DOI: 10.33276/978-5-8211-0794-7-103-115

А.Л. Арутюнов

Арутюнов Арсен Левонович, н.с. ЦЭМИ РАН, эксперт РАН, Москва,
arsenrea@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ «ПЕРВОЙ ВОЛНЫ» ИНФЕКЦИОННО-ВИРУСНОГО ЗАБОЛЕВАНИЯ НОВОГО ТИПА COVID-19 В РФ

В статье приводятся результаты исследования по математическому моделированию процесса распространения коронавирусного заболевания нового типа под кодовым названием (согласно классификации ВОЗ) «COVID-19». Применяемые математические методы и модели по обработке ежедневной информации по скорости заражаемости среди населения РФ начиная с даты регистрации первого случая заражения по данным ВОЗ и Роспотребнадзора до момента максимальной вспышки, позволили дать прогнозную оценку первой волны затухания процесса заражения учитывая такой управляющий параметр в модели как коэффициент дистанцирования и изоляции.

Ключевые слова: методы, модели, моделирование, функция, система, прогноз, процесс, статистика, информация, COVID, коронавирус, заражение, ВОЗ, оценка, волна, затухание, заражение, население.

JEL классификация: C02, C30, C31, C32, C33, C35, C39, C40.

ВВЕДЕНИЕ

Процессы появления и распространения (вспышек) инфекционно-вирусных заболеваний различного генезиса среди населения планеты имеет длительную историю. Практически с «первого дня» сотворения мира человечество обитает в среде вирусов и микробов, тем более что вирусы и микробы как некая форма жизни появились на Земле задолго до появления различных других биологических форм жизнедеятельности среди флоры и фауны.

Проявление пандемии таких масштабов среди население Земли с достаточно высокой скоростью распространения по странам и континентам а также с высоким коэффициентом контагиозности¹ также имеет длительную историю. Достаточно вспомнить предыдущую пандемию планетарного масштаба, связанную с распространением вируса Испанского гриппа («испанки») в период с 1913 по 1923 г., с цикличностью равную 3 (т.е. 3 волны с пиковыми значениями по заражаемости и смертности).

Согласно официальным данным сборника «Статистика смертности» за 1919 г. (Mortality Statistic 1919) выпущенного в ежегодном отчете Министерства Финансов США за 1921 г., только на территории Североамериканских штатов картина процесса

¹ В случае с COVID-19 показатель данного коэффициента по данным различных экспертов Всемирной Организации Здравоохранения (ВОЗ) варьируется от 0,5 до 0,7 – что является в достаточной степени высоким показателем.

распространения смертности от Испанского гриппа представлена на следующих графиках и таблицах (см. рис. 1, 2).

Рис. 1. Вспышка Испанского гриппа в городах США (Нью-Йорк и Питтсбург) с наибольшим показателем

Рис. 2. Вспышка Испанского гриппа в городах США (Денвер и Сент-Луис) с наибольшим показателем

Таблица 1

Показатель смертности в городах США от Испанского гриппа на 100 тыс. населения

	Льюсвилль	Сент-Луис	Канзас Сити	Чикаго	Индианаполис
1915	359	1144	504	4220	420
1916	427	1480	408	4202	452
1917	485	1696	618	5137	472
1918	2357	4054	2220	13423	1420
1919	837	1546	954	5075	762
1920	463	2032	1147	6049	782

Источник: [1].

Таблица 2

**Темпы прироста (%) смертности в городах США от Испанского гриппа
на 100 тыс. населения**

	Льюсвилль	Сент-Луис	Канзас Сити	Чикаго	Индианаполис
1915	—	—	—	—	—
1916	18,9	29,4	−19,0	−0,4	7,6
1917	13,6	14,6	51,5	22,3	4,4
1918	386,0	139,0	259,2	161,3	200,8
1919	−64,5	−61,9	−57,0	−62,2	−46,3
1920	−44,7	31,4	20,2	19,2	2,6

На рис. 3–6 даны различные динамики заражения Испанским гриппом по миру.

Рис. 3. Динамика заражения Испанским гриппом по миру в 1911–1920 гг.

Рис. 4. Квартальные показатели количества зараженных «испанкой» в 1918–1919 гг. по миру

Рис. 5. Пиковые показатели динамики заражения «испанкой» в столицах Европы и США за 1918–1919 гг.

Рис. 6. Показатели динамики смертности в пиковый период 1918/1919 гг. в крупных городах Европы и США

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИНФЕКЦИОННО-ВИРУСНОГО ЗАБОЛЕВАНИЯ НОВОГО ТИПА COVID-19 НА ТЕРРИТОРИИ РФ

Первый случай проникновения COVID-19 (согласно наименованию ВОЗ) на территорию РФ с территорий сопредельных государств был зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Роспотребнадзор) 1 февраля 2020 г. в количестве 2-х зараженных. Дальнейший рост динамики заражения (с учетом темпов роста до пикового значения первой волны скорости распространения с 1 февраля по 1 мая 2020 г.) представлены в табл. 3.

Абсолютные средние статистические показатели по динамике процесса распространения COVID19 по территории РФ представлены в табл. 3.1.

Общий вид динамики распространения COVID-19 по территории РФ в период до пикового значения первой волны (и до начала спада или «затухания») представлен на рис. 7.

Темп прироста заболевания на территории РФ представлен на рис. 8.

Таблица 3

**Статистические данные динамики и темпов (при)роста заболевших
на территории РФ до пикового значения первой волны
распространения COVID-19**

	Кол-во заболевших среди населения РФ	Суточный прирост	Темп роста	Темп прироста	Темп прироста, %
01 февраля 2020 г.	2				
02 февраля 2020 г.	2	0	1,00	0,000	0,00
03 февраля 2020 г.	2	0	1,00	0,000	0,00
04 февраля 2020 г.	2	0	1,00	0,000	0,00
05 февраля 2020 г.	2	0	1,00	0,000	0,00
06 февраля 2020 г.	2	0	1,00	0,000	0,00
07 февраля 2020 г.	2	0	1,00	0,000	0,00
08 февраля 2020 г.	2	0	1,00	0,000	0,00
09 февраля 2020 г.	2	0	1,00	0,000	0,00
10 февраля 2020 г.	2	0	1,00	0,000	0,00
11 февраля 2020 г.	2	0	1,00	0,000	0,00
12 февраля 2020 г.	2	0	1,00	0,000	0,00
13 февраля 2020 г.	2	0	1,00	0,000	0,00
14 февраля 2020 г.	2	0	1,00	0,000	0,00
15 февраля 2020 г.	2	0	1,00	0,000	0,00
16 февраля 2020 г.	2	0	1,00	0,000	0,00
17 февраля 2020 г.	2	0	1,00	0,000	0,00
18 февраля 2020 г.	2	0	1,00	0,000	0,00
19 февраля 2020 г.	2	0	1,00	0,000	0,00
20 февраля 2020 г.	2	0	1,00	0,000	0,00
21 февраля 2020 г.	2	0	1,00	0,000	0,00
22 февраля 2020 г.	2	0	1,00	0,000	0,00
23 февраля 2020 г.	2	0	1,00	0,000	0,00
24 февраля 2020 г.	2	0	1,00	0,000	0,00
25 февраля 2020 г.	2	0	1,00	0,000	0,00
26 февраля 2020 г.	2	0	1,00	0,000	0,00
27 февраля 2020 г.	2	0	1,00	0,000	0,00
28 февраля 2020 г.	2	0	1,00	0,000	0,00
29 февраля 2020 г.	2	0	1,00	0,000	0,00
01 марта 2020 г.	2	0	1,00	0,000	0,00
02 марта 2020 г.	3	1	1,50	0,500	50,00
03 марта 2020 г.	3	0	1,00	0,000	0,00
04 марта 2020 г.	3	0	1,00	0,000	0,00
05 марта 2020 г.	4	1	1,33	0,333	33,33
06 марта 2020 г.	10	6	2,50	1,500	150,00
07 марта 2020 г.	14	4	1,40	0,400	40,00
08 марта 2020 г.	17	3	1,21	0,214	21,43
09 марта 2020 г.	20	3	1,18	0,176	17,65
10 марта 2020 г.	24	4	1,20	0,200	20,00
11 марта 2020 г.	28	4	1,17	0,167	16,67
12 марта 2020 г.	34	6	1,21	0,214	21,43
13 марта 2020 г.	45	11	1,32	0,324	32,35
14 марта 2020 г.	59	14	1,31	0,311	31,11
15 марта 2020 г.	63	4	1,07	0,068	6,78
16 марта 2020 г.	93	30	1,48	0,476	47,62
17 марта 2020 г.	114	21	1,23	0,226	22,58

Окончание табл. 3

	Кол-во заболевших среди населения РФ	Суточный прирост	Темп роста	Темп прироста	Темп прироста, %
18 марта 2020 г.	147	33	1,29	0,289	28,95
19 марта 2020 г.	199	52	1,35	0,354	35,37
20 марта 2020 г.	253	54	1,27	0,271	27,14
21 марта 2020 г.	306	53	1,21	0,209	20,95
22 марта 2020 г.	367	61	1,20	0,199	19,93
23 марта 2020 г.	438	71	1,19	0,193	19,35
24 марта 2020 г.	495	57	1,13	0,130	13,01
25 марта 2020 г.	658	163	1,33	0,329	32,93
26 марта 2020 г.	840	182	1,28	0,277	27,66
27 марта 2020 г.	1036	196	1,23	0,233	23,33
28 марта 2020 г.	1264	228	1,22	0,220	22,01
29 марта 2020 г.	1534	270	1,21	0,214	21,36
30 марта 2020 г.	1836	302	1,20	0,197	19,69
31 марта 2020 г.	2337	501	1,27	0,273	27,29
01 апреля 2020 г.	2514	177	1,08	0,076	7,57
02 апреля 2020 г.	2777	263	1,10	0,105	10,46
03 апреля 2020 г.	3548	771	1,28	0,278	27,76
04 апреля 2020 г.	4149	601	1,17	0,169	16,94
05 апреля 2020 г.	4731	582	1,14	0,140	14,03
06 апреля 2020 г.	5389	658	1,14	0,139	13,91
07 апреля 2020 г.	6343	954	1,18	0,177	17,70
08 апреля 2020 г.	7497	1154	1,18	0,182	18,19
09 апреля 2020 г.	10 131	2634	1,35	0,351	35,13
10 апреля 2020 г.	11 917	1786	1,18	0,176	17,63
11 апреля 2020 г.	13 584	1667	1,14	0,140	13,99
12 апреля 2020 г.	15 770	2186	1,16	0,161	16,09
13 апреля 2020 г.	18 328	2558	1,16	0,162	16,22
14 апреля 2020 г.	21 102	2774	1,15	0,151	15,14
15 апреля 2020 г.	24 490	3388	1,16	0,161	16,06
16 апреля 2020 г.	27 938	3448	1,14	0,141	14,08
17 апреля 2020 г.	32 008	4070	1,15	0,146	14,57
18 апреля 2020 г.	36 793	4785	1,15	0,149	14,95
19 апреля 2020 г.	42 853	6060	1,16	0,165	16,47
20 апреля 2020 г.	47 121	4268	1,10	0,100	9,96
21 апреля 2020 г.	52 763	5642	1,12	0,120	11,97
22 апреля 2020 г.	57 999	5236	1,10	0,099	9,92
23 апреля 2020 г.	62 773	4774	1,08	0,082	8,23
24 апреля 2020 г.	68 622	5849	1,09	0,093	9,32
25 апреля 2020 г.	70 014	1392	1,02	0,020	2,03
26 апреля 2020 г.	74 588	4574	1,07	0,065	6,53
27 апреля 2020 г.	87 147	12559	1,17	0,168	16,84
28 апреля 2020 г.	93 558	6411	1,07	0,074	7,36
29 апреля 2020 г.	99 399	5841	1,06	0,062	6,24
30 апреля 2020 г.	106 498	7099	1,07	0,071	7,14
01 мая 2020 г.	114 431	7933	1,07	0,074	7,45

Источник: [2].

Таблица 3.1

**Абсолютные средние статистические показатели
по скорости динамики распространения COVID-19 по РФ**

Среднее геометрическое по физической динамике процесса	Среднее гармоническое по физической динамике процесса	Среднее значение по динамике процесса
523,3	6,4	44 381,4
Среднее геометрическое значение по темпу прироста	Среднее гармоническое значение по темпу прироста	Среднее значение по темпу прироста
13,08	9,93	12,76
0,131	0,099	0,128
Среднее геометрическое темпа роста	Среднее гармоническое темпа роста	Среднее значение темпа роста
1,117	1,110	1,128

Рис. 7. Графическое представление темпов динамики заражения COVID-19 по РФ

Рис. 8. Темпы прироста (%) распространения заболевания COVID-19 по территории РФ

Для последующего моделирования процесса распространения динамики заражения среди населения страны без учета показателей смертности от COVID-19 необходимо было подобрать из имеющихся математических функционалов именно ту, которая смогла бы оптимально описать данный процесс с учётом уже сложившейся динамики, согласно эмпирическим данным ВОЗ по скорости распространения данного заболевания по территории РФ. Выбор функционала с учетом вида графика (рис. 7) осуществлялся среди таких функций, как кривая:

1) Гомпертца (в силу своей особенности неплохо описывающая различные биологические процессы, в частности связанные с распространением или размножением различных форм вирусов, бактерий и т.д.);

2) логистическая;

3) экспоненциальная;

4) степенная;

5) линейная;

6) полиномиальная;

7) логарифмическая.

Виды данных кривых представлены на следующих графиках (см. рис. 9–14).

Рис. 9. Описание с помощью функционала кривой Гомпертца

Рис. 10. Описание при помощи функции логистической кривой

Рис. 11. Описание при помощи функции экспоненты (экспоненциального сглаживания)

Рис.12. Описание процесса заражения COVID-19 среди населения РФ при помощи степенной функции

Рис. 13. Описание процесса заражения с помощью линейного функционала

Рис. 14. Описание процесса заражения с помощью функции полинома

Рис. 15. Описание процесса заражения при помощи логарифмической функции

При проведении моделирования процесса заражения инфекционно-вирусным заболеванием нового типа COVID-19, учитывается и то, что данный процесс является ветвящимся, и для его описания также применяется нейросетевой граф (рис. 16).

Рис. 16. Общий вид нейросетевого графа для описания ветвящихся процессов

Построения различных кривых приведенных функционалов (в программных пакетах: MathCad 2000 и MS Office Excel 2010) с учетом кривой динамики (построенной по статистическим данным ВОЗ) процесса распространения темпов заболевания COVID-19 по территории РФ показали, что наиболее приемлемыми для описания исследуемого процесса заражения населения являются следующие функционалы:

- экспоненциальный (с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,92$);
- полиномиальный (с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,77$);
- степенной (с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,58$)

Прогнозная оценка спада (затухания) «первой волны» распространения инфекционно-вирусного заболевания COVID-19

Численное моделирование процесса распространения пандемии, проведенное в программных пакетах Statgraphic 3.0 Plus и MS Excel 2010 при использовании эмпирических данных с 1 февраля по 1 мая 2020 г. (87 точек), а также с учетом построения модели ARIMA (авторегрессии и скользящего среднего) с последующей синхронизацией (см. формулу (*)) всех полученных (при помощи данных построенных моделей) численных результатов, показало, что процесс полного затухания (спада) вспышки «первой волны» заболевания Covid-19 завершился бы к 1-й декаде июля 2021 г., но при условии сохранения значения коэффициента изоляции (или дистанцирования) населения (как главного управляющего фактора в построенных моделях) на уровне 72,4% ($K_{изм} = 0,724$). То есть с сохранением режима изоляции (дистанцирования) 72% от общего числа народонаселения России, допуская в тесный контакт друг с другом только 27,6% работающих по следующим специальностям (табл. 4).

Таблица 4

Численность занятых в РФ на начало 2019 г.

Классификация профессий	Количество
Специалисты высшей квалификации в области здравоохранения	1 806 000
Специалисты по информационно-коммуникационным технологиям	904 000
Средний медицинский персонал здравоохранения	2 489 000
Средние специалисты – техники в области ИКТ	195 000
Служащие сферы обслуживания населения	527 000
Продавцы	5 736 000
Работники служб охраны граждан и собственности	2 474 000
Квалифицированные работники сельского и лесного хозяйства	1 806 000
Квалифицированные рабочие промышленности, строительства, транспорта и рабочие родственных занятий	9 717 000
Операторы производственных установок и машин, сборщики и водители	9 145 000
Неквалифицированные рабочие	1 167 000
уборщики	425 000
с/х, лес и рыболовство	1 548 000
сбор мусора	2 555 000
Занятые всего	72 532 000
Численность населения	146 800 000

Источник: [3].

Так называемая формула синхронизации (*) или можно еще назвать её как формулу для корректировки и уточнения расчетных данных, полученных при численном моделировании от различных моделей (в том числе от модели ARIMA для расчета прогнозных оценок) получено автором данной статьи и является авторской разработкой. Полученная автором формула позволила получить более точные (с математической точки зрения) среднесрочные прогнозные оценки, что в дальнейшем подтвердилось при последующем появлении реальных статистических данных от ВОЗ по периоду совершения прогноза (прогнозируемому периоду).

Формула корректировки для получения прогнозных значений вида:

$$\left[\left(F_{ARIMA}^{\sup} - F_{\exp}^* \right) K_{\hat{T}_{\text{пр}}} \right] + F_{ARIMA}^{\sup} \text{ при } F_{ARIMA}^{\sup} > F_{\exp}^*, \quad (*)$$

$$\left[F_{\exp}^* - F_{ARIMA}^{\sup} \right] - \bar{x} \cdot K_{\hat{T}_{\text{пр}}} \text{ при } F_{ARIMA}^{\sup} < F_{\exp}^*,$$

где $K_{\hat{T}_{\text{пр}}}$ – среднегеометрический коэффициент темпа прироста; $K_{\tilde{T}_{\text{пр}}}$ – среднегармонический коэффициент темпа прироста; $F_{ARIMA}^{\sup}$ – верхнее значение интервального прогноза (с вероятностью 95%), полученное с помощью модели ARIMA (см. рис. 17); $F_{\exp}^*$ – значение прогнозной оценки, полученной с помощью экспоненциальной функции; $\bar{x}$ – среднее арифметическое значение динамического ряда.

Рис. 17. Интервальные прогнозные значения, полученные с помощью модели ARIMA (в программном пакете Statgraphic Plus 3.0)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Численные расчеты, проведенные с помощью полученных методов и моделей для определения оценок прогнозных значений процесса затухания (спада) «первой волны» пандемии COVID-19 показали, что процесс распространения (заражения) заболевания по территории РФ пошел бы на естественную убыль при формировании коллективного иммунитета среди населения России к началу первой декады июля

2021 г. (с показателями при ежедневном приросте заболевших не более 10–15 инфицированных за сутки), но при строгом соблюдении режима изоляции и дистанцирования при введении особого режима труда и отдыха среди экономически активной части населения страны (напр., введения 2-х или даже 3-х рабочих смен на местах).

Но поскольку в течение 2-го полугодия 2020 г. был нарушен ряд ограничений населением страны, а также вследствие различных природных мутаций в геноме самого вируса (с появлением новых штаммов), то на сегодняшний день (на конец 2020 – начало 2021 г.) имеем в наличии приход «второй волны» коронавирусной инфекции нового типа COVID-19, что естественным образом нарушает (сдвигает) ранее полученные прогнозные сроки (границы) затухания (спада) процесса распространения заболевания среди населения РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Mortality Statistics 1919 (XIX Annual Report) // Department of Commerce USA. Washington Government Printing Office 1921. p. 611.
Data Base of WHO (World Health Organization. URL: <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/situation-reports>.
Россия в цифрах // Статистический сборник. М.: Росстат, 2020.

Arutyunov A.L.

MATHEMATICAL MODELING AND FORECAST OF THE “FIRST WAVE” OF COVID-19 IN RUSSIA

The article presents the results of a study on mathematical modeling of the spread of a new type of coronavirus disease codenamed (according to the WHO classification) “COVID-19».

Keywords: methods, models, modeling, function, system, forecast, process, statistics, information, COVID, coronavirus, infection, WHO, assessment, wave, attenuation, infection, population.

JEL Classification: C02, C30, C31, C32, C33, C35, C39, C40.