РИСК-ОРИЕНТИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫХ СВЯЗЕЙ ФАКТОРОВ РИСКА ЗАРАЖЕНИЯ МЕДИЦИНСКОГО ПЕРСОНАЛА, УЧАСТВУЮЩЕГО В ОКАЗАНИИ МЕДИЦИНСКОЙ ПОМОЩИ ПАЦИЕНТАМ С НОВОЙ КОРОНАВИРУСНОЙ ИНФЕКЦИЕЙ COVID-19

Е.А.Анненкова¹, О.А.Тихонова¹, А.П.Бирюков¹, Л.И.Баранов¹, И.Г.Дибиргаджиев¹, М.В.Шеянов¹,
О.А.Касимова¹, О.В.Паринов¹

¹ ФГБУ «ГНЦ – Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И.Бурназяна», ФМБА России, Москва, Россия

Резюме. Цель исследования – разработка и применение математической модели оценки рисков заражения медицинского персонала, участвующего в оказании медицинской помощи пациентам с COVID-19 в условиях «красной зоны».

Материалы и методы исследования. На основании анализа информативных признаков и информации об условиях труда в инфекционном отделении Федерального медицинского биофизического центра им. А.И.Бурназяна ФМБА России разработана система поддержки принятия решений, позволяющая дать объективную оценку рисков заражения медицинского персонала при оказании медицинской помощи в условиях «красной зоны».

Результаты исследования и их анализ. Проанализировано влияние различных факторов риска заражения медицинского персонала, участвующего в оказании медицинской помощи пациентам с новой коронавирусной инфекцией COVID-19; определены самые значимые факторы риска.

Ключевые слова: доза-эффект, «красная зона», математическая модель оценки рисков заражения, медицинский персонал, новая коронавирусная инфекция COVID-19, пациенты

Конфликт интересов. Авторы статьи подтверждают отсутствие конфликта интересов

Для цитирования: Анненкова Е.А., Тихонова О.А., Бирюков А.П., Баранов Л.И., Дибиргаджиев И.Г., Шеянов М.В., Касимова О.А., Паринов О.В. Риск-ориентированная модель причинно-следственных связей факторов риска заражения медицинского персонала, участвующего в оказании медицинской помощи пациентам с новой коронавирусной инфекцией COVID-19 // Медицина катастроф. 2021. №3. С. 65-68. <https://doi.org/10.33266/2070-1004-2021-3-65-68>

A RISK-BASED CAUSAL MODEL OF RISK FACTORS FOR INFECTION AMONG MEDICAL PERSONNEL INVOLVED IN THE CARE OF PATIENTS WITH THE NEW COVID-19 CORONAVIRUS INFECTION

E.A.Annenkova¹, O.A.Tikhonova¹, A.P.Biryukov¹, L.I.Baranov¹, I.G.Dibirgadzhev¹, M.V.Sheyarov¹,
O.A.Kasymova¹, O.V.Parinov¹

¹ State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency, Moscow, Russian Federation

Abstract. The aim of the study is to develop and apply a mathematical model for assessing the risks of contamination of medical personnel involved in providing medical care to patients with COVID-19 in a "red zone" environment.

Materials and methods. Based on the analysis of informative signs and information on working conditions in the infectious disease department of the A.I. Burnazyan Federal Medical Biophysical Center of the Federal Medical and Biological Agency of Russia, a decision-making support system was developed to provide an objective assessment of the risks of infection for medical personnel when providing medical care in the "red zone".

Results of the study and their analysis. The influence of various risk factors for infection of medical personnel involved in the provision of medical care to patients with new coronavirus infection COVID-19 was analyzed; the most significant risk factors were identified.

Key words: dose-effect, mathematical model of infection risk assessment, medical personnel, new coronavirus infection COVID-19, patients, red zone

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest

For citation: Annenkova E.A., Tikhonova O.A., Biryukov A.P., Baranov L.I., Dibirgadzhev I.G., Sheyarov M.V., Kasymova O.A., Parinov O.V. Risk-Based Causal Model of Risk Factors for Infection among Medical Personnel Involved in the Care Of Patients with the New COVID-19 Coronavirus Infection. *Meditsina katastrof* = Disaster Medicine. 2021;3:65-68 (In Russ.). <https://doi.org/10.33266/2070-1004-2021-3-65-68>

Контактная информация:

Анненкова Елена Александровна – кандидат физико-математических наук; старший научный сотрудник
Адрес: Россия, 123098, Москва, ул. Живописная, д. 46
Тел.: +7(499)190-94-35
E-mail: a-a-annenkova@yandex.ru

Contact information:

Elena A. Annenkova – Cand. Sci. (Phys.-Math.); Senior Research
Address: 46, Zhyvopisnaya str., Moscow, 123098, Russia
Phone: +7(499)190-94-35
E-mail: a-a-annenkova@yandex.ru

Введение

Чрезвычайные ситуации (ЧС) в том числе эпидемии, оказывают большое влияние на системы здравоохранения, выявляя глубокие структурные и функциональные проблемы в организации оказания медицинской помощи больным и пострадавшим. Пандемия COVID-19 иллюстрирует это на глобальном уровне. Особое внимание в этой ситуации следует уделять социально-профессиональной группе медицинских специалистов, от квалифицированных и слаженных действий которых в первую очередь зависит общественное здоровье и здоровье отдельного человека [1]. Риск профессионального заражения приводит к нарушению бесперебойной работы медицинских служб, поскольку необходимо устанавливать обязательный карантин для инфицированных специалистов и отстранять их от работы. Кроме того, существует проблема замены заболевших на рабочем месте. В настоящее время в связи с пандемией COVID-19 становится актуальным прогнозирование заболеваемости медицинских работников на основе данных о других вирусах из группы коронавирусов.

Цель исследования – разработка и применение математической модели оценки рисков заражения медицинского персонала, участвующего в оказании медицинской помощи пациентам с COVID-19 в условиях «красной зоны».

Материалы и методы исследования. С целью математического моделирования риска инфицирования медицинского персонала в «красной зоне» были проанализированы факторы, оказывавшие влияние на работу с больными COVID-19. Основой формирования пространства информативных признаков для математической модели послужили данные об условиях труда в инфекционном отделении ГНЦ – Федерального медицинского биофизического центра им. А.И.Бурназяна ФМБА России (далее – ФМБЦ им. А.И.Бурназяна), где для оказания помощи больным, инфицированным SARS-CoV-2, были привлечены 223 чел. (медицинские работники, водители, дезинфекторы, повара, рабочие и т.д.), в том числе 166 чел. (медперсонал) работали в условиях повышенного риска профессионального заражения. В группу медперсонала вошли 48 мужчин и 118 женщин в возрасте от 18 до 69 лет, средний возраст – $(48,7 \pm 1,8)$ лет, из них 57 – врачи различного профиля; 109 – медицинские сестры и санитарки. Никто из участников исследования ранее не работал в условиях инфекционного отделения и не обладал специальными знаниями по вирусологии. Перед началом работы в «красной зоне» все сотрудники в сжатые сроки по однотипной программе прошли обучение использованию средств индивидуальной защиты (СИЗ), были проинформированы о путях передачи и клинических проявлениях вируса. У всех лиц данной группы результат полимеразной цепной реакции (ПЦР) на SARS-CoV-2 мазка из ротоглотки на момент начала работы в инфекционном отделении был отрицательным.

Разработка риск-ориентированной модели причинно-следственных связей факторов риска заражения медперсонала, участвующего в оказании медицинской помощи пациентам с новой коронавирусной инфекцией COVID-19, проводилась с целью составления плана реагирования на риск заражения медицинского персонала, при этом был использован метод количественной оценки инфекционного риска. Чувствительность параметров модели оценивалась, чтобы определить, какие дополнительные данные или знания могут потенциально снизить неопределенность и улучшить наше понимание исследуемых рисков.

После идентификации возможных рисков инфицирования медицинского персонала вирусом COVID-19 было обнаружено, что наибольшую степень воздействия на вероятность реализации рисков оказывают: концентрация вируса в слюне; концентрация в воздухе вирусных частиц, выделенных в окружающее пространство при одном кашле больного, и количество кашлей в час; кратность воздухообмена; количество посещений палаты медицинским работником за 1 ч; число пациентов, с которым контактировал медицинский работник за одно посещение палаты; время, затраченное на каждое посещение и количество рабочих часов в сутки (табл. 1).

При построении математической модели были использованы нормативы ГОСТ Р ИСО 7708-2006 («Качество воздуха»).

Было также учтено рабочее пространство больничных помещений. Большинство палат были рассчитаны на 4 пациентов. Объем помещения на 4 пациентов составлял 70 м^3 . Пациенты с симптомами считались единственным источником инфекции в помещении, при этом исходили из того, что COVID-19 передается главным образом через аэрозоли.

Вирусный выброс в помещение рассчитывали по формуле:

$$V_i = \frac{\pi d_i^2}{6} \times 10^{-12}, \quad (1)$$

где V_i – объем для каждого распределения капель по размерам, которые выбрасываются в помещение во время каждого случая кашля; d_i – диаметр капли – в предположении её сферической формы [2].

Скорость вентиляционного потока q_{vent} определялась количеством воздухообменов в час (ACH) на объем помещения, т.е. по кратности воздухообмена, осуществляемого в помещении «красной зоны» по нормам для палат инфекционных больных:

$$q_{vent} = V \times ACH \quad (2)$$

Суточная доза воздействия в PFU (бляшкообразующие единицы) для медицинского персонала во время посещения палаты с пациентами с новой коронавирусной инфекцией COVID-19 рассчитывалась по следующей формуле:

$$D = C_{CoV} \times C_{saliva} \times N_{cough} \times \frac{1}{q_{vent}} \times V_{inhaled} \times N_{room} \times N_{pat} \times t_{spent} \times t_{work} \quad (3)$$

где C_{CoV} – концентрация инфекции в слюне, среднее значение и распределение которой рассчитывалось на основе исследований в работе [3]; C_{saliva} – концентрация частиц в воздухе после одного кашля, которая рассчитывалась на основе модели переноса частиц [2]; N_{cough} – количество кашлей в час, диапазон значений которого вычислялся на основе модели вытеснения частиц из дыхательных путей [4]; $V_{inhaled}$ – скорость забора воздуха человеком, подвергшимся воздействию, равная частоте дыхания человека $0,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ [5]; N_{room} – количество посещений палаты медицинским работником в 1 ч; N_{pat} – число пациентов, которых посетил медицинский работник за одно посещение палаты; t_{spent} – время, затраченное на каждый визит; t_{work} – количество рабочих часов в сутки – $N_{room}, N_{pat}, t_{spent}, t_{work}$ варьировались в зависимости от должностных функций медработников. Например, медсестры в среднем обходили 6 палат за 1 ч, находясь в каждой палате по 10 мин. Их рабочий день составлял 8 ч. Формула для определения суточной дозы воздействия (3) при ношении маски дополняется множителем

$$p_{mask} = \frac{C_{saliva_{in}}}{C_{saliva}}$$

где P_{mask} – проникновение частиц через маску,
 $C_{saliva\ in}$ – концентрация частиц, прошедших через маску. В «красной зоне» инфекционного отделения ФМБЦ им. А.И.Бурназяна использовались респираторы со степенью защиты FFP3, эффективность фильтрации которых составляет 99%, т.е. $P_{mask} \approx 1$ [6]. Однако если маска не была заменена раньше, чем была утрачена ее эффективность (до 4 ч), то нужно учесть, что коэффициент проникновения частиц через маску становится 100%-ным на всё время ношения данной маски с момента утраты эффективности.

Рекомендуемая модель доза–эффект следует экспоненциальной зависимости доза–эффект:

$$P_{inf} = 1 - e^{-kD} \quad (4)$$

где P_{inf} – вероятность (риск) заражения; k – оптимизированный параметр функции доза–эффект, PFU^{-1} .

Кумулятивный риск заболеваемости в течение нескольких дней воздействия был смоделирован следующим образом:

$$P_M = 1 - (1 - P_{inf})^n \quad (5)$$

где P_M – вероятность заболеваемости; n – количество дней воздействий с P_{inf} вероятностью заражения от ежедневного воздействия [7].

Результаты исследования и их анализ. Всего за период работы инфекционного отделения были зафиксированы 26 случаев (15,6%) острого профессионального заболевания COVID-19, подтвержденных тестом ПЦР или серологическим тестом. В группу заболевших при исполнении служебных обязанностей входили 10 медицинских сестер, в том числе работавших в отделении анестезиологии, 9 санитарок и 3 уборщицы помещений (все – женщины). Врачи в меньшей степени подвергались профессиональному заражению – 4 заболевших (двое мужчин, две женщины). Средний возраст всех заболевших – $(39,63 \pm 1,2)$ лет.

Все случаи были локально приобретенными в период с 8-го по 21-й день с момента открытия инфекционного отделения – в период освоения новых навыков и приобретения опыта работы с данным видом инфекции, поскольку опыт работы сотрудников в новых условиях был недостаточным.

Эмпирическое значение вероятности заражения персонала в «красной зоне» инфекционного отделения ФМБЦ им. А.И.Бурназяна в течение одного рабочего дня при вышеприведенных клинических данных составляет $P_{inf} \approx 0,0111876$. Объективные условия работы персонала в «красной зоне», при которых такая вероятность заболевания стала реальностью, отражены в вычисленном по формуле (3) значении параметра D . На основе вычисленных значений P_{inf} и D получим эмпирическую оценку значения параметра k по формуле:

$$k = - \frac{\ln(1 - P_{inf}^*)}{D} \quad (6)$$

Получено значение $k = 13,8238987774$. Таким образом, зная оптимизированный параметр функции доза–эффект k и применяя формулу (5), мы можем оценивать риски заражения медицинского персонала, участвующего в оказании медицинской помощи пациентам с новой коронавирусной инфекцией COVID-19, с учетом условий их труда – размеров и проветриваемости помещений, числа пациентов в палате, режима посещений палат, длительности рабочего дня и обеспечения средствами индивидуальной защиты (табл. 2). При сравнительном анализе рисков заражения в разных условиях было вы-

Таблица 1/ Table No. 1

Параметры модели Model parameters

1	D	Суточная доза воздействия в PFU (бляшкообразующие единицы) для медсестер и других медицинских работников /Daily exposure dose in PFU (plaque units) for nurses and health care workers
2	C_{CoV}	Концентрация инфекции в слюне, PFU/мл Infection concentration in saliva, PFU/ml
3	C_{saliva}	Концентрация частиц в воздухе после одного кашля, $1/m^3$ / Concentration of particles in the air after one cough, $1/m^3$
4	N_{cough}	Количество кашлей в 1 ч / Number of coughs in 1 h
5	q_{vent}	Расход вентиляционного воздуха в помещении, $m^3/ч$ / Ventilation air flow rate in the room, m^3/h
6	$V_{inhaled}$	Скорость забора воздуха человеком, подвергшимся воздействию, $m^3/ч$ Rate of air intake by an exposed person, m^3/h
7	N_{room}	Количество посещений палаты медсестрой или другим медицинским работником в 1 ч Number of visits to the room by a nurse or a health care worker in 1 hour
8	N_{pat}	Число пациентов, с которыми контактировала(л) медсестра или другой медицинский работник за одно посещение палаты Number of patients visited by a nurse or a health care worker per room visit
9	t_{spent}	Время, затраченное на каждое посещение, ч Time spent on each visit, h
10	t_{work}	Количество рабочих часов в сутки Number of working hours per day
11	P_{inf}	Вероятность (риск) заражения персонала в течение одного рабочего дня /Probability (risk) of infection of personnel within one working day
12	k	Оптимизированный параметр функции доза–эффект, PFU^{-1} Optimized dose-effect function parameter, PFU^{-1}
13	P_m	Кумулятивная вероятность заражения в течение n рабочих дней /Cumulative probability of infection within n working days
14	n	Количество дней воздействий с P_m вероятностью заражения от ежедневного воздействия Number of days of exposure with P_m probability of infection from daily exposure

явлено, что наибольшее влияние на повышение риска имеет отсутствие СИЗ или их несвоевременная замена – при данных обстоятельствах риск увеличивается в 17 раз.

Практическая значимость исследования определяется его направленностью на совершенствование организационных основ гигиенической оценки условий труда, что позволит идентифицировать вредные производственные воздействия новой коронавирусной инфекции COVID-19 и разработать мероприятия по их устранению. Практический интерес представляют внесенные предложения по сохранению и улучшению здоровья медицинских работников, повышению их информированности о факторах риска для здоровья в условиях «ковидного госпиталя».

Разработанные рекомендации по использованию алгоритма оценки риска заболевания медперсонала при наличии в рабочей среде инфекционных агентов с воздушно-капельным механизмом передачи направлены на снижение риска для здоровья в данной профессиональной группе и могут быть использованы в практической деятельности врачей-гигиенистов, госпитальных эпидемиологов, организаторов здравоохранения, инженеров по охране труда лечебных медицинских организаций (ЛМО).

Заключение

Данная работа проводилась в условиях постоянно меняющихся исходных данных, что связано как с новизной исследуемой проблемы и, соответственно, с постоянно

Таблица 2 / Table No. 2
**Прогнозируемые значения заболеваемости медперсонала
 в «красной зоне» инфекционного отделения
 ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России**
 Predicted values for staff morbidity in the "red zone"
 of the infectious diseases department of the A.I. Burnazyan
 Federal Medical and Biological Center of the Federal Medical
 and Biological Agency of Russia

День (сутки) Day (24 hours)	Значение риска – кумулятивный риск заражения в течение нескольких дней, Pm Risk value – cumulative risk of infection over several days, Pm	Общее число сотрудников, чел. Total number of employees, people	Прогноз доли заболевших от общего числа сотрудников, % Forecast of the share of sick people in the total number of employees, %
1-й / 1st	0,0111876000	166	1,9
2-й / 2nd	0,0222500376	166	3,7
3-й / 3rd	0,0331887131	166	5,5
4-й / 4th	0,0440050111	166	7,3
5-й / 5th	0,0547003006	166	9,1
6-й / 6th	0,0652759355	166	10,8
7-й / 7th	0,0757332545	166	12,6
8-й / 8th	0,0860735811	166	14,3
9-й / 9th	0,0962982243	166	16,0
10-й / 10th	0,1064084783	166	17,7
11-й / 11th	0,1164056228	166	19,3
12-й / 12th	0,1262909233	166	21,0
13-й / 13th	0,1360656310	166	22,6
14-й / 14th	0,1457309831	166	24,2

увеличивающимся количеством наблюдений, так и с большим количеством исследований по данной тематике, что, в свою очередь, приводит к постоянно уточняемым

выводам. В такой ситуации была выбрана риск-ориентированная модель, которая соответствует мировым тенденциям [8-11].

Проведенные нами исследования еще раз подтвердили, что для снижения рисков инфицирования медицинского персонала новой коронавирусной инфекцией COVID-19 в ЛМО необходимо проводить разъяснительную работу с персоналом о строгом соблюдении всех мер безопасности при работе с инфекционными больными. Для повышения информированности медицинских работников необходимо включать в программы отраслевых и городских медицинских конференций доклады об основных факторах риска для здоровья с учетом региональных особенностей заболеваемости коронавирусной инфекцией COVID-19.

В целом теоретическая значимость выполненной работы заключается в том, что получена и апробирована математическая модель оценки рисков заражения медицинского персонала в конкретных условиях работы с инфекционными больными на основе количественной оценки ключевых факторов, от которых зависит «эффективность» передачи инфекционного агента от человека к человеку. Установленные взаимосвязи между возможностью инфицирования медицинских работников и факторами, обусловленными профессиональной деятельностью, являются предметом для дальнейших исследований и могут быть использованы при разработке комплексных программ по охране здоровья медицинского персонала, задействованного в оказании медицинской помощи больным новой коронавирусной инфекцией COVID-19.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Black J.R.M., Bailey C., Przewrocka J., et al. COVID-19: the Case for Health-Care Worker Screening to Prevent Hospital Transmission. *Lancet*. 2020;395:1418-1420.
2. Stilianakis N.I., Drossinos Y. Dynamics of Infectious Disease Transmission by Inhalable Respiratory Droplets. *J R Soc Interface*. 2010;7(50):1355-1366.
3. Liu Y., Ning Z., Chen Y., Guo M., Liu Y., Gali N. K., Sun L., Duan Y., Cai J., Westerdahl D., Liu X., Ho K., Kan H., Fu Q., Lan K. Aerodynamic Characteristics and RNA Concentration of SARS-CoV-2 Aerosol in Wuhan Hospitals during COVID-19 Outbreak. *BioRxiv* 2020.03.08.982637.
4. Loudon R., Brown L. Droplet Expulsion from the Respiratory Tract. *Am Rev Respir Dis*. 1967;95(3):435-442.
5. U.S. EPA. Exposure Factors Handbook 2011 Edition (Final Report). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-09/052F, 2011.
6. Ferioli M., Cisternino C., Leo V., Pisani L., Palange P., Nava S. Protecting Health-care Workers from SARS-CoV-2 Infection: Practical Indications. *European Respiratory Review*. 2020;29(155):200068.
7. Haas C., Rose J., Gerba C. Quantitative Microbial Risk Assessment. 2nd Edition. Wiley-Blackwell, 2014.
8. Liu Y., Wang Z., Ren J., et al. COVID-19 Risk Assessment Decision Support System for General Practitioners: Design and Development Study. *J Med Internet Res*. 2020;22(6):e19786.
9. Güler M.G., Geçici E. A Decision Support System for Scheduling the Shifts of Physicians During COVID-19 Pandemic. *Comput Ind Eng*. 2020;150:106874.
10. Krausz M., Westenberg J.N., Vigo D., Spence R.T., Ramsey D. Emergency Response to COVID-19 in Canada: Platform Development and Implementation for eHealth in Crisis Management. *JMIR Public Health Surveill*. 2020;6(2):e18995.
11. Adhikari U., Chabrelie A., Weir M., Boehnke K., McKenzie E., Ikner L., Wang M., Wang Q., Young K., Haas C.N., Rose J., Mitchell J. A Case Study Evaluating the Risk of Infection from Middle Eastern Respiratory Syndrome Coronavirus (MERS-CoV) in a Hospital Setting through Bioaerosols. *Risk Anal*. 2019;39(12):2608-2624.

Материал поступил в редакцию 26.03.21; статья принята после рецензирования 12.07.21; статья принята к публикации 10.09.21
 The material was received 26.03.21; the article after peer review procedure 12.07.21; the Editorial Board accepted the article for publication 10.09.21