в Ульяновской области, поэтому предполагается, что у руководства области не было необходимости осуществлять вложения в организацию локальной информационной кампании. Также в области в 2020 г. не потребовалось возводить специальные стационары, поскольку размещение госпитализированных с новой коронавирусной инфекцией было организовано за счет переоборудования существующих койко-мест в больницах. Вышесказанное соответствует следующим значениям переменных модели (1)–(16): $\tau_1 = 0,5$ мес., $\tau_2 = 2,5$ мес., $T = 9,5$ мес., $U_1 = 0,755$ млрд руб., $U_2 = 0$, $U_3 = 0,502$ млрд руб.

В рамках вычислительного эксперимента для данных стратегий управления были рассчитаны значения целевых показателей, которые считались базовыми при дальнейших сравнениях: для РФ суммарная численность заболевших за $T = 3\,378\,455$ чел., валовой выпуск — 80 509,32 млрд руб.; для Ульяновской области суммарная численность заболевших 37 073 чел., валовой выпуск 21,98 млрд руб.

Исследование изменчивости значений целевых показателей при заданной стратегии в зависимости от изменения внешних условий осуществлялось при помощи варьирования параметров модели на $\pm 1\%$. Исключение составили параметры s_1, s_2, s_3, s_4 , которые находятся в прямой линейной связи с параметрами e_1, e_2, e_3, e_4 соответственно, а также с параметром m , из чего следует нецелесообразность анализа их влияния на целевые показатели.

¹ Об итогах работы Министерства здравоохранения Российской Федерации в 2020 году и задачах на 2021 год // Министерство здравоохранения Российской Федерации. https://static-0.minzdrav.gov.ru/system/attachments/attaches/000/055/642/original/MZRF_2021_All_08-04-2021-Preview.pdf?1619014721 (дата обращения: 29.11.2021); Распоряжение Правительства Российской Федерации от 06.08.2020 № 2041-р // Официальный интернет-портал правовой информации. <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202008110020> (дата обращения: 29.11.2021).

Таблица

Изменение значений целевых показателей при варьировании значений параметров

Table

Changes in the values of target indicators due to parameter variations

Вариация параметра	Изменение целевого показателя, %	
	количество заболевших в РФ (в Ульяновской области)	валовый выпуск РФ (Ульяновской области)
<i>Сверхкритические параметры</i>		
0,99 k_{SE}	-17,73949 (-14,75185)	0,03278 (0,01556)
1,01 k_{SE}	21,31859 (17,09955)	-0,03933 (-0,01804)
0,99 k_{IQ}	12,19974 (5,42178)	-0,02256 (-0,00572)
1,01 k_{IQ}	-10,84887 (-5,13967)	0,02007 (0,00542)
<i>Критические параметры</i>		
0,99 k_{IR}	4,89544 (7,51416)	-0,00929 (-0,00822)
1,01 k_{IR}	-4,66246 (-6,98297)	0,00884 (0,00762)
0,99 k_{EI}	-7,50406 (-5,17955)	0,01302 (0,00498)
1,01 k_{EI}	8,04136 (5,40941)	-0,01388 (-0,00518)
0,99 k_{PS}	-3,74694 (-2,57191)	-0,01866 (-0,00568)
1,01 k_{PS}	3,83571 (2,60454)	0,01817 (0,00555)
0,99 m	0,00000 (0,00000)	-1,36422 (-0,57403)
1,01 m	0,00000 (0,00000)	1,36923 (0,57158)
0,99 a	1,38503 (1,36927)	0,00523 (0,00180)
1,01 a	-1,36852 (-1,35370)	-0,00526 (-0,00181)
0,99 e_2	0,00000 (0,00000)	-1,08193 (-0,46087)
1,01 e_2	0,00000 (0,00000)	1,08510 (0,45928)
<i>Слабокритические параметры</i>		
0,99 c_2	0,01891 (0,02027)	0,00009 (0,00005)
1,01 c_2	-0,01891 (-0,02027)	-0,00009 (-0,00005)
0,99 k_{QD}	0,00000 (0,00000)	0,00003 (0,00002)
1,01 k_{QD}	0,00000 (0,00000)	-0,00003 (-0,00002)
0,99 k_{QR}	0,00000 (0,00000)	-0,00038 (-0,00014)
1,01 k_{QR}	0,00000 (0,00000)	0,00037 (0,00014)
0,99 k_{RS}	0,00000 (-0,00001)	0,00000 (0,00000)
1,01 k_{RS}	0,00000 (0,00001)	0,00000 (0,00000)
0,99 b	-0,24873 (-0,35650)	-0,00108 (-0,00063)
1,01 b	0,24928 (0,35761)	0,00108 (0,00063)
0,99 e_1	0,00000 (0,00000)	-0,28053 (-0,11096)
1,01 e_1	0,00000 (0,00000)	0,28077 (0,11086)
0,99 e_3	0,00000 (0,00000)	-0,00070 (-0,00039)
1,01 e_3	0,00000 (0,00000)	0,00070 (0,00039)
0,99 e_4	0,00000 (0,00000)	-0,00186 (-0,00143)
1,01 e_4	0,00000 (0,00000)	0,00186 (0,00143)
0,99 ρ	0,00676 (0,20596)	0,00047 (0,00753)
1,01 ρ	-0,00676 (-0,20551)	-0,00047 (-0,00753)

Вычислено авторами.

Значения целевых показателей, наблюдаемые при изменениях значений параметров, сравнивались с их базовыми значениями; рассчитывалось относительное изменение значений (табл.). В таблицу не включено варьирование параметров, влияние которых отсутствует либо несущественно.

По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

— параметры (факторы) по силе их влияния на целевые показатели можно разделить на 3 группы: «сверхкритические» (изменение хотя бы одного целевого показателя более 10 %), «критические» (изменение хотя бы од-

ного целевого показателя для одного из регионов от 1 % до 10 %), «слабокритические» (изменение всех целевых показателей для обоих регионов менее 1 %);

— различие в степени влияния параметров на целевые показатели для РФ и Ульяновской области объясняется их социально-экономическими отличиями: степенью эластичности валового выпуска по численности трудовых ресурсов, наличием и объемом вложений в реализацию тех или иных управленческих воздействий и т. д.;

— для достоверного определения эффективности управленческой стратегии необходимо использовать как можно более точные оценки параметров, относящихся к группе «сверхкритические», так как целевые показатели имеют высокую эластичность к этим параметрам;

— оценка параметров группы «критические» должна быть также достаточно аккуратной, несмотря на то, что влияние этих параметров на целевые показатели слабее, чем параметров группы «сверхкритические»;

— целевые показатели демонстрируют устойчивое поведение относительно параметров, отнесенных к группе «слабокритические», но такие параметры все же нельзя исключать из рассмотрения при анализе стратегии, так как степень влияния тех или иных параметров может изменяться в зависимости от рассматриваемой ситуации.

Предлагаемая модель позволяет не только проводить оценку выбранной управленческой стратегии, но и сравнивать такие стратегии между собой. Проведем на основе модели (1)-(14) и оценок ее параметров вычислительный эксперимент, направленный на исследование значений целевых показателей (количества заболевших и величины валового выпуска) в зависимости от реализуемой управленческой стратегии.

Рассмотрим две альтернативы для стратегий в 2020 г.: 1) в начале эпидемии в регионе вводятся ограничительные меры, которые сохраняются в течение рассматриваемого периода (в данном случае равен 9,5 месяцам), 2) в течение рассматриваемого периода в регионе не вводятся ограничительных мер.

Предположим, что через 0,5 месяца после того, как уровень заболеваемости принял критическое значение, в России был введен режим самоизоляции, который продлился до конца календарного года. В этом случае, согласно расчетам, относительно базовых значений в рассматриваемом периоде в РФ валовый выпуск

уменьшается на 0,11 % (по Ульяновской области уменьшается на 0,07 %), число заболевших уменьшается на 22,31 % (по Ульяновской области — на 30,59 %).

Если бы ограничительные меры не вводились, то в рассматриваемом периоде в РФ наблюдались бы следующие изменения показателей относительно базовых значений: увеличение валового выпуска на 0,3 % (в Ульяновской области — на 0,07 %), увеличение числа заболевших на 197,36 % (в Ульяновской области — на 179,78 %).

Отметим, что вариабельность валового выпуска в обоих случаях существенно выше по РФ, чем по Ульяновской области. Это можно объяснить большей эластичностью валового выпуска по труду для России и влиянием пандемии на результативность труда и численность трудовых ресурсов. Что касается количества заболевших, то результаты показывают существенное увеличение этого показателя в случае полного отказа от ограничительных мер. Следовательно, введение ограничительных мер на территории РФ в 2020 г. было оправданным решением.

Приведенные выше результаты эксперимента соответствуют общему пониманию рассматриваемой проблемы: при увеличении длительности ограничительных мер уменьшается число заболевших, но уменьшается и валовый доход; при отсутствии карантина увеличивается валовый доход, но при этом увеличивается и число заболевших.

Проведенные вычислительные эксперименты продемонстрировали, что разработанный инструмент может применяться для выбора эффективных социально-экономических стратегий при управлении регионом в условиях массового заболевания.

Заключение

В работе предлагается инструмент выбора и анализа управленческих решений экономического субъекта в условиях массовых заболеваний: специализированная математическая модель и программное обеспечение, разработанное на ее основе. Новизна предлагаемого решения заключается в том, что математическая модель включает в себя социально-биологические и экономические факторы, а также управляющие воздействия, в отличие от других известных моделей.

Разработанное программное обеспечение позволяет осуществлять оценивание управленческих стратегий с помощью расчета значений целевых показателей. Способы такого

оценивания были показаны с помощью вычислительных экспериментов, где объектом моделирования выступила экономика РФ и Ульяновской области в период пандемии COVID-19 в 2020 г. В работе было проведено исследование изменения значений целевых показателей модели при варьировании ее пара-

метров. Также было проведено моделирование стратегий поддержания регионом ограничительных мер или отсутствия таких мер в течение рассматриваемого периода.

Перспектива развития инструмента состоит в дополнении его критериями качества и алго-

ритмами численного поиска оптимальных стратегий управления экономикой региона в условиях массовых заболеваний.

Список источников

- Андреева, Е. А., Семькина, Н. А. (2005). Оптимальное управление процессом распространения инфекционного заболевания с учетом латентного периода. *Журнал вычислительной математики и математической физики*, 45(7), 1174–1180.
- Бобков, А. В., Верещагина, В. К. (2020). Коррекционная динамика экономической активности в условиях воздействия мер купирования пандемии. *Инновации и инвестиции*, 8, 94–98.
- Кулькова, И. А. (2020). Влияние пандемии коронавируса на демографические процессы в России. *Human Progress*, 6(1), 2–11. DOI: 10.34709/IM.161.5.
- Лутошкин, И. В. (2011). Оптимизация нелинейных систем с интегро-дифференциальными связями методом параметризации. *Известия ИГУ. Сер. Математика*, 4(1), 44–56.
- Лутошкин, И. В., Рыбина, М. С. (2021а). Математическая модель оптимального управления ресурсами в условиях пандемии. В: *Мат-лы междунар. молодежного науч. форума «Ломоносов-2021»* (с. 103–108). Нижний Новгород. URL: https://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2021/data/22519/127569_uid543558_report.pdf (дата обращения: 29.05.2021).
- Лутошкин, И. В., Рыбина, М. С. (2021b). Проблема оценки параметров математической модели влияния пандемии на экономику. В: *Сб. тезисов докладов конгресса молодых ученых*. Университет ИТМО. URL: <https://kmu.itmo.ru/digests/article/7045> (дата обращения: 29.05.2021).
- Матвеев, А. В. (2020). Математическое моделирование оценки эффективности мер против распространения эпидемии COVID-19. *Национальная безопасность и стратегическое планирование*, 1(29), 23–39. DOI: 10.37468/2307-1400-2020-1-23-39
- Самарский, А. А. (2005). *Введение в численные методы. Учебное пособие для вузов*. 3-е изд., стер. Санкт-Петербург: Издательство «Лань», 288.
- Ali, U., Bakshi, A. & Wani, M. (2020). Dynamics of COVID-19: Modelling and Analysis. *Journal of Infectious Diseases and Epidemiology*, 6, 1–11. DOI: 10.23937/2474-3658/1510128.
- Arino, J., Brauer, F., van den Driessche, P., Watmough, J. & Wu, J. (2006). Simple models for containment of a pandemic. *Journal of the Royal Society Interface*, 3(8), 453–457. DOI: 10.1098/rsif.2006.0112.
- Arsekar, R., Mandarapu, D. K. & Rao, M. V. P. (2017). EpiStrat: A Tool for Comparing Strategies for Tackling Urban Epidemic Outbreaks. In: H. Chen, D. Zen, E. Karahanna, I. Bardhan (Eds.), *Smart Health. ICSH 2017. Lecture Notes in Computer Science*, 10347 (pp. 256–267). Cham: Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-67964-8_25.
- Atkeson, A. (2020). *What will be the economic impact of Covid-19 in the US? Rough estimates of disease scenarios*. NBER Working Papers. Retrieved from: https://www.nber.org/system/files/working_papers/w26867/w26867.pdf (date of access: 29.05.2021).
- Brauer, F. & Castillo-Chavez, C. (2012). *Mathematical models in population biology and epidemiology*. Vol. 40. New York: Springer, 508.
- Britton, N. F. (2003). *Essential Mathematical Biology*. London: Springer, 335. DOI: 10.1007/978-1-4471-0049-2.
- Edridge, A. W. D., Kaczorowska, J., Hoste, A. C. R., Bakker, M., Klein, M., Loens, K., ... van der Hoek, L. (2020). Seasonal coronavirus protective immunity is short-lasting. *Nature Medicine*, 26, 1691–1693. DOI: 10.1038/s41591-020-1083-1.
- Funk, S., Gilad, E., Watkins, C. & Jansen, V. A. A. (2009). The spread of awareness and its impact on epidemic outbreaks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(16), 6872–6877. DOI: 10.1073/pnas.0810762106.
- İğret Araz, S. (2020). Analysis of a Covid-19 model: Optimal control, stability and simulations. *Alexandria Engineering Journal*, 60(1), 1–12. DOI: 10.1016/j.aej.2020.09.058.
- Macalisang, J., Caay, M., Arcede, J. & Caga-anan, R. (2020). Optimal Control for a COVID-19 Model Accounting for Symptomatic and Asymptomatic. *Computational and Mathematical Biophysics*, 8, 168–179. DOI: 10.1515/cmb-2020-0109.
- Castillo-Chavez, C., Blower S., van den Driessche, P., Kirschner, D. & Yakubu, A.-A. (Eds.) (2002). *Mathematical Approaches for Emerging and Reemerging Infectious Diseases: Models, Methods and Theory*. New York: Springer, 377. DOI: 10.1007/978-1-4613-0065-6.

Miao, H., Gao, Q., Feng, H., Zhong, C., Zhu, P., Wu, L., ... Lairson, D. (2020). Mathematical Modeling of Business Reopening When Facing SARS-CoV-2 Pandemic: Protection, Cost, and Risk. *Frontiers in Applied Mathematics and Statistics*, 6(35), 1-16. DOI: 10.3389/fams.2020.00035.

Miller, J. C. (2014). Epidemics on Networks with Large Initial Conditions or Changing Structure. *PLoS ONE*, 9(7), 1-9. DOI: 10.1371/journal.pone.0101421.

Ovsyannikova, N. I. (2017). Problem of optimal control of epidemic in view of latent period. *Civil Aviation High Technologies*, 20(2), 144-152.

Sha, H., Sanyi, T. & Libin, R. (2020). A discrete stochastic model of COVID-19 outbreak: forecast and control. *Mathematical Biosciences and Engineering*, 17(4), 2792-2804. DOI: 10.3934/mbe.2020153.

Volz, E. & Meyers, L. A. (2007). Susceptible-infected-recovered epidemics in dynamic contact networks. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 274(1628), 2925-2934. DOI: 10.1098/rspb.2007.1159.

Zamir, M., Abdeljawad, T., Nadeem, F., Khan, A. & Yousef, A. (2021). An optimal control analysis of a COVID-19 model. *Alexandria Engineering Journal*, 60(2), 2875-2884. DOI: 10.1016/j.aej.2021.01.022.

References

Ali, U., Bakshi, A. & Wani, M. (2020). Dynamics of COVID-19: Modelling and Analysis. *Journal of Infectious Diseases and Epidemiology*, 6, 1-11. DOI: 10.23937/2474-3658/1510128.

Andreeva, E. A. & Semykina, N. A. (2005). Optimal control of the spread of an infectious disease with allowance for an incubation period. *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki [Computational Mathematics and Mathematical Physics]*, 45(7), 1174-1180. (In Russ.)

Arino, J., Brauer, F., van den Driessche, P., Watmough, J. & Wu, J. (2006). Simple models for containment of a pandemic. *Journal of the Royal Society Interface*, 3(8), 453-457. DOI: 10.1098/rsif.2006.0112.

Arsekar, R., Mandarapu, D. K. & Rao, M. V. P. (2017). EpiStrat: A Tool for Comparing Strategies for Tackling Urban Epidemic Outbreaks. In: H. Chen, D. Zen, E. Karahanna, I. Bardhan (Eds.), *Smart Health. ICSH 2017. Lecture Notes in Computer Science*, 10347 (pp. 256-267). Cham: Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-67964-8_25.

Atkeson, A. (2020). *What will be the economic impact of Covid-19 in the US? Rough estimates of disease scenarios*. NBER Working Papers. Retrieved from: https://www.nber.org/system/files/working_papers/w26867/w26867.pdf (date of access: 29.05.2021).

Bobkov, A. V. & Vereshchagina, V. K. (2020). Correctional dynamics of economic activity under the influence of measures to control the pandemic. *Innovatsii i investitsii [Innovation and Investment]*, 8, 94-98. (In Russ.)

Brauer, F. & Castillo-Chavez, C. (2012). *Mathematical models in population biology and epidemiology*. Vol. 40. New York: Springer, 508.

Britton, N. F. (2003). *Essential Mathematical Biology*. London: Springer, 335. DOI: 10.1007/978-1-4471-0049-2.

Castillo-Chavez, C., Blower S., van den Driessche, P., Kirschner, D. & Yakubu, A.-A. (Eds.) (2002). *Mathematical Approaches for Emerging and Reemerging Infectious Diseases: Models, Methods and Theory*. New York: Springer, 377. DOI: 10.1007/978-1-4613-0065-6.

Edridge, A. W. D., Kaczorowska, J., Hoste, A. C. R., Bakker, M., Klein, M., Loens, K., ... van der Hoek, L. (2020). Seasonal coronavirus protective immunity is short-lasting. *Nature Medicine*, 26, 1691-1693. DOI: 10.1038/s41591-020-1083-1.

Funk, S., Gilad, E., Watkins, C. & Jansen, V. A. A. (2009). The spread of awareness and its impact on epidemic outbreaks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(16), 6872-6877. DOI: 10.1073/pnas.0810762106.

İğret Araz, S. (2020). Analysis of a Covid-19 model: Optimal control, stability and simulations. *Alexandria Engineering Journal*, 60(1), 1-12. DOI: 10.1016/j.aej.2020.09.058.

Kulkova, I. A. (2020). Impact of the coronavirus pandemic on demographic processes in Russia. *Human Progress*, 6(1), 2-11. DOI: 10.34709/IM.161.5. (In Russ.)

Lutoshkin, I. V. & Rybina, M. S. (2021a). Mathematical model of optimal resource management in conditions of a pandemic. In: *Mat-ly mezhdunar. molodezhnogo nauch. foruma «Lomonosov-2021» [Proceedings of the International Youth Scientific Forum "LOMONOSOV-2021"]* (pp. 103-108). Nizhny Novgorod. Retrieved from: https://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2021/data/22519/127569_uid543558_report.pdf (Date of access: 29.05.2021). (In Russ.)

Lutoshkin, I. V. & Rybina, M. S. (2021b). The problem of estimating the parameters of the mathematical model of the impact of a pandemic on an economy. In: *Sb. tezisov dokladov kongressa molodykh uchenykh [Collection of abstracts of the Congress of Young Scientists]*. ITMO University. Retrieved from: <https://kmu.itmo.ru/digests/article/7045> (Date of access: 29.05.2021). (In Russ.)

Lutoshkin, I. V. (2011). The parameterization method for optimizing the systems which have integro-differential equations. *Izvestiya IGU. Ser. Matematika [The Bulletin of Irkutsk State University. Series Mathematics]*, 4(1), 44-56. (In Russ.)

Macalisang, J., Caay, M., Arcede, J. & Caga-anan, R. (2020). Optimal Control for a COVID-19 Model Accounting for Symptomatic and Asymptomatic. *Computational and Mathematical Biophysics*, 8, 168-179. DOI: 10.1515/cmb-2020-0109.

- Matveev, A. V. (2020). The mathematical modeling of the effective measures against the Covid-19 spread. *Natsionalnaya bezopasnost i strategicheskoe planirovanie [National Security and Strategic Planning]*, 1(29), 23-39. DOI:10.37468/2307-1400-2020-1-23-39 (In Russ.)
- Miao, H., Gao, Q., Feng, H., Zhong, C., Zhu, P., Wu, L., ... Lairson, D. (2020). Mathematical Modeling of Business Reopening When Facing SARS-CoV-2 Pandemic: Protection, Cost, and Risk. *Frontiers in Applied Mathematics and Statistics*, 6(35), 1-16. DOI: 10.3389/fams.2020.00035.
- Miller, J. C. (2014). Epidemics on Networks with Large Initial Conditions or Changing Structure. *PLoS ONE*, 9(7), 1-9. DOI: 10.1371/journal.pone.0101421.
- Ovsyannikova, N. I. (2017). Problem of optimal control of epidemic in view of latent period. *Civil Aviation High Technologies*, 20(2), 144-152.
- Samarskiy, A. A. (2005). *Vvedenie v chislennyye metody. Uchebnoye posobie dlya vuzov. 3-e izd., ster. [Introduction to numerical methods. Textbook for universities. 3rd ed.]*. Saint Petersburg: Lan', 288. (In Russ.)
- Sha, H., Sanyi, T. & Libin, R. (2020). A discrete stochastic model of COVID-19 outbreak: forecast and control. *Mathematical Biosciences and Engineering*, 17(4), 2792-2804. DOI: 10.3934/mbe.2020153.
- Volz, E. & Meyers, L. A. (2007). Susceptible–infected–recovered epidemics in dynamic contact networks. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 274(1628), 2925–2934. DOI: 10.1098/rspb.2007.1159.
- Zamir, M., Abdeljawad, T., Nadeem, F., Khan, A. & Yousef, A. (2021). An optimal control analysis of a COVID-19 model. *Alexandria Engineering Journal*, 60(2), 2875-2884. DOI: 10.1016/j.aej.2021.01.022.

Информация об авторах

Лутошкин Игорь Викторович — кандидат физико-математических наук, доцент, Институт экономики и бизнеса, заведующий кафедрой цифровой экономики, Ульяновский государственный университет; Scopus Author ID: 8832917900; ResearcherID: O-5276-2019; <https://orcid.org/0000-0002-4108-7646> (Российская Федерация, г. Ульяновск, ул. Пушкинская, д. 4А; e-mail: lutoshkiniv@ulsu.ru).

Рыбина Мария Сергеевна — студент (бакалавр), Институт экономики и бизнеса, Ульяновский государственный университет; <https://orcid.org/0009-0002-4049-751X> (Российская Федерация, г. Ульяновск, ул. Пушкинская, д. 4А; e-mail: rybina_maria@icloud.com).

About the authors

Igor V. Lutoshkin — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Institute of Economics and Business, Head of Digital Economy Department, Ulyanovsk State University; Scopus Author ID: 8832917900; Researcher ID: O-5276-2019; <https://orcid.org/0000-0002-4108-7646> (4A, Pushkinskaya St., Ulyanovsk, 432063, Russian Federation; e-mail: lutoshkiniv@ulsu.ru).

Maria S. Rybina — Bachelor Student, Institute of Economics and Business, Ulyanovsk State University; <https://orcid.org/0009-0002-4049-751X> (4A, Pushkinskaya St., Ulyanovsk, 432063, Russian Federation; e-mail: rybina_maria@icloud.com).

Дата поступления рукописи: 31.05.2021.

Прошла рецензирование: 14.12.2021.

Принято решение о публикации: 24.03.2023.

Received: 31 May 2021.

Reviewed: 14 Dec 2021.

Accepted: 24 Mar 2023.