

Научная статья

К ОЦЕНКЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЗАБОЛЕВАЕМОСТИ НАСЕЛЕНИЯ COVID-19 В УСЛОВИЯХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА: МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ И НЕКОТОРЫЕ ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Н.В. Зайцева¹, И.В. Май¹, Ж. Рейс², П. Спенсер³, Д.А. Кирьянов¹, М.Р. Камалтдинов¹

¹Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения, Россия, 614045, г. Пермь, ул. Монастырская, 82

²Университет Страсбурга, Медицинская школа, Франция, 67205, г. Страсбург

³Орегонский университет здоровья и науки, США, Орегон, 97201, г. Портланд

Актуальность исследования определена значительными медико-демографическими потерями в период пандемии COVID-19 во всем мире и появлением исследований, доказывающих связь загрязнения с распространенностью заболевания, тяжестью его течения и исходов.

Получена количественная оценка влияния загрязнения атмосферного воздуха на процесс распространения SARS-CoV-2 среди населения шести городов Российской Федерации, приоритетных по уровням загрязнения воздуха и включенных в федеральный проект «Чистый воздух» (Братск, Красноярск, Норильск, Омск, Череповец, Липецк). При этом гипотеза исследования состояла в том, что в условиях загрязнения среды обитания динамические характеристики распространения инфекции отличаются от ожидаемой базовой модели эпидемиологического процесса. Выполнен корреляционно-регрессионный анализ зависимостей между относительным суточным отклонением фактической заболеваемости от базового эпидемиологического сценария и среднесуточными концентрациями веществ в атмосферном воздухе. Исходная информация – результаты инструментальных измерений качества воздуха в городах (порядка 10,8 тысячи измерений 29 химических веществ) и посуточная заболеваемость COVID-19 в период с 18.04.2020 г. по 31.07.2021 г. (77 337 случаев заболеваний).

Во всех шести исследованных городах выявлена достоверная связь заболеваемости COVID-19 с концентрациями химических веществ в атмосферном воздухе. Вклад загрязнения в рост распространенности COVID-19 в пяти городах (Братск, Красноярск, Норильск, Омск, Череповец, Липецк) составил за изученный период $5,0 \pm 2,6$ %. В г. Братске эта величина была порядка 33 %, что требует дополнительных исследований для подтверждения или корректировки полученных результатов. Рост заболеваемости COVID-19 на территориях ассоциирован со взвешенными частицами (PM_{10} , $PM_{2.5}$) и целым рядом химических веществ, обладающих раздражающим действием и также прямо или косвенно воздействующих на функции органов дыхания (пары серной кислоты, хлористый водород, формальдегид, сероводород и пр.). Для ряда приоритетных веществ обоснованы целевые уровни, достижение которых могло бы обеспечить отсутствие роста распространения COVID-19 в исследованных городах более чем на 1–3 %.

Показана актуальность продолжения изучения уровней заболеваемости и смертности населения от COVID-19, в том числе в сочетании с углубленными медико-биологическими исследованиями эффективности вакцинации и устойчивости поствакцинального иммунитета на территориях с повышенным уровнем загрязнения среды обитания.

Ключевые слова: COVID-19, загрязнение атмосферного воздуха, химические вещества, целевые уровни.

© Зайцева Н.В., Май И.В., Рейс Ж., Спенсер П., Кирьянов Д.А., Камалтдинов М.Р., 2021

Зайцева Нина Владимировна – академик РАН, доктор медицинских наук, профессор, научный руководитель (e-mail: znv@fcrisk.ru; тел.: 8 (342) 237-25-34; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2356-1145>).

Май Ирина Владиславовна – доктор биологических наук, профессор, заместитель директора по научной работе (e-mail: may@fcrisk.ru; тел.: 8 (342) 237-25-47; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0976-7016>).

Рейс Жак – доцент, доктор наук (e-mail: jacques.reis@wanadoo.fr; тел.: +333-68-85-00-00; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1216-4662>).

Спенсер Питер – профессор (e-mail: spencer@ohsu.edu; тел.: +1 503-494-1085; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3994-2639>).

Кирьянов Дмитрий Александрович – кандидат технических наук, заведующий отделом математического моделирования систем и процессов; доцент кафедры экологии человека и безопасности жизнедеятельности (e-mail: kda@fcrisk.ru; тел.: 8 (342) 237-18-04; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5406-4961>).

Камалтдинов Марат Решидович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник с исполнением обязанностей заведующего лабораторией ситуационного моделирования и экспертно-аналитических методов управления (e-mail: kmr@fcrisk.ru; тел.: 8 (342) 237-18-04; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0969-9252>).

Пандемия COVID-19 нанесла столь серьезный ущерб жизни населения всего мира, экономике и финансам практически всех государств, что изучение причин возникновения и распространения заболевания, его тяжести и модификаций течения стало в 2020–2021 гг. одним из наиболее актуальных направлений научных исследований.

Интеграция многолетних эпидемиологических и экспериментальных данных позволила изначально предполагать негативное влияние загрязнения среды обитания населения на процессы распространения и исходы COVID-19. Целый ряд научных исследований прошлых лет по респираторным вирусам подтверждает, что загрязнение воздуха может играть важную роль в повышении уровня инфекционной заболеваемости и смертности [1–5].

Одной из областей научных интересов явилась оценка особенностей распространения вируса SARS-CoV-2 в условиях загрязнения атмосферного воздуха. Некоторые исследования, проведенные в период первой волны COVID-19, описывают выявленные прямые достоверные связи между содержанием в воздухе пылевых частиц, в том числе PM_{10} , $PM_{2.5}$, оксидов азота, озона, других загрязняющих примесей и уровнем заболеваемости и смертности от COVID-19 [6–10]. В опубликованных работах высказываются предположения о том, что загрязнители воздуха, прежде всего мелкодисперсные пыли, могут увеличивать передачу коронавируса, собирая его на поверхности частиц [11–13].

По данным ВОЗ аэрозольные частицы всех размеров с вирусом могут оседать непосредственно на слизистых оболочках дыхательных путей (прямой контакт) или на поверхности, образуя фомиты – контаминированные вирусом объекты, где вирус может сохраняться некоторое время, а затем уже попадает на слизистые оболочки (непрямой контакт) [14]. На поверхностях жизнеспособный вирус SARS-CoV-2 обнаруживается от нескольких часов до нескольких дней в зависимости от условий среды [15]. Как следствие, присутствие в воздухе (как дисперсной среде) твердых или капельно жидких элементов (как дисперсной фазы) увеличивает потенциал распространения вируса.

Предположения подтверждаются эпидемиологическими исследованиями. Так, в работе Xiao Wu et al. [16], основанной на результатах анализа медико-демографической статистики более чем трех тысяч муниципальных образований США, установлено, что увеличение в воздухе содержания мелкодисперсной пыли $PM_{2.5}$ на 1 мг/м^3 связано с увеличением на 8 % показателя смертности от COVID-19 (95%-ный доверительный интервал 2–15 %). При этом выдвигается предположение, что фактором риска может являться как кратковременное (острое), так и длительное (хроническое) воздействие загрязнения.

Setti et al. [17] выявили достоверную связь между географическим распределением суточных пре-

вышений уровней PM_{10} и первоначальным распространением COVID-19 в 110 провинциях Италии.

Совместное исследование китайских и британских ученых, выполненное на основе экологических и медицинских данных 120 городов Китайской народной республики (порядка 58 тысяч случаев заболеваний COVID-19), позволило получить достоверные многофакторные математические модели, описывающие положительные связи между усредненными за две недели концентрациями мелкодисперсных пылей ($PM_{2.5}$; PM_{10}), диоксида азота и озона в воздухе и ежедневным количеством подтвержденных случаев COVID-19 [18]. Авторы подчеркивают, что достоверные связи выявлены в условиях комбинированного воздействия и обращают внимание на актуальность мер по снижению уровня загрязнения воздуха как средства минимизации частоты заболеваний.

Также существуют данные, что загрязнение воздуха может не только способствовать распространению вируса, но и напрямую влиять на способность легких выводить патогены, а также снижать общий иммунитет организма, обострять сердечно-сосудистые или легочные заболевания [19–22].

В работе Bourdrel et al. [23] показано, что загрязнение воздуха может быть связано с увеличением серьезности и летальности COVID-19 за счет воздействия на хронические заболевания, такие как сердечно-легочные заболевания и диабет. Подчеркивается, что воздействие загрязненного воздуха приводит к снижению иммунного ответа, тем самым облегчаются проникновение вирусов в организм и их репликация. Кроме того, вирусы могут сохраняться в воздухе в результате сложных взаимодействий с твердыми частицами и газами. Это взаимодействие может модифицироваться в зависимости от химического состава воздуха, электрического заряда частиц, метеорологических параметров, таких как относительная влажность, ультрафиолетовое излучение и температура.

В масштабном исследовании, которое охватывало более 27,6 тысячи пациентов с COVID-19, показано, что самая высокая смертность была зарегистрирована у тех из них, кто страдал до заболевания вирусной инфекцией сердечно-сосудистыми болезнями, имели иммунные и метаболические нарушения, респираторные, цереброваскулярные заболевания и рак [24].

Описанные данные корреспондируются и с результатами немецких исследователей [25]. Подчеркивая единообразие эпидемического процесса, авторы указывают на существенные различия в распространенности COVID-19 в европейских странах со схожими и эффективными системами здравоохранения и близким по структуре населением. В качестве возможных причин более высоких уровней заболеваемости в ряде стран рассматривается длительное внешнесредовое воздействие на здоровье населения в периоды, предшествовавшие эпидемии. В качестве факторов риска подавления иммунной функции,

приводящей к повышенной восприимчивости к вирусам, указываются хлорирование питьевой воды, загрязнение среды обитания пестицидами, стойкими органическими загрязнителями и т.п.

Результаты пространственного анализа случаев смерти от COVID-19 в 66 административных регионов Италии, Испании, Франции и Германии, приведенные Y. Ogen, свидетельствуют, что из 4443 смертельных случаев 3487 (78 %) произошли в пяти регионах, расположенных в Северной Италии и центральной Испании. Существенно, что в тех же пяти регионах наблюдаются самые высокие концентрации NO₂ в сочетании с орографическими особенностями местности, при которых эффективное рассеивание загрязняющих веществ осложнено [26]. Авторы предполагают, что длительное воздействие диоксида азота может быть важным фактором смертности, вызванной вирусом SARS-CoV-2 в этих регионах.

Таким образом, неудовлетворительное качество среды обитания (прежде всего – атмосферного воздуха) как напрямую, так и опосредованно может влиять на распространенность COVID-19 и смертность от этого заболевания.

Накопленные и описанные данные не могут не волновать российских специалистов в области гигиены окружающей среды. Качество воздуха во многих крупных городах страны характеризуется превышением гигиенических нормативов именно по тем примесям, которые описываются как факторы, повышающие риски распространения COVID-19: пыли, особенно наиболее мелкие фракции PM₁₀, PM_{2,5}, диоксид азота, озон и т.п. [27–29].

Особенно остро стоит проблема в городах с высоким уровнем загрязнения атмосферы, в том числе включенных в федеральный проект «Чистый воздух», – таких как Красноярск, Братск, Череповец, Норильске и пр. [29–33]. Именно в городах Сибирского федерального округа РФ основным энергетическим сырьем является уголь, а специфика климатических и метеорологических факторов затрудняет рассеивание выбросов объектов энергетики, промышленности, транспорта и частных автономных источников теплоснабжения, способствуя накоплению загрязняющих веществ, в приземном слое атмосферы (то есть области дыхания человека).

Вместе с тем в Российской Федерации исследования по оценке связи качества среды обитания и уровней заболеваемости и смертности от COVID-19 находятся в стадии постановки¹.

Актуальность задачи количественных оценок связи заболеваемости и смертности от COVID-19

с параметрами среды обитания определяются несколькими аспектами. Во-первых, они должны сформировать доказательную базу, в том числе с учетом экономических выкладок, которая смогла бы продемонстрировать хозяйствующим субъектам – основным источникам загрязнения атмосферного воздуха – важность минимизации выбросов в атмосферу и снижения уровня загрязнения среды обитания человека. Это тем более важно для хозяйствующих субъектов, бизнеса, что заболеваемость COVID-19 явилась существенной причиной потери дней трудоспособности у работающих граждан. На рис.1 видно, что по социальному статусу в структуре заболевших COVID-19 преобладали работающие (40,4 %), среди которых на долю рабочих приходилось порядка 27,8 %, медицинских работников – 9,8 %; служащих – 7,7 %; работников образовательных организаций – 2,8 %.



Рис. 1. Структура заболевших COVID-19 в России по роду занятий или социальному статусу (2020), %²

Выявление и параметризация связей в системе «загрязнение воздуха – рост заболеваемости населения» позволяет более четко определять территориальные приоритеты для организации и проведения медико-профилактических мероприятий на текущий момент и перспективу.

Цель настоящего исследования – получение количественной оценки влияния загрязнения атмосферного воздуха на процесс распространения SARS-CoV-2 среди населения, проживающего в неблагоприятных санитарно-гигиенических условиях.

¹ Влияет ли загрязнение воздуха на смертность от новой коронавирусной инфекции? [Электронный ресурс] // ФБУЗ «Центр гигиенического образования населения» Роспотребнадзора. – URL: <http://cgon.rospotrebnadzor.ru/content/62/4262/> (дата обращения: 18.08.2021).

² О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2020 году: Государственный доклад [Электронный ресурс]. – М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2021. – 256 с. – URL: https://www.rospotrebnadzor.ru/upload/iblock/5fa/gd-seb_02.06-srodpisyu_.pdf (дата обращения: 07.09.2021).

Материалы и методы. Количественная оценка заболеваемости SARS-CoV-2 проводилась на основе анализа причинно-следственных связей между суточным приростом числа заболевших и показателями загрязнения атмосферного воздуха по данным шести городов, входящих в программу федерального проекта «Чистый воздух», – Братск, Красноярск, Норильск, Омск, Череповец, Липецк.

Исходной информацией о качестве атмосферного воздуха являлись результаты ежедневных инструментальных измерений концентраций химических веществ в атмосферном воздухе городов. Измерения выполнялись в рамках социально-гигиенического мониторинга аккредитованными лабораториями центров гигиены и эпидемиологии в Иркутской области (г. Братск), Красноярском крае (г. Красноярск и Норильск), Омской области (г. Омск), Вологодской (г. Череповец) и Липецкой (г. Липецк) областях. Все посты наблюдения располагались в жилой застройке. Отбор проб осуществлялся по полной программе (четыре раза в сутки). Применялись сопоставимые, аттестованные методики отборов проб и измерений.

Принимали во внимание все твердые вещества и те примеси, которые по данным релевантной научной литературы могут оказывать негативное влияние на функции органов дыхания и / или иммунную систему. В целом в анализ включали результаты 10,8 тысячи инструментальных измерений 29 химических веществ (PM₁₀, PM_{2.5} недифференцированного состава, мелкодисперсные частицы известного химического состава (оксиды алюминия, никеля, меди, хрома, плохорастворимые фториды) сажа, бенз(а)пирен, азота диоксид, серы диоксид, хлористый водород, серная кислота, ароматические углеводороды (бензол, толуол, ксилолы) и т.п.).

Численность населения городов брались из данных государственной статистики от 01.01.2021 г.³. В шести городах – объектах исследования – проживает на текущий момент порядка 3,46 млн человек.

Посуточную заболеваемость коронавирусной инфекцией COVID-19 в абсолютных случаях с 18.04.2020 г. по 31.07.2021 г. принимали в соответствии с ежедневными данными оперативных штабов в регионах (всего учтено 77 337 случаев заболеваний).

Первичный анализ собранной информации выявил ряд неопределенностей в исходных данных, оказывающих существенное влияние на результаты расчетов и требующие их устранения. На этапе предварительной подготовки исходных данных выполнены:

- расчеты среднесуточных концентраций загрязняющих веществ в исследуемых городах путем осреднения данных всех замеров за сутки.
- заполнение пропусков в исходных данных за счет осреднения значений среднесуточных концен-

траций в диапазоне времени ± 15 дней от рассматриваемой даты (при наличии пяти рассчитанных среднесуточных концентраций и более);

- расчет относительной заболеваемости населения за сутки – как отношение абсолютного числа зарегистрированных случаев к численности населения;
- анализ недельного осреднения заболеваемости (для устранения «эффекта выходных дней», обусловленного особенностями оказания медицинской помощи и системы учета случаев обращения населения в медицинские организации) по формуле (1)

$$\tilde{y}_t^7 = \frac{1}{7} \sum_{\tau=t-3}^{t+3} y_\tau, \quad (1)$$

где \tilde{y}_t^7 – осредненная за семидневный период заболеваемость на дату t , случаев заболеваний на 1000 населения (сл./1000), t – текущая дата.

Дизайн исследования строился на предположении, что загрязнение воздуха изменяет течение эпидемиологического процесса за счет переноса сорбированных вирусов на твердых частицах, с одной стороны, формирования раздражения слизистых оболочек и ослабления барьерной функции органов дыхания – с другой. По существу, предполагали, что загрязнение формирует условия среды обитания, в которых динамические характеристики распространения инфекции отличаются от ожидаемого сценария, соответствующего стандартной модели эпидемиологического процесса.

Следует отметить, что модель эпидемиологического процесса (базовый сценарий распространения инфекции) имеет сложную структуру и должна учитывать ряд особенностей конкретной территории или населенного пункта, таких как плотность проживания населения, уровень меж- и внутритерриториальной миграции, особенности организации противоэпидемиологических мер и др. Построение такой модели требует проведения специальных исследований и выходит за рамки поставленной задачи.

В рамках настоящей работы при построении модели базового сценария развития эпидемиологического процесса было использовано упрощение в виде сглаженного динамического ряда суточных приростов числа случаев заболеваний. Сглаживание динамического ряда проводилось путем осреднения данных за 28-дневный период методом скользящего среднего (2):

$$\tilde{y}_t^{28} = \frac{1}{28} \sum_{\tau=t-14}^{t+13} y_\tau, \quad (2)$$

где \tilde{y}_t^{28} – осредненная за 28-дневный период заболеваемость на дату t , сл./1000, t – текущая дата.

³ 100 Крупнейших городов России по населению (2021) [Электронный ресурс] // statdata.ru: страны, города, статистика населения. – URL: http://www.statdata.ru/largest_cities_russia (дата обращения 01.08.2021).

Моделирование зависимостей выполняли в соответствии с основной гипотезой, которая состояла в том, что разница между зафиксированной заболеваемостью (с недельным осреднением) и заболеваемостью по базовому эпидемиологическому сценарию обусловлена внешними факторами, в том числе факторами загрязнения атмосферного воздуха.

Для устранения влияния масштаба базового эпидемиологического процесса на результаты оценки причинно-следственных связей был выполнен расчет относительного суточного отклонения (3):

$$\delta\tilde{y}_t = \frac{\tilde{y}_t^7 - \tilde{y}_t^{28}}{\tilde{y}_t^{28}}. \quad (3)$$

где $\delta\tilde{y}$ – относительное суточное отклонение фактической заболеваемости населения от базового эпидемиологического сценария.

В результате выполнения расчетов относительного суточного отклонения для всех исследуемых территорий были получены сопоставимые нормированные величины, позволяющие объединить данные в общую совокупность и провести их совместную статистическую обработку.

В рамках моделирования системы причинно-следственных связей выполнен корреляционно-регрессионный анализ зависимостей между относительным суточным отклонением фактической заболеваемости населения от базового сценария ($\delta\tilde{y}$) и среднесуточными концентрациями веществ в атмосферном воздухе. Модели строили на основе объединенных данных по всем исследуемым территориям. Также проведен поиск оптимального временного лага, отражающего количество дней запаздывания прироста заболеваемости относительно изменений показателей загрязнения атмосферного воздуха. Полагали, что оптимальный временной лаг соответствует максимальному коэффициенту корреляции.

В результате статистического анализа была получена система парных зависимостей между относительным суточным приростом заболеваемости и показателями загрязнения атмосферного воздуха (4):

$$\delta\tilde{y}_t = a_i x_{i,t-Li} + b_i, \quad (4)$$

где $x_{i,t-Li}$ – среднесуточная концентрация i -го вещества в атмосферном воздухе на дату $t-Li$, Li – величина временного лага, a_i , b_i – коэффициенты модели для i -го вещества.

Моделирование зависимостей предусматривало осуществление процедур проверки статистических гипотез относительно параметров, проверку адекватности моделей, а также проведение экспертизы на биологическое правдоподобие.

На основе полученных моделей зависимостей выполнена оценка числа случаев заболеваний, ассоциированных с загрязнением атмосферного воздуха, с расчетом следующих показателей:

– суточная заболеваемость, ассоциированная с загрязнением атмосферного воздуха (5)

$$\begin{aligned} \Delta\tilde{y}_t &= \sum_i \Delta\tilde{y}_{t,i} = \sum_i (\delta\tilde{y}_t(x_{i,t-Li}) - \delta\tilde{y}_t(0))\tilde{y}_t^{28} = \\ &= \sum_i a_i x_{i,t-Li} \tilde{y}_t^{28}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\Delta\tilde{y}_t$ – суммарная заболеваемость, ассоциированная с воздействием загрязнения атмосферного воздухе на дату t , сл./1000; $\Delta\tilde{y}_{t,i}$ – заболеваемость, ассоциированная с воздействием i -го вещества в атмосферном воздухе на дату t , сл./1000;

– абсолютное количество заболеваний, ассоциированных с загрязнением атмосферного воздуха в течение года (6):

$$\Delta Y = \frac{N}{1000} \sum_i \Delta\tilde{y}_t. \quad (6)$$

На основании полученных данных оценивали вероятный вклад загрязнения воздуха в заболеваемость населения COVID-19.

Дополнительно выполняли расчет того уровня содержания примеси в атмосферном воздухе, который обеспечивал бы приемлемый уровень прироста заболеваемости (целевой уровень). При этом за приемлемый (целевой) принимали уровень 1 % и / или 3 % прироста к относительному значению суточной заболеваемости на территории.

Расчет целевого уровня концентрации осуществляли по формуле (7), полученной преобразованием из уравнения регрессии (5):

$$x_i^N = \frac{\delta\tilde{y}^N}{a_i}, \quad (7)$$

где x_i^N – целевой уровень концентрации i -го вещества, мг/м³, $\delta\tilde{y}^N$ – целевой относительный прирост заболеваемости, принимаемый равным 0,01 (что соответствует 1 %) или 0,03 (что соответствует 3 % прироста заболеваемости).

Предлагаемые подходы отрабатывали на примере ряда городов, вошедших в федеральный проект «Чистый воздух» (Братск, Красноярск, Норильск, Омск, Череповец, Липецк). Рассматривали взаимосвязь качества воздуха и уровня распространения COVID-19 в каждом конкретном городе. Однако в силу того, что спектр выбрасываемых примесей в каждом городе специфичен, соответственно различались программы инструментальных измерений.

Также делали попытку выявить общие закономерности, объединяя данные всех шести исследованных городских поселений.

Результаты и их обсуждение. На рис. 2 и 3 приведена динамика заболеваемости с недельным осреднением и базовым эпидемиологическим сценарием для исследуемых территорий. Анализ показал, что при общей схожести развития ситуации в разных городах имеются особенности уровня и выраженности эпидемиологического процесса.

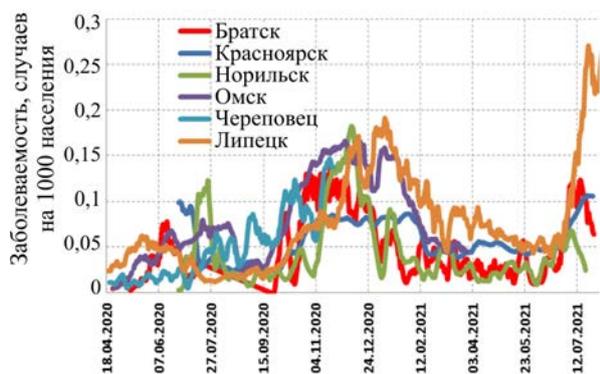


Рис. 2. Суточная заболеваемость SARS-CoV-2 на исследуемых территориях (с семидневным осреднением)

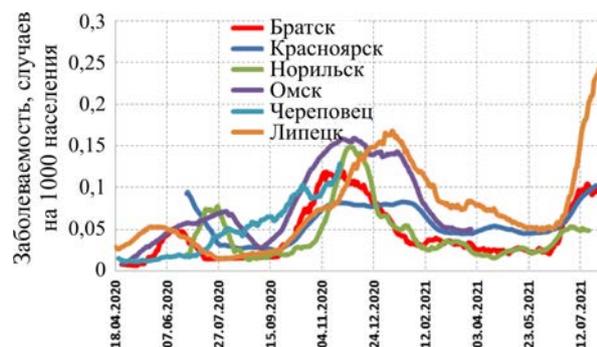


Рис. 3. Суточная заболеваемость SARS-CoV-2 в соответствии с базовым эпидемиологическим сценарием (с 28-дневным осреднением)

Суточные колебания – отклонения регистрации заболеваний от «базового эпидемического сценария» – составили за исследованный период в относительных величинах в среднем порядка 0,07 сл./1000 (от -100 до + 148 % от ожидаемых).

Оценка связи этих отклонений с уровнями загрязнения атмосферного воздуха в городах позволила получить ряд достоверных математических моделей, параметры которых по ряду городов приведены в табл. 1–3 (в таблицах n – количество суточных наблюдений, R^2 – коэффициент детерминации).

Получены также достоверные модели связи суточных колебаний прироста заболевших с суточны-

ми колебаниями бензола ($a_i = 0,088$; $b_i = -0,0143$; $R^2 = 0,02$) и сероводорода ($a_i = 82,1$; $b_i = -0,063$; $R^2 = 0,32$) в Красноярске; и с суточными колебаниями диоксида азота ($a_i = 2,18$; $b_i = -0,0912$; $R^2 = 0,02$) и серной кислоты ($a_i = 21,5$; $b_i = -0,099$; $R^2 = 0,11$) в Норильске; с суточными колебаниями этилбензола ($a_i = 2,96$; $b_i = -0,039$; $R^2 = 0,02$) в Омске.

Временные лаги наступления максимально выраженного отклика на воздействие разных примесей колебались от 1–3 суток (ароматические углеводороды – толуол, ксилолы, этилбензол, сероводород) до 6–13 суток (взвешенные вещества, бенз(а)пирен, диоксид азота, акролеин и пр.).

При рассмотрении всей совокупности факторов по разным городам к достоверным были отнесены модели, представленные в табл. 4.

Полученные математические данные позволили ориентировочно оценить вклад химических факторов в заболеваемость населения исследованных городов (в пересчете на годовую заболеваемость). Результаты приведены в табл. 5.

Таким образом, в пяти из шести исследованных городов вклады загрязнения атмосферного воздуха в повышение уровня распространенности COVID-19 составили от 1,6 % (г. Красноярск) до 8,9 % (г. Норильск), что удовлетворительно коррелируется с результатами ряда зарубежных исследований.

Из данного ряда выпадают результаты, полученные по г. Братску: рассчитанный вклад факторов составил за исследованный период почти треть, что требует более тщательного анализа исходных данных, включенных в моделирование.

В целом число в исследованных городах порядка 3572 случаев заболевания COVID-19 в год вероятно связано с повышенным уровнем загрязнения атмосферного воздуха. Этим случаев можно было бы избежать в условиях существенного снижения уровней загрязнения атмосферы.

Результаты расчета целевых уровней содержания примесей в атмосфере для каждого города приведены в табл. 6–11.

Целевые уровни в разных городах отличаются в силу воздействия химических примесей на здоровье

Таблица 1

Параметры зависимостей между показателем $\delta \bar{y}_i$ и среднесуточными концентрациями веществ в атмосферном воздухе ($p < 0,05$) г. Братска

Вещество	a_i	b_i	n	R^2	Диапазон суточных концентраций за период исследования, мг/м ³
Бенз(а)пирен	41600	-0,0384	316	0,0225	[0*; 1,42E-05]
Взвешенные частицы PM ₁₀	31,63	-0,00356	321	0,0230	[0; 0,036]
Взвешенные частицы PM _{2,5}	20,87	-0,00452	319	0,0165	[0; 0,123]
Хлористый водород	9,19	-0,027	316	0,0394	[0; 0,06]
Диметилбензол	2,26	-0,0935	309	0,0363	[0; 0,35]
Метилбензол	3,76	-0,0817	309	0,0355	[0; 0,17]
Углерод (сажа)	2,24	-0,0250	313	0,0199	[0; 0,19]
Этилбензол	17,35	-0,0719	309	0,0171	[0; 0,022]

Примечание: * – «0» здесь и далее – «ниже порога определения метода».

Таблица 2

Параметры зависимостей между показателем $\delta\tilde{y}_i$ и среднесуточными концентрациями веществ в атмосферном воздухе ($p < 0,05$) г. Череповца

Вещество	a_i	b_i	n	R^2	Диапазон концентраций за период наблюдения, мг/м ³
Взвешенные частицы PM ₁₀	6,04	-0,0432	209	0,0597	[0; 0,0707]
Взвешенные частицы PM _{2,5}	5,28	-0,0331	209	0,0349	[0; 0,061]
Никель оксид *	48,63	-0,0465	209	0,0267	[0; 0,00733]

Примечание: * – в воздухе присутствует в виде мелкодисперсных твердых частиц.

Таблица 3

Параметры зависимостей между показателем $\delta\tilde{y}_i$ и среднесуточными концентрациями веществ в атмосферном воздухе ($p < 0,05$) г. Липецка

Вещество	a_i	b_i	n	R^2	Диапазон концентраций за период наблюдения, мг/м ³
Азота диоксид	0,593	-0,0229	382	0,0104	[0; 0,135]
Аммиак	2,78	-0,0208	382	0,0207	[0; 0,0506]
Сероводород	119,6	-0,00945	377	0,0104	[0; 0,001]
Марганец и его соединения*	122,8	-0,0122	375	0,0125	[0; 9,75E-04]
Озон	1,76	-0,0223	382	0,0188	[0; 0,0765]
Проп-2-ен-1-аль (акролеин)	57,4	-0,0127	380	0,0104	[0; 0,00263]

Примечание: * – в воздухе присутствует в виде мелкодисперсных твердых частиц.

Таблица 4

Параметры зависимостей между показателем $\delta\tilde{y}_i$ и среднесуточными концентрациями веществ в атмосферном воздухе по объединенным данным шести городов

Вещество	a_i	b_i	n	R^2
Гидрохлорид (по молекуле HCl)	8,96	-0,0202	464	0,0369
диАлюминий триоксид *	7,34	-0,0213	591	0,0105
Никель оксид (в пересчете на никель) *	39,8	-0,0298	619	0,0126
Озон	1,76	-0,0223	382	0,0188
Углерод черный (сажа) *	1,39	-0,0135	1469	0,0077
Формальдегид	2,09	-0,0146	1372	0,0036

Примечание: * – в воздухе присутствует в виде мелкодисперсных твердых частиц.

Таблица 5

Результаты расчетов ассоциированных случаев заболеваний по городам, сл./г.

Город	Заболеемость COVID-19 исследуемый период				Доля случаев, ассоциированных с загрязнением воздуха
	фактически зарегистрированная		в том числе ассоциированная с загрязнением воздуха		
	случаев, всего	сл. /1000	случаев, всего	сл. /1000	
Братск	3280	14,50	1380	6,10	0,334
Красноярск	14929	14,83	232	0,23	0,016
Норильск	2171	11,94	207	1,14	0,089
Омск	33238	28,79	723	0,63	0,022
Череповец	5634	18,05	501	1,61	0,089
Липецк	15326	30,46	529	1,05	0,035

Таблица 6

Целевой уровень среднесуточных концентраций загрязняющих веществ в атмосфере г. Братска, обеспечивающих не более 1–3 % относительного прироста заболеваемости COVID-19 (здесь и далее – в условиях характерного для города устойчивого комплекса загрязнений)

Вещество	Целевой уровень, мг/м ³ , обеспечивающий прирост заболеваемости на уровне не выше		ПДК _{сс}	ПДК _{ст}
	1 %	3 %		
Бенз(а)пирен	2.40E-07	7,2E-07		1,00E-06
Взвешенные частицы PM ₁₀	0,0003	0,0010	0,15	0,075
Взвешенные частицы PM _{2,5}	0,0005	0,0014	0,035	0,025
Гидрохлорид (по молекуле HCl)	0,0011	0,003	0,1	0,02
Диметилбензол (смесь изомеров)	0,0044	0,013	0,04	
Метилбензол	0,0027	0,008		
Углерод (сажа)	0,0045	0,013	0,05	0,025
Этилбензол	0,0006	0,002		0,04

Таблица 7

Целевой уровень среднесуточных концентраций загрязняющих веществ в атмосфере г. Череповца, обеспечивающих не более 1–3 % относительного прироста заболеваемости COVID-19

Вещество	Целевой уровень, мг/м ³ , обеспечивающий прирост заболеваемости на уровне не выше		ПДК _{сс}
	1 %	3 %	
Взвешенные частицы PM ₁₀	0,0017	0,051	0,06
Взвешенные частицы PM _{2,5}	0,0019	0,006	0,035
Никеля оксид	0,0002	0,001	0,001

Таблица 8

Целевой уровень среднесуточных концентраций загрязняющих веществ в атмосфере г. Липецка, обеспечивающих не более 1–3 % относительного прироста заболеваемости COVID-19

Вещество	Целевой уровень, мг/м ³ , обеспечивающий прирост заболеваемости на уровне не выше		ПДК _{сс}
	1 %	3 %	
Азота диоксид	0,017	0,051	0,06
Аммиак	0,004	0,012	0,035
Сероводород	0,00008	0,001	0,001
Марганец и его соединения	0,00008	0,0003	0,002*
Озон	0,006	0,018	0,1
Проп-2-ен-1-аль (акролеин)	0,0002	0,0006	0,01

Примечание: * – среднегодовая концентрация – указывается при отсутствии среднесуточной.

Таблица 9

Целевой уровень среднесуточных концентраций загрязняющих веществ в атмосфере г. Норильска, обеспечивающих не более 1–3 % относительного прироста заболеваемости COVID-19

Вещество	Целевой уровень, мг/м ³ , обеспечивающий прирост заболеваемости на уровне не выше		ПДК _{сс}
	1 %	3 %	
Азота диоксид	0,0046	0,42	0,06
Сероводород	0,0005	0,0004	0,002*

Примечание: * – среднегодовая концентрация – указывается при отсутствии среднесуточной.

Таблица 10

Целевой уровень среднесуточных концентраций загрязняющих веществ в атмосфере г. Красноярска, обеспечивающих не более 1–3 % относительного прироста заболеваемости COVID-19

Вещество	Целевой уровень, мг/м ³ , обеспечивающий прирост заболеваемости на уровне не выше		ПДК _{сс}
	1 %	3 %	
Бензол	0,1136	0,42	0,06
Сероводород	0,00012	0,0004	0,002*

Примечание: * – среднегодовая концентрация – указывается при отсутствии среднесуточной.

Таблица 11

Целевой уровень среднесуточных концентраций загрязняющих веществ в атмосфере г. Омска, обеспечивающих не более 1–3 % относительного прироста заболеваемости COVID-19

Вещество	Целевой уровень, мг/м ³ , обеспечивающий прирост заболеваемости на уровне не выше		ПДК _{сс}
	1 %	3 %	
Этилбензол	0,0037	0,011	0,04*
Никель оксид	0,00004	0,0001	0,001

Примечание: * – среднегодовая концентрация – указывается при отсутствии среднесуточной.

человека в конкретных условиях комбинированного и комплексного загрязнения среды обитания. Вместе с тем практически повсеместно целевые уровни содержания химических примесей в воздухе, обеспечивающие прирост заболеваемости COVID-19 не выше чем на 3 % и, тем более, – на 1 %, предполагают концентрации более низкие, чем ПДК_{сс} и / или ПДК_{ср}. Целевой уровень может быть ниже суточного норматива от 1,5–3 раза (например, целевые уровни диоксида азота и аммиака в Липецке или бенз(а)пирена и ксилола в Братске, взвешенных частиц РМ₁₀ в Череповце) или в 10–20 раз (целевые уровни соединений марганца и акролеина в Липецке или сероводорода в Красноярске).

Несомненно, величины целевых значений определяются спецификой комплекса загрязнения в том или ином городе и фактически сложившимся уровнем концентраций отдельных примесей. Однако полученные данные свидетельствуют, что достижение реально безопасной среды обитания возможно лишь в условиях значительного улучшения состояния атмосферного воздуха.

В целом результаты исследования позволяют утверждать, что в указанных городах заболеваемость COVID-19 имеет достоверную связь с уровнями загрязнения атмосферного воздуха, выявляемую методами математической статистики. Независимо от спектра загрязнений и уровней фактически наблюдаемых концентраций, достоверные зависимости получены для всех территорий, что позволяет говорить об общей тенденции, которая может наблюдаться на урбанизированных территориях страны, подверженных негативному воздействию комплекса химических загрязнений.

Установлено, что рост заболеваемости COVID-19 на территориях ассоциирован не только со взвешенными частицами (что следовало из данных многочис-

ленных зарубежных научных публикаций), но и с целым рядом химических веществ, обладающих раздражающим действием, а также прямо или косвенно воздействующих на функции, в том числе барьерную, органов дыхания (пары серной кислоты, хлористый водород, формальдегид, сероводород и пр.).

Вклад химического загрязнения в повышение распространенности COVID-19 в исследованных городах (Братск, Красноярск, Норильск, Омск, Череповец, Липецк) колебался в близких пределах и составил за изученный период около $5,0 \pm 2,6$ %. Выявленная связь суточных колебаний прироста COVID-19 в г. Братске была существенно более выраженной, составила порядка 33 %, что требует дополнительных исследований для подтверждения или корректировки полученных результатов.

Комбинированное многокомпонентное воздействие химических веществ на человека приводит к достоверному росту заболеваемости COVID-19, что позволяет предположить и влияние на показатель смертности по данной причине и, соответственно, медико-демографические потери в регионах.

Со стороны хозяйствующих субъектов и регулятора в сфере нормирования выбросов требуется понимание того, что достижение гигиенических нормативов, установленных для условий изолированного действия (даже с учетом групп суммации, перечень которых весьма ограничен), не может рассматриваться как конечная цель природоохранных программ и воздухоохраных мероприятий.

Нормативы допустимых выбросов могут и должны являться первой, обязательной ступенью к достижению безопасной среды обитания, но предполагать и дальнейшее движение в сторону минимизации загрязнения и рисков здоровью населения, особенно в условиях одновременного воздействия на человека целого комплекса загрязняющих ве-

ществ с односторонним действием и одними и теми же поражаемыми органами и / или системами. Последнее не может не учитываться в ходе совершенствования системы экологического нормирования, включая методологию квотирования выбросов. Фактически управление выбросами загрязняющих веществ в городах должно стать системой управления рисками здоровью, особенно в периоды особых санитарно-эпидемиологических ситуаций.

Проведенное исследование рассматривалось как стартовое, ориентированное на отработку методических подходов. Представляется целесообразным выполнение аналогичных исследований на более полных и охватывающих более длительный период данных. При этом актуальным предполагается изучение связи загрязнения воздуха не только с заболеваемостью, но и со смертностью населения, а также с поражениями здоровья в разных половозрастных группах. Получаемые результаты позволят выработать рекомендации по организации мониторинга атмосферного воздуха и предупреждению появления дополнительных заболеваний, ассоциированных с загрязнением среды обитания.

Не менее важным направлением исследований будущих периодов могут и должны стать таковые, касающиеся эффективности вакцинации против SARS-CoV-2 и устойчивости поствакцинального иммунитета у лиц, проживающих в разных условиях внешнесредового воздействия. Эти исследования необходимо разворачивать максимально оперативно, в том числе для задач грамотной и эффективной профилактики повторных волн заболеваний.

Основания для таких исследований, несомненно, есть: прежде всего это исследования по снижению поствакцинального иммунитета к иным инфекциям (кори, дифтерии) в условиях загрязненной среды обитания [34, 35]. В работе В.Г. Макаровой [36] выявлено, что лабораторные показатели крови у детей, постоянно проживающих в условиях высокой химической аэротехногенной нагрузки, свидетельствовали об относительном истощении возможностей иммунной системы и снижении адекватного иммунного ответа на вакцинный антиген.

Масштабные исследования по оценке влияния загрязнения среды обитания на процесс сохранения иммунитета к COVID-19 в условиях разного качества среды обитания в Российской Федерации могут быть развернуты в максимально короткие сроки, поскольку для этого имеется информационная база. В рамках национального проекта «Экология» ведется мониторинг качества атмосферного воздуха в жилых зонах городов с высоким уровнем загрязнения. Сведения по каждому случаю COVID-19 регистрируются, формируя единую базу данных в целом по стране. Системно ведется серологический мониторинг [37], что обеспечивает непрерывный процесс объективной оценки состояния специфического поствакцинального иммунитета к возбудителям инфекций, управляемых средствами специфич-

еской профилактики, в «индикаторных» группах населения и группах риска.

Постоянный контроль ситуации, широкое всестороннее обсуждение результатов этого контроля, вовлечение в дискуссию и систему информирования не только ученых и практиков здравоохранения, но и лиц, принимающих решения в сфере экологии, медицины, представителей властей всех уровней, бизнеса, гражданского общества – представляется, что только таким путем можно максимально эффективно справиться с текущей эпидемической ситуацией в мире и наработать опыт для решения аналогичных проблем в перспективе. Данные подходы согласуются с мнениями и установками многих исследователей [38–40].

Выводы. Во всех шести исследованных городах, входящих в группу приоритетных для Российской Федерации по уровню загрязнения атмосферы и являющихся объектами федерального проекта «Чистый воздух», выявлена достоверная связь заболеваемости COVID-19 с концентрациями химических веществ в атмосферном воздухе. Полученные факты корреспондируются с данными зарубежных исследователей и позволяют предполагать общую тенденцию к более высокому уровню заболеваемости граждан COVID-19 на урбанизированных территориях страны, подверженных негативному воздействию комплекса химических загрязнений.

Вклад химического загрязнения в повышение распространенности COVID-19 в исследованных городах (Братск, Красноярск, Норильск, Омск, Череповец, Липецк) колебался в близких пределах и составил за изученный период $5,0 \pm 2,6$ %. Выявленная связь суточных колебаний прироста COVID-19 в г. Братске была существенно более выраженной (составила порядка 33 %), что требует дополнительных исследований для подтверждения и корректировки полученных результатов.

Комбинированное многокомпонентное воздействие химических веществ на человека приводит к достоверному росту медико-демографических потерь даже в условиях соблюдения гигиенических нормативов отдельными химическими примесями. Нормативы допустимых выбросов должны рассматриваться как первая, обязательная ступень к достижению безопасной среды обитания, но предполагать и дальнейшее движение в сторону минимизации загрязнения и рисков здоровью населения.

Проведенное исследование позволило отработать некоторые методические подходы к выявлению дополнительной заболеваемости COVID-19. Представляется целесообразным выполнение аналогичных исследований на более полных и охватывающих более длительный период данных, включая анализ уровней смертности населения по причине COVID-19.

Важным направлением должны стать исследования, касающиеся эффективности вакцинации против SARS-CoV-2 и устойчивости поствакцинального

иммунитета у лиц, проживающих в разных условиях внешнесредового воздействия.

Сопряжение эпидемиологических и углубленных медико-биологических исследований эффективности вакцинации граждан может явиться научной и информационной базой оптимального управления качеством среды обитания и рисками здоровью населения, в том числе с целью демпфи-

рования и профилактики негативных последствий в период сложных санитарно-эпидемиологических ситуаций.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. Becker S., Soukup, J.M. Exposure to urban air particulates alters the macrophage-mediated inflammatory response to respiratory viral infection // *J. Toxicol. Environ. Health A.* – 1999. – Vol. 57, № 7. – P. 445–457. DOI:10.1080/009841099157539
2. Air pollution and case fatality of SARS in the People's Republic of China: an ecologic study / Y. Cui, Z.-F. Zhang, J. Froines, J. Zhao, H. Wang, S.-Z. Yu, R. Detels // *Environ. Health.* – 2003. – Vol. 2, № 1. – P. 15. DOI:10.1186/1476-069X-2-15
3. Cienciewicki J., Jaspers I. Air pollution and respiratory viral infection // *Inhal. Toxicol.* – 2007. – Vol. 19, № 14. – P. 1135–1146. DOI:10.1080/08958370701665434
4. Estimates of the global, regional, and national morbidity, mortality, and aetiologies of lower respiratory tract infections in 195 countries: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2015 / C. Troeger, M. Forouzanfar, P.C. Rao, I. Khalil, A. Brown, S. Swartz, N. Fullman, J. Mosser [et al.] // *Lancet Infect. Dis.* – 2017. – Vol. 17, № 11. – P. 1133–1161. DOI:10.1016/S1473-3099(17)30396-1
5. The short-term effects of air pollutants on influenza-like illness in Jinan, China / W. Su, X. Wu, X. Geng, X. Zhao, Q. Liu, T. Liu // *BMC Public Health.* – 2019. – Vol. 19, № 1. – P. 1319. DOI:10.1186/s12889-019-7607-2
6. Acute and chronic exposure to air pollution in relation with incidence, prevalence, severity and mortality of COVID-19: a rapid systematic review / P.D.M.C. Katoto, A.S. Brand, B. Bakan, P.M. Obadia, C. Kuhangana, T. Kayembe-Kitenge, J.P. Kitenge, C.B.L. Nkulu [et al.] // *Environment Health.* – 2021. – Vol. 20, № 1. – P. 41. DOI: 10.1186/s12940-021-00714-1
7. Assessing the relationship between ground levels of ozone (O₃) and nitrogen dioxide (NO₂) with coronavirus (COVID-19) in Milan, Italy / M.A. Zoran, R.S. Savastru, D.M. Savastru, M.N. Tautan // *Sci Total Environ.* – 2020. – Vol. 740. – P. 140005. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140005
8. Air Pollution and COVID-19: The Role of Particulate Matter in the Spread and Increase of COVID-19's Morbidity and Mortality / S. Comunian, D. Dongo, C. Milani, P. Palestini // *Int. J. Environ. Res. Public Health.* – 2020. – Vol. 17, № 12. – P. 4487. DOI: 10.3390/ijerph17124487
9. Villeneuve P.J., Goldberg M.S. Methodological Considerations for Epidemiological Studies of Air Pollution and the SARS and COVID-19 Coronavirus Outbreaks // *Environ Health Perspect.* – 2020. – Vol. 128, № 9. – P. 95001. DOI: 10.1289/EHP7411
10. Exposure to nitrogen dioxide (NO₂) from vehicular emission could increase the COVID-19 pandemic fatality in India: a perspective / P. Chakraborty, S. Jayachandran, P. Padalkar, L. Sitlhou, S. Chakraborty, R. Kar, S. Bhaumik, M. Srivastava // *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* – 2020. – Vol. 105, № 2. – P. 198–204. DOI: 10.1007/s00128-020-02937-3
11. Fattorini D., Regoli F. Role of the chronic air pollution levels in the Covid-19 outbreak risk in Italy // *Environ. Pollut.* – 2020. – Vol. 264. – P. 114732. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.114732
12. Association between air pollution in Lima and the high incidence of COVID-19: findings from a post hoc analysis / V. Vasquez-Apestegui, E. Parras-Garrido, V. Tapia, V.M. Paz-Aparicio, J.P. Rojas, O.R. Sánchez-Ccoyllo, G.F. Gonzales // *Res. Sq.* – 2020. – Vol. 3. – P. 39404. DOI: 10.21203/rs.3.rs-39404/v1
13. Severe air pollution links to higher mortality in COVID-19 patients: the “double-hit” hypothesis / A. Frontera, L. Cianfanelli, K. Vlachos, G. Landoni, G. Cremona // *J. Inf. Secur.* – 2020. – Vol. 81, № 2. – P. 255–259. DOI: 10.1016/j.jinf.2020.05.031
14. Механизмы передачи вируса SARS-CoV-2 и их значение для выбора мер профилактики. Резюме научных исследований. 9 июля 2020 г. [Электронный ресурс] // Всемирная организация здравоохранения. – 2020. – URL: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/333114/WHO-2019-nCoV-Sci_Brief-Transmission_modes-2020.3-rus.pdf (дата обращения: 19.08.2021).
15. Aerosol and surface stability of SARS-CoV-2 as compared with SARS-CoV-1 / N. Van Doremalen, T. Bushmaker, D.H. Morris, M.G. Holbrook, A. Gamble, B.N. Williamson, A. Tamin, J.L. Harcourt [et al.] // *New England Journal of Medicine.* – 2020. – Vol. 382, № 16. – P. 1564–1567. DOI: 10.1056/NEJMc2004973
16. Exposure to air pollution and COVID-19 mortality in the United States: A nationwide cross-sectional study / X. Wu, R.C. Nethery, M.B. Sabath, D. Braun, F. Dominici // *MedRxiv.* – 2020. DOI:10.1101/2020.04.05.20054502
17. Potential role of particulate matter in the spreading of COVID-19 in Northern Italy: first observational study based on initial epidemic diffusion / L. Setti, F. Passarini, G. De Gennaro, P. Barbieri, S. Licen, M.G. Perrone, A. Piazzalunga, M. Borelli [et al.] // *BMJ Open.* – 2020. – Vol. 10, № 9. – P. e039338. DOI:10.1136/bmjopen-2020-039338
18. Association between short-term exposure to air pollution and COVID-19 infection: evidence from China / Y. Zhu, J. Xie, F. Huang, L. Cao // *Sci. Total Environ.* – 2020. – Vol. 727. – P. 138704. DOI:10.1016/j.scitotenv.2020.138704
19. Bontempi E. First data analysis about possible COVID-19 virus airborne diffusion due to air particulate matter (PM): the case of Lombardy (Italy) // *Environ. Res.* – 2020. – Vol. 186. – P. 109639. DOI:10.1016/j.envres.2020.109639
20. Short-term and long-term health impacts of air pollution reductions from COVID-19 lockdowns in China and Europe: a modelling study / P. Giani, S. Castruccio, A. Anav, D. Howard, W. Hu, P. Crippa // *Lancet Planetary Health.* – 2020. – Vol. 4, № 10. – P. e474–e482. DOI: 10.1016/S2542-5196(20)30224-2

21. Domingo J.L., Marquès M., Rovira J. Influence of airborne transmission of SARS-CoV-2 on COVID-19 pandemic. A review // *Environmental Research*. – 2020. – Vol. 188. – P. 109861. DOI: 10.1016/j.envres.2020.109861
22. The role of air pollution (PM and NO₂) in COVID-19 spread and lethality: a systematic review / C. Copat, A. Cristaldi, M. Fiore, A. Grasso, P. Zuccarello, S.S. Signorelli, G. Oliveri, C.M. Ferrante // *Environ Res.* – 2020. – Vol. 191. – P. 110129. DOI:10.1016/j.envres.2020.110129
23. The impact of outdoor air pollution on COVID-19: a review of evidence from in vitro, animal, and human studies / T. Bourdrel, I. Annesi-Maesano, B. Alahmad, C.N. Maesano, M.-A. Bind // *European respiratory review*. – 2021. – Vol. 30, № 159. – P. 200242. DOI:10.1183/16000617.0242-2020
24. Effects of underlying morbidities on the occurrence of deaths in COVID-19 patients: a systematic review and meta-analysis / M.M.A. Khan, M.N. Khan, M.G. Mustagir, J. Rana, M.S. Islam, M.I. Kabir // *J. Glob. Health*. – 2020. – Vol. 10, № 2. – P. 020503. DOI: 10.7189/jogh.10.020503
25. Is there a Role for Environmental and Metabolic Factors Predisposing to severe COVID-19 / S.R. Bornstein, K. Voit-Bak, D. Schmidt, H. Morawietz, A.B. Bornstein, W. Balanzew, U. Julius, R.N. Rodionov [et al.] // *Horm. Metab. Res.* – 2020. – Vol. 52, № 7. – P. 540–546. DOI: 10.1055/a-1182-2016. Epub 2020 Jun 29
26. Ogen Y. Assessing nitrogen dioxide (NO₂) levels as a contributing factor to coronavirus (COVID-19) fatality // *Sci. Total Environ.* – 2020. – Vol. 726. – P. 138605. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138605
27. Загороднов С.Ю. Пылевое загрязнение атмосферного воздуха города как недооцененный фактор риска здоровья человека // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика*. – 2018. – Т. 30, № 2. – С. 124–133. DOI: 10.15593/2409-5125/2018.02.10
28. Ambient air quality factors and people health [Электронный ресурс] / S.V. Kleyn, N.V. Zaitseva, S.A. Vekovshinina, A.M. Andrishunas // 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020. – 2020. – Vol. 20. – P. 115–124. – URL: <https://www.sgem.org/index.php/elibrary?view=publication&task=show&id=7663> (дата обращения: 02.09.2021).
29. Ключев Н.Н., Яковенко Л.М. «Грязные» города России: факторы, определяющие загрязнение атмосферного воздуха // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности*. – 2018. – Т. 26, № 2. – С. 237–250. DOI: 10.22363/2313-2310-2018-26-2-237-250
30. Ревич Б.А. Национальный проект «Чистый воздух» в контексте охраны здоровья населения // *Экологический вестник России*. – 2019. – № 4. – С. 64–69.
31. Клейн С.В., Попова Е.В. Гигиеническая оценка качества атмосферного воздуха г. Читы – приоритетной территории федерального проекта «Чистый воздух» // *Здоровье населения и среда обитания*. – 2020. – Т. 333, № 12. – С. 31–37.
32. Гигиеническая оценка качества атмосферного воздуха г. Братска до реализации мероприятий федерального проекта «Чистый воздух» / Е.В. Максимова, А.А. Кокоулина, А.Н. Пережогин, И.Г. Жданова-Заплесвичко // *Анализ риска здоровью – 2020 совместно с международной встречей по окружающей среде и здоровью Rise-2020 и круглым столом по безопасности питания: материалы X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием: в 2 т. / под ред. А.Ю. Поповой, Н.В. Зайцевой*. – Пермь, 2020. – С. 273–278.
33. Щербатюк А.П. Сравнительная оценка экологической безопасности воздушной среды федеральных округов Российской Федерации // *Вестник Забайкальского государственного университета*. – 2017. – Т. 23, № 9. – С. 53–66. DOI: 10.21209/2227-9245-2017-23-9-53-66
34. Вакцинопрофилактика полиомиелита живой полиовакциной в условиях экологического неблагополучия / С.В. Ильина, Л.А. Степаненко, В.Т. Киклевич, Т.А. Гаврилова, Е.Д. Савилов // *Сибирский медицинский журнал (Иркутск)*. – 2005. – Т. 56, № 57. – С. 48–49.
35. Коклюш на территориях с высоким уровнем техногенного загрязнения окружающей среды / С.В. Ильина, М.А. Дронова, В.Т. Киклевич, Е.Д. Савилов, Н.И. Брико // *Эпидемиология и инфекционные болезни*. – 2007. – № 1. – С. 18–20.
36. Иммунологический профиль и состояние поствакцинального иммунитета к инфекциям, управляемым средствами иммунопрофилактики у детей в условиях комбинированной аэрогенной экспозиции химическими веществами техногенного происхождения / В.Г. Макарова, О.Ю. Устинова, О.В. Долгих, А.Д. Загумённых // *Здоровье населения и среда обитания*. – 2013. – Т. 248, № 11. – С. 27–29.
37. Опыт исследования серопревалентности к вирусу Sars-Cov-2 населения Иркутской области в период вспышки COVID-19 / А.Ю. Попова, Е.Б. Ежлова, А.А. Мельникова, С.В. Балахонов, М.В. Чеснокова, В.И. Дубровина, Л.В. Лялина, В.С. Смирнов [и др.] // *Проблемы особо опасных инфекций*. – 2020. – № 3. – С. 106–113.
38. How will country-based mitigation measures influence the course of the COVID-19 epidemic? / R.M. Anderson, H. Heesterbeek, D. Klinkenberg, T.D. Hollingsworth // *Lancet*. – 2020. – Vol. 395, № 10228. – P. 931–934. DOI:10.1016/s0140-6736(20)30567-5
39. COVID-19 epidemic in Switzerland: On the importance of testing, contact tracing and isolation / M. Salathé, C.L. Althaus, R. Neher, S. Stringhini, E. Hodcroft, J. Fellay, M. Zwahlen, G. Senti [et al.] // *Swiss Med. Wkly*. – 2020. – Vol. 150. – P. w20225. DOI:10.4414/smww.2020.20225
40. Padron-Regalado E. Vaccines for SARS-CoV-2: Lessons from Other Coronavirus Strains // *Infect. Dis. Ther.* – 2020. – Vol. 9, № 2. – P. 1–20. DOI:10.1007/s40121-020-00300-x

К оценке дополнительной заболеваемости населения COVID-19 в условиях загрязнения атмосферного воздуха: методические подходы и некоторые практические результаты / Н.В. Зайцева, И.В. Май, Ж. Реис, П.С. Спенсер, Д.А. Кирьянов, М.П. Камалудинов // Анализ риска здоровью. – 2021. – № 3. – С. 14–28. DOI: 10.21668/health.risk/2021.3.02

Research article

ON ESTIMATING THE ADDITIONAL INCIDENCE OF COVID-19 AMONG POPULATIONS EXPOSED TO POLLUTED AMBIENT AIR: METHODOLOGICAL APPROACHES AND SOME PRACTICAL RESULTS

N.V. Zaitseva¹, I.V. May¹, J. Reis², P.S. Spenser³, D.A. Kiryanov¹, M.R. Kamaltdinov¹

¹ Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies, 82 Monastyrskaya Str., Perm, 614045, Russian Federation

² University of Strasbourg, Faculté de Médecine, Strasbourg, 67205, France

³ Oregon Health & Science University, Portland, Oregon, 97201, USA

This research is vital due to the considerable global medical and demographic losses during the COVID-19 pandemic and the latest research works providing evidence of a correlation between air pollution and spread of the disease, its severity, clinical course and outcomes.

Our research goal was to quantitatively estimate the influence of ambient air pollution on SARS-CoV-2 spread among populations in six cities in the Russian Federation. These cities were among priority ones as per air pollution and were included in the "Clean air" Federal project (Bratsk, Krasnoyarsk, Norilsk, Omsk, Cherepovets, and Lipetsk).

Our hypothesis was that dynamic features of the infection spread would be different from an expected model of its epidemiologic process under exposure to environmental pollution. Regression and correlation analysis was performed for relationships between a daily deviation in actual incidence from a basic epidemiologic scenario and the average daily concentrations of chemicals in ambient air. The initial data were results obtained from instrument measurements of ambient air quality in the examined cities (approximately 10.8 thousand measurements covering 29 chemicals) and the daily incidence of COVID-19 from April 18, 2020 to July 31, 2021 (77,337 cases).

An authentic correlation between COVID-19 incidence and chemical concentrations in ambient air was detected in all six examined cities. The contribution of air pollution to COVID-19 prevalence amounted to 5.0 ± 2.6 % in five cities (Krasnoyarsk, Norilsk, Omsk, Cherepovets, and Lipetsk) over the examined period. In Bratsk, this value was about 33% and it requires additional research for either confirmation or correction. Growth in COVID-19 incidence in the examined territories is associated with particulate matter (PM₁₀, PM_{2.5}) and some other chemicals that can irritate the airway directly or indirectly (sulfuric acid vapors, hydrogen chloride, formaldehyde, hydrogen sulphide, etc.). Target levels were substantiated for several priority chemicals; should these levels be achieved, one would predict a decrease in COVID-19 prevalence by more than 1-3% in the examined cities.

We propose that population morbidity and mortality caused by COVID-19 require further studies, including those combined with medical and biological examination regarding efficiency of vaccination and post-vaccination immunity persistence on territories with elevated environmental pollution.

Key words: COVID-19, ambient air pollution, chemicals, target levels.

© Zaitseva N.V., May I.V., Reis J., Spenser P.S., Kiryanov D.A., Kamaltdinov M.R., 2021

Nina V. Zaitseva – Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Medical Sciences, Professor, Scientific Director (e-mail: znv@fcrisk.ru; tel.: +7 (342) 237-25-34; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2356-1145>).

Irina V. May – Doctor of Biological Sciences, Professor, Deputy Director responsible for research work (e-mail: may@fcrisk.ru; tel.: +7 (342) 237-25-47; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0976-7016>).

Jacques Reis – Doctor of Medical Sciences, Associate Professor (jacques.reis@wanadoo.fr; tel.: +33 3 68 85 00 00; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1216-4662>).

Peter S. Spenser – Professor (e-mail: spencer@ohsu.edu; tel.: +1 503-494-1085; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3994-2639>).

Dmitrii A. Kiryanov – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department for Mathematical Modeling of Systems and Processes; Associate Professor at Department for Human Ecology and Life Safety (e-mail: kda@fcrisk.ru; tel.: +7 (342) 237-18-04; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5406-4961>).

Marat R. Kamaltdinov – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior researcher acting as the Head of the Department for Situation Modeling and Expert and Analytical Management Techniques Laboratory (e-mail: kmr@fcrisk.ru; tel.: +7 (342) 237-18-04; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0969-9252>).

References

1. Becker S., Soukup, J.M. Exposure to urban air particulates alters the macrophage-mediated inflammatory response to respiratory viral infection. *J. Toxicol. Environ. Health A*, 1999, vol. 57, no. 7, pp. 445–457. DOI:10.1080/009841099157539
2. Cui Y., Zhang Z.-F., Froines J., Zhao J., Wang H., Yu S.-Z., Detels R. Air pollution and case fatality of SARS in the People's Republic of China: an ecologic study. *Environ. Health*, 2003, vol. 2, no. 1, pp. 15. DOI:10.1186/1476-069X-2-15
3. Ciencewicki J., Jaspers I. Air pollution and respiratory viral infection. *Inhal. Toxicol.*, 2007, vol. 19, no. 14, pp. 1135–1146. DOI:10.1080/08958370701665434
4. Troeger C., Forouzanfar M., Rao P.C., Khalil I., Brown A., Swartz S., Fullman N., Mosser J. [et al.]. Estimates of the global, regional, and national morbidity, mortality, and aetiologies of lower respiratory tract infections in 195 countries: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2015. *Lancet Infect. Dis.*, 2017, vol. 17, no. 11, pp. 1133–1161. DOI:10.1016/S1473-3099(17)30396-1
5. Su W., Wu X., Geng X., Zhao X., Liu Q., Liu T. The short-term effects of air pollutants on influenza-like illness in Jinan, China. *BMC Public Health.*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 1319. DOI:10.1186/s12889-019-7607-2
6. Katoto P.D.M.C., Brand A.S., Bakan B., Obadia P.M., Kuhangana C., Kayembe-Kitenge T., Kitenge J.P., Nkulu C.B.L. [et al.]. Acute and chronic exposure to air pollution in relation with incidence, prevalence, severity and mortality of COVID-19: a rapid systematic review. *Environment Health*, 2021, vol. 20, no. 1, pp. 41. DOI: 10.1186/s12940-021-00714-1
7. Zoran M.A., Savastru R.S., Savastru D.M., Tautan M.N. Assessing the relationship between ground levels of ozone (O₃) and nitrogen dioxide (NO₂) with coronavirus (COVID-19) in Milan, Italy. *Sci. Total. Environ.*, 2020, vol. 740, pp. 140005. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140005
8. Comunian S., Dongo D., Milani C., Palestini P. Air Pollution and COVID-19: The Role of Particulate Matter in the Spread and Increase of COVID-19's Morbidity and Mortality. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2020, vol. 17, no. 12, pp. 4487. DOI: 10.3390/ijerph17124487
9. Villeneuve P.J., Goldberg M.S. Methodological Considerations for Epidemiological Studies of Air Pollution and the SARS and COVID-19 Coronavirus Outbreaks. *Environ. Health Perspect.*, 2020, vol. 128, no. 9, pp. 95001. DOI: 10.1289/EHP7411
10. Chakraborty P., Jayachandran S., Padalkar P., Sitlhou L., Chakraborty S., Kar R., Bhaumik S., Srivastava M. Exposure to nitrogen dioxide (NO₂) from vehicular emission could increase the COVID-19 pandemic fatality in India: a perspective. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 2020, vol. 105, no. 2, pp. 198–204. DOI: 10.1007/s00128-020-02937-3
11. Fattorini D., Regoli F. Role of the chronic air pollution levels in the Covid-19 outbreak risk in Italy. *Environ. Pollut.*, 2020, vol. 264, pp. 114732. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.114732
12. Vasquez-Apestegui V., Parras-Garrido E., Tapia V., Paz-Aparicio V.M., Rojas J.P., Sánchez-Ccoyllo O.R., Gonzales G.F. Association between air pollution in Lima and the high incidence of COVID-19: findings from a post hoc analysis. *Res Sq.*, 2020, vol. 3, pp. 39404. DOI: 10.21203/rs.3.rs-39404/v1
13. Frontera A., Cianfanelli L., Vlachos K., Landoni G., Cremona G. Severe air pollution links to higher mortality in COVID-19 patients: the “double-hit” hypothesis. *J. Inf. Secur.*, 2020, vol. 81, no. 2, pp. 255–259. DOI: 10.1016/j.jinf.2020.05.031
14. Transmission of SARS-CoV-2: implications for infection prevention precautions: scientific brief, 09 July 2020. WHO, 2020, 10 p. Available at: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/333114/WHO-2019-nCoV-Sci_Brief-Transmission_modes-2020.3-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y (19.08.2021).
15. Van Doremalen N., Bushmaker T., Morris D.H., Holbrook M.G., Gamble A., Williamson B.N., Tamin A., Harcourt J.L. [et al.]. Aerosol and surface stability of SARS-CoV-2 as compared with SARS-CoV-1. *New England Journal of Medicine*, 2020, vol. 382, no. 16, pp. 1564–1567. DOI: 10.1056/NEJMc2004973
16. Wu X., Nethery R.C., Sabath M.B., Braun D., Dominici F. Exposure to air pollution and COVID-19 mortality in the United States: A nationwide cross-sectional study. *Med. Rxiv.*, 2020. DOI:10.1101/2020.04.05.20054502
17. Setti L., Passarini F., De Gennaro G., Barbieri P., Licen S., Perrone M.G., Piazzalunga A., Borelli M. [et al.]. Potential role of particulate matter in the spreading of COVID-19 in Northern Italy: first observational study based on initial epidemic diffusion. *BMJ Open.*, 2020, vol. 10, no. 9, pp. e039338. DOI:10.1136/bmjopen-2020-039338
18. Zhu Y., Xie J., Huang F., Cao L. Association between short-term exposure to air pollution and COVID-19 infection: evidence from China. *Sci. Total. Environ.*, 2020, vol. 727, pp. 138704. DOI:10.1016/j.scitotenv.2020.138704
19. Bontempi E. First data analysis about possible COVID-19 virus airborne diffusion due to air particulate matter (PM): the case of Lombardy (Italy). *Environ. Res.*, 2020, vol. 186, pp. 109639. DOI:10.1016/j.envres.2020.109639
20. Giani P., Castruccio S., Anav A., Howard D., Hu W., Crippa P. Short-term and long-term health impacts of air pollution reductions from COVID-19 lockdowns in China and Europe: a modelling study. *Lancet Planetary Health*, 2020, vol. 4, no. 10, pp. e474–e482. DOI: 10.1016/S2542-5196(20)30224-2
21. Domingo J.L., Marquès M., Rovira J. Influence of airborne transmission of SARS-CoV-2 on COVID-19 pandemic. A review. *Environmental Research*, 2020, vol. 188, pp. 109861. DOI: 10.1016/j.envres.2020.109861
22. Copat C., Cristaldi A., Fiore M., Grasso A., Zuccarello P., Signorelli S.S., Oliveri G., Ferrante C.M. The role of air pollution (PM and NO₂) in COVID-19 spread and lethality: a systematic review. *Environ. Res.*, 2020, vol. 191, pp. 110129. DOI:10.1016/j.envres.2020.110129
23. Bourdrel T., Annesi-Maesano I., Alahmad B., Maesano C.N., Bind M.-A. The impact of outdoor air pollution on COVID-19: a review of evidence from in vitro, animal, and human studies. *European respiratory review*, 2021, vol. 30, no. 159, pp. 200242. DOI:10.1183/16000617.0242-2020
24. Khan M.M.A., Khan M.N., Mustagir M.G., Rana J., Islam M.S., Kabir M.I. Effects of underlying morbidities on the occurrence of deaths in COVID-19 patients: a systematic review and meta-analysis. *J. Glob. Health*, 2020, vol. 10, no. 2, pp. 020503. DOI: 10.7189/jogh.10.020503
25. Bornstein S.R., Voit-Bak K., Schmidt D., Morawietz H., Bornstein A.B., Balanzew W., Julius U., Rodionov R.N. [et al.]. Is there a Role for Environmental and Metabolic Factors Predisposing to severe COVID-19. *Horm. Metab. Res.*, 2020, vol. 52, no. 7, pp. 540–546. DOI: 10.1055/a-1182-2016. Epub 2020 Jun 29

26. Ogen Y. Assessing nitrogen dioxide (NO₂) levels as a contributing factor to coronavirus (COVID-19) fatality. *Sci. Total. Environ.*, 2020, vol. 726, pp. 138605. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138605
27. Zagorodnov S. Dust contamination of the atmospheric air of the city as an undervalued risk factor to human health. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Prikladnaya ekologiya. Urbanistika*, 2018, vol. 30, no. 2, pp. 124–133. DOI: 10.15593/2409-5125/2018.02.10 (in Russian).
28. Kleyn S.V., Zaitseva N.V., Vekovshina S.A., Andrihunas A.M. Ambient air quality factors and people health. *20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020*, 2020, vol. 20, pp. 115–124. Available at: <https://www.sgem.org/index.php/elibrary?view=publication&task=show&id=7663> (02.09.2021).
29. Klyuev N.N., Yakovenko L.M. "Dirty" cities in Russia: factors determining air pollution. *Vestnik Rossiiskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*, 2018, vol. 26, no. 2, pp. 237–250. DOI: 10.22363/2313-2310-2018-26-2-237-250 (in Russian).
30. Revich B.A. Natsional'nyi proekt "Chistyiy vozdukh" v kontekste okhrany zdorov'ya naseleniya [National Clean Air Project in the context of public health protection]. *Ekologicheskii vestnik Rossii*, 2019, no. 4, pp. 64–69 (in Russian).
31. Kleyn S.V., Popova E.V. Hygienic assessment of ambient air quality in Chita, a priority area of the Federal Clean Air Project. *Zdorov'e naseleniya i sreda obitaniya*, 2020, vol. 333, no. 12, pp. 31–37 (in Russian).
32. Maksimova E.V., Kokoulina A.A., Perezhogin A.N., Zhdanova-Zaplesvichko I.G. Gigienicheskaya otsenka kachestva atmosfernogo vozdukhа g. Bratska do realizatsii meropriyatii federal'nogo proekta «Chistyiy vozdukh» [Hygienic assessment of the quality of atmospheric air in Bratsk before the implementation of the measures of the Federal Clean Air Project]. *Analiz riska zdorov'yu – 2020 sovmetno s mezhdunarodnoi vstrechei po okruzhayushchei srede i zdorov'yu Rise-2020 i kruglym stolom po bezopasnosti pitaniya: materialy X Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem*. In: A.Yu. Popova, N.V. Zaitseva eds. Perm, 2020, pp. 273–278 (in Russian).
33. Scherbatyuk A. Comparative estimation of environmental safety of air of some Russian Federation's federal districts. *Vestnik Zabaikal'skogo gosudarstvennogo universiteta*, 2017, vol. 23, no. 9, pp. 53–66. DOI: 10.21209/2227-9245-2017-23-9-53-66 (in Russian).
34. Il'ina S.V., Stepanenko L.A., Kiklevich V.T., Gavrilova T.A., Savilov E.D. Vaktsinoprofilaktika poliomieliita zhivoi poliovaktsinoi v usloviyakh ekologicheskogo neblagopoluchiya [Vaccine prophylaxis of poliomyelitis with live polio vaccine in environmental conditions]. *Sibirskii meditsinskii zhurnal (Irkutsk)*, 2005, vol. 56, no. S7, pp. 48–49 (in Russian).
35. Ilyina S.V., Dronova M.A., Kiklevich V.T., Savilov Ye. D., Briko N.I. Pertussis in children in high technogenically polluted 18 environmental areas. *Epidemiologiya i infeksionnye bolezni*, 2007, no. 1, pp. 18–20 (in Russian).
36. Makarova V., Ustinova O.Yu., Dolgikh O.V., Zagumennyh A.D. Immune profile and postvaccinal immune status for infections, controlled by the immunoprophylaxis implements for children under the combined aerogenic exposition by chemical anthropogenic substances. *Zdorov'e naseleniya i sreda obitaniya*, 2013, no. 11, pp. 27–29 (in Russian).
37. Popova A.Yu., Ezhlova E.B., Mel'nikova A.A., Balakhonov S.V., Chesnokova M.V., Dubrovina V.I., Lyalina L.V., Smirnov V.S. [et al.]. Experience in studying seroprevalence to SARS-CoV-2 virus in the population of the Irkutsk region during COVID-19 outbreak. *Problemy osobo opasnykh infektsii*, 2020, no. 3, pp. 106–113 (in Russian).
38. Anderson R.M., Heesterbeek H., Klinkenberg D., Hollingsworth T.D. How will country-based mitigation measures influence the course of the COVID-19 epidemic? *Lancet*, 2020, vol. 395, no. 10228, pp. 931–934. DOI:10.1016/s0140-6736(20)30567-5
39. Salathé M., Althaus C.L., Neher R., Stringhini S., Hodcroft E., Fellay J., Zwahlen M., Senti G. [et al.]. COVID-19 epidemic in Switzerland: On the importance of testing, contact tracing and isolation. *Swiss. Med. Wkly.*, 2020, vol. 150, pp. w20225. DOI:10.4414/smw.2020.20225
40. Padron-Regalado E. Vaccines for SARS-CoV-2: Lessons from Other Coronavirus Strains. *Infect. Dis. Ther.*, 2020, vol. 9, no. 2, pp. 1–20. DOI:10.1007/s40121-020-00300-x

Zaitseva N.V., May I.V., Reis J., Spenser P.S., Kiryanov D.A., Kamaltdinov M.R. On estimating the additional incidence of covid-19 among populations exposed to polluted ambient air: methodical approaches and some practical results. *Health Risk Analysis*, 2021, no. 3, pp. 14–28. DOI: 10.21668/health.risk/2021.3.02.eng

Получена: 30.04.2021

Принята: 23.09.2021

Опубликована: 30.09.2021