

ОПТИКА КЛАСТЕРОВ, АЭРОЗОЛЕЙ И ГИДРОЗОЛЕЙ

УДК 551.510.42

Оценка воздействия мелкодисперсного аэрозоля в воздухе города на частоту госпитализации больных с заболеваниями органов дыхания

Н.В. Дудорова[✉], Б.Д. Белан*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 25.10.2023;
после доработки 28.12.2023;
принята к печати 28.02.2024

Исследуется влияние мелкодисперсных частиц в городской атмосфере на частоту госпитализаций граждан с заболеваниями органов дыхания. Для анализа использовались данные TOR-станции о содержании мелкодисперсных частиц в атмосфере г. Томска диаметром менее 2,5 мкм, данные из реестра вызовов скорой медицинской помощи за 2010–2022 гг. о количестве госпитализаций в Томске по причинам заболеваний органов дыхания, а также коронавирусной инфекцией (коды МКБ-10 J00-J99, U07.1, U07.2). Показано, что при отсутствии в воздухе инфекционных агентов, вызывающих повышенное количество госпитализаций по причинам болезней органов дыхания, уровень загрязнения мелкодисперсным аэрозолем в Томске, а также продолжительность загрязненных периодов практически не увеличивают количество госпитализаций. Однако при наличии инфекционных агентов в воздухе (включая SARS-CoV-2) мелкодисперсный аэрозоль способствует более быстрому их переносу. В такие эпизоды, даже в условиях достаточно чистого воздуха города, такого как Томск, сравнительно небольшие концентрации $PM_{2.5}$ (30–50 мкг/м³) способны увеличить число госпитализаций по указанным выше причинам, включая коронавирусную инфекцию, в несколько раз без учета увеличения количества госпитализаций за счет сезонной заболеваемости или эпидемии.

Ключевые слова: $PM_{2.5}$, мелкодисперсный аэрозоль, загрязнение воздуха, здоровье, госпитализации, болезни органов дыхания, эпидемия, вирус, COVID-19; $PM_{2.5}$, particulate matter in the atmosphere, air pollution, health, hospitalization, respiratory system, epidemic, virus, COVID-19.

Введение

Взвешенные частицы (PM) являются одним из самых распространенных загрязнителей атмосферы, оказывающих негативное влияние на здоровье человека. Мелкодисперсные взвешенные частицы с аэродинамическим диаметром менее 2,5 мкм ($PM_{2.5}$) могут достигать бронхиол и альвеол, проникать в кровоток и далее попадать в любую ткань организма человека. До недавнего времени, изучая повреждающее воздействие частиц на организм человека, исследователи обращали больше внимание на количественные показатели аэрозоля в воздухе, игнорируя его состав. Так, в ряде работ анализируются риски возникновения или обострения астмы [1], пневмонии [2], ХОБЛ [3], эмфиземы [4], рак легких [5] и других заболеваний дыхательной системы человека [6–8] в зависимости от определенного уровня массовой концентрации аэрозоля в воздухе.

Также в литературе можно встретить обзорные статьи на тему влияния мелкодисперсных частиц на здоровье человека [9, 10] с описанием критериев и методов оценки такого влияния [11]. Предпринимались попытки установить предельно-допустимые концентрации содержания мелкодисперсных частиц в атмосфере, являющиеся условно безопасными для человека. В новом издании Глобальных рекомендаций ВОЗ по качеству воздуха от 2022 г. [12] определены уровни концентраций загрязняющих веществ, включая PM, соответствующие минимальному риску их воздействия на здоровье человека. Согласно [12] среднесуточные рекомендуемые уровни $PM_{2.5}$ и PM_{10} составляют 15 и 45 мкг/м³ соответственно.

В последние несколько лет во всем мире активно изучается вопрос о совместном воздействии на организм человека мелкодисперсных частиц и вирусов, вызывающих респираторные инфекции. В публикациях [13–16] приведены исследования синергетических эффектов между различными мелкодисперсными частицами в атмосфере и вирусом гриппа. Dong Zh. et al. [13], изучая вирус гриппа А (H1N1), показали что в отличие от инфекции, вызванной

* Нина Викторовна Дудорова (ninosh@mail.ru); Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru).

только вирусом, наличие $PM_{2.5}$ в воздухе облегчает интернализацию вируса рецептор-независимым путем. При этом в экспериментах на животных продемонстрировано, что $PM_{2.5}$ способствуют проникновению вируса H1N1 в дистальные отделы легкого и его транслокации во внелегочные органы, включая печень, селезенку и почки, приводя к тяжелым местным и системным нарушениям. Ma J.H. et al. [14] в исследованиях на мышах установили, что $PM_{2.5}$ вызывают повреждения клеток легочной ткани и подавляют механизмы иммунной защиты в легких, что способствует заражению гриппом А; сочетание $PM_{2.5}$ с инфекцией гриппа может повысить тяжесть пневмонии. Feng C. et al. [15] указали на сильную положительную взаимосвязь между наличием в атмосфере $PM_{2.5}$ и риском гриппоподобных заболеваний в сезон гриппа (октябрь – апрель). В сезон отсутствия гриппа (май – сентябрь) не было выявлено значительной связи между уровнями загрязнений и заболеваний. Lau S.Y. et al. [16], наоборот, не обнаружили статистически значимой связи между заболеваемостью гриппом и содержанием $PM_{2.5}$ в воздухе г. Ханчжоу, Китай.

Кроме гриппа была исследована связь с другими вирусными заболеваниями, передающимися воздушно-капельным путем. Так, например, S.A. Meo et al. [17] установили положительную взаимосвязь между увеличением концентрации $PM_{2.5}$ и ростом числа случаев заболеваний острой обструкцией. Vempilly J. et al. [18] указывали на то, что сочетание риновируса и наличие в воздухе $PM_{2.5}$ существенно ухудшает функцию дыхательных путей при астме. На основе статистических данных по 21 городу Китая G. Chen et al. [19] представили доказательства того, что рост заболеваемости корью связан с воздействием $PM_{2.5}$.

После начала пандемии COVID-19 было проведено большое количество исследований, направленных на изучение коронавирусов, в том числе их совместного с загрязнителями атмосферы воздействия на здоровье населения. Так, Б.А. Ревич с коллегами [20] рассмотрели три фактора риска для здоровья горожан: загрязнение атмосферного воздуха, повышенная плотность населения и недостаток зеленых пространств, – как причину повышенной заболеваемости и смертности от коронавирусной инфекции. Mendy A. et al. [21] отмечали, что увеличение частоты госпитализаций населения Огайо с диагнозом COVID-19 связано с длительным воздействием $PM_{2.5}$. Baron Y.M. [22] описывали ряд механизмов совместного действия вируса SARS-CoV-2 и $PM_{2.5}$, увеличивающих заболеваемость и смертность населения от COVID-19. В работе М.А. Zorap [23] рассмотрено сильное влияние мелкодисперсных частиц в городской атмосфере на вспышку COVID-19 в Милане.

Все упомянутые выше исследования проведены в сильно загрязненных городах с большой плотностью населения. Практически во всех публикациях указывается на связь высокого загрязнения атмосферы и увеличения заболеваемости.

Цель нашего исследования – изучить влияние небольших концентраций $PM_{2.5}$ на частоту госпитализаций больных с заболеваниями органов дыхания, включая коронавирусную инфекцию, в средненаселенном городе России.

1. Материалы и методы

Исследование проводилось в г. Томске (областной центр Томской области Сибирского Федерального округа) – среднем по площади и количеству жителей городе России. Согласно [24] с 2019 г. Томск находится в группе российских городов с низким уровнем загрязнения атмосферного воздуха [25].

В работе использовались данные о содержании $PM_{2.5}$ в атмосфере Томска. Массовая концентрация взвешенных частиц (m) рассчитывалась на основе ежечасных измерений счетной концентрации аэрозоля (при этом плотность частиц принималась равной $1,5 \text{ г/см}^3$) на TOR-станции Томска. Технические характеристики станции приведены в работе [26].

Для оценки корректной экстраполяции данных измерений атмосферных параметров с одной станции на весь город применялись результаты серии исследований атмосферы Томска с помощью мобильной станции АКВ-2 [27–29]. На рис. 1, а показана межгодовая изменчивость среднесуточных массовых концентраций $PM_{2.5}$ в воздухе Томска. Видно, что в среднем в городе уровень загрязнения воздуха мелкодисперсным аэрозолем невысокий, среднесуточное значение массовой концентрации $PM_{2.5}$ за рассматриваемый период составляет 9 мкг/м^3 . Также на графике можно отметить пиковые значения $PM_{2.5}$ с коротким временным периодом. Зимой повышенные значения $PM_{2.5}$ связаны с жизнедеятельностью города, а летом – с изменениями атмосферы во всем регионе, например с лесными пожарами. Более подробное описание аэрозольного режима в Томске представлено в [30].

Фактические данные о количестве экстренных госпитализаций в стационары Томска по поводу болезней органов дыхания (БОД), а также коронавирусной инфекции (коды МКБ-10 J00-J99, U07.1, U07.2) с 2005 по 2022 г. предоставлены Областным государственным автономным учреждением здравоохранения «Станция скорой медицинской помощи» [31]. На рис. 1, б показана многолетняя изменчивость суточного количества госпитализаций жителей Томска с диагнозами БОД и коронавирусная инфекция. Пунктирными линиями на графике обозначены границы трех периодов. Ввиду того, что измерения концентрации аэрозоля начались с марта 2010 г., период 1 был исключен из исследования, хотя среднее количество госпитализаций рассчитывалось за два первых периода. Особенно выделяется на графике период 3, характеризующийся эпидемией COVID-19. В Томске подъем заболеваемости коронавирусной инфекцией и беспрецедентное увеличение количества госпитализаций граждан начались с апреля 2020 г. и продолжались по май 2022 г.

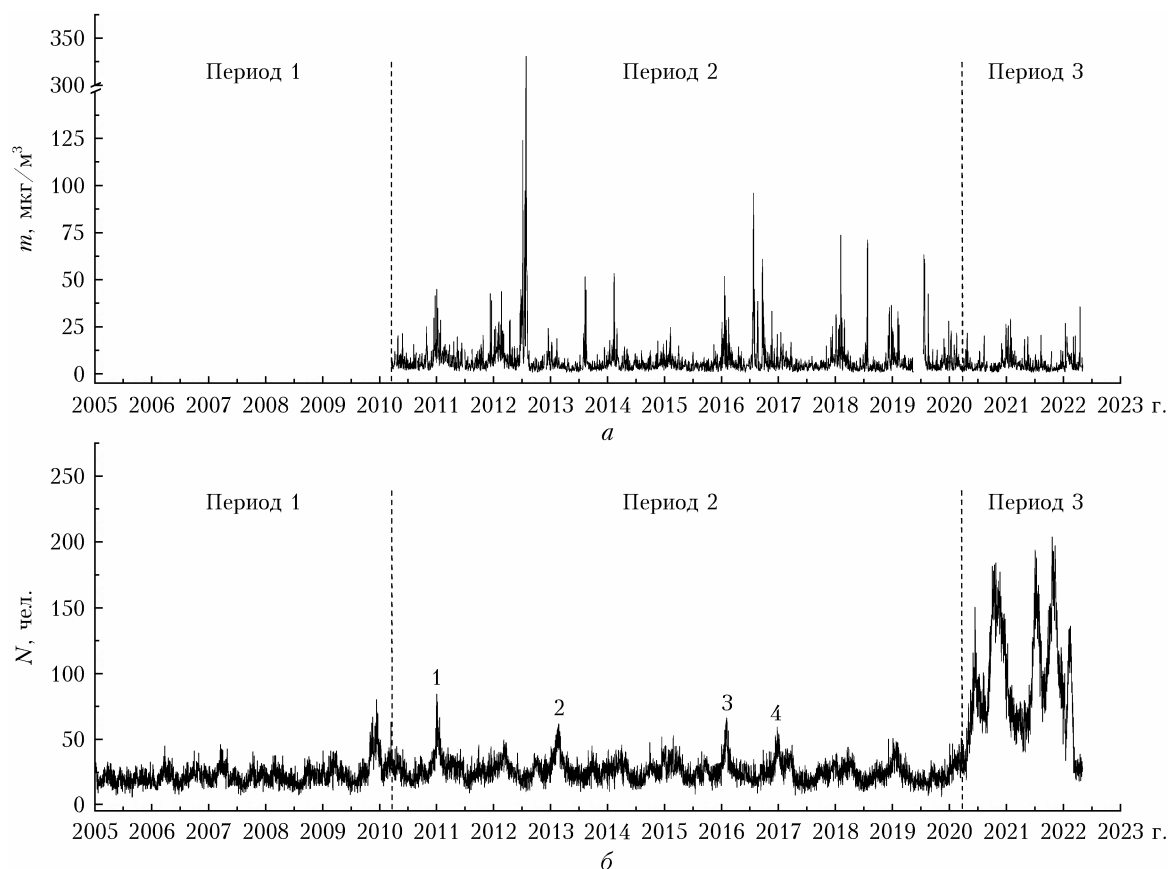


Рис. 1. Межгодовая изменчивость среднесуточной массовой концентрации $PM_{2,5}$ в городском воздухе (а) и суточного количества госпитализаций больных с заболеваниями органов дыхания и коронавирусной инфекцией в Томске (б)

Таким образом, период исследования составил 12 лет (с марта 2010 по май 2022 г.) и был условно поделен на две части: с марта 2010 по март 2020 г. (доковидное время) и с апреля 2020 по май 2022 г. (период коронавирусной инфекции). В периоде 2 на графике видны эпизоды 1–4 с увеличением числа госпитализаций более чем в 1,3 раза относительно среднего многолетнего значения (в общей сложности 211 сут.)

В таблице представлены характеристики этих эпизодов. Видно, что эпизоды 2 и 4 были относительно «чистыми» в плане загрязнения воздуха аэрозолями, максимальные значения среднесуточной

концентрации $PM_{2,5}$ не превышали 21 мкг/м^3 . Эпизоды 1 и 3 были более загрязненными, среднесуточная концентрация $PM_{2,5}$ доходила до 52 мкг/м^3 .

Ввиду того, что все отмеченные эпизоды приходились на зиму, а у данного класса заболеваний имеется хорошо выраженный годовой ход, то за критерий, позволяющий выделить такой эпизод, принимался коэффициент $E_p > 1,3$, который рассчитывался по формуле

$$E_p = J_{100} / J_{100}^{\text{ср.с}},$$

где J_{100} — количество ежесуточных госпитализаций по причине БОД, приведенное к 100 тыс. населения города; $J_{100}^{\text{ср.с}}$ — среднее значение J_{100} за сезон, рассчитанное за период 2005–2020 гг.

Характеристики эпизодов, отличающихся увеличением частоты случаев госпитализаций по причинам БОД

№	Эпизод	Кол-во дней	Суточное количество госпитализаций, чел.		$PM_{2,5}$, мкг/м^3	
			Среднее	Максимальное	Среднее	Максимальное
1	25.12.2010–27.01.2011	34	53	84	15,06	44,76
2	02.01.2013–28.03.2013	86	41	62	5,68	18,60
3	02.01.2016–27.02.2016	57	42	67	13,48	51,69
4	11.12.2016–13.01.2017	34	43	59	5,62	20,90

2. Результаты и обсуждение

2.1. Влияние увеличения концентрации $PM_{2,5}$ на частоту госпитализаций в г. Томске

Первая задача нашего исследования — изучить влияние увеличения концентрации $PM_{2,5}$ на частоту госпитализаций в Томске в эпизоды 1–4. Для анализа колебаний количества госпитализаций по причинам БОД, которые, как мы полагаем, могут

быть связаны с загрязнением атмосферы, необходимо исключить прирост числа госпитализаций за счет сезонной заболеваемости. В связи с этим из временного хода ежедневных госпитализаций N вычиталось скользящее среднее данного временного хода с интервалом усреднения 10 сут ($\Delta = N - \langle N \rangle_{10}$). Предполагаем, что именно положительные значения приращения количества госпитализаций ($+\Delta$) связаны с неблагоприятным воздействием загрязнителей.

Было замечено, что количество госпитализаций увеличивалось в сам день или ближайшие дни от даты увеличения концентрации $PM_{2,5} > 10$ мкг/м³. Увеличение числа госпитализаций за сутки до превышения содержания $PM_{2,5} > 10$ мкг/м³ ($+\Delta[-1_1]$) можно объяснить тем, что станция измерения концентрации аэрозоля располагалась на окраине города и, следовательно, фиксировала увеличения концентрации аэрозоля, связанные с жизнедеятельностью города, с некоторым запаздыванием. Для снижения влияния случайной ошибки измерений были вычислены скользящие средние $+\Delta$ и $PM_{2,5}$ с интервалом усреднения 3 сут ($+\Delta[-1_1]$, $PM_{2,5}[-1_1]$), построены диаграммы зависимостей и проведены линии трендов, рассчитанные на основе метода наименьших квадратов.

На рис. 2 показана диаграмма рассеяния $+\Delta[-1_1]$ и $PM_{2,5}[-1_1]$ во все даты выбранных эпизодов сезонного увеличения числа госпитализаций. Можно отметить прирост количества госпитализаций при увеличении концентрации $PM_{2,5}$ в воздухе Томска.

На рис. 3 показан временной ход массовой концентрации $PM_{2,5}$ и приращений количества госпитализаций в эпизоды 1–4. Можно увидеть, что каждому пиковому значению $PM_{2,5}$ соответствует пиковое значение приращения количества госпитализаций по причинам БОД либо в тот же день, либо со смещением на 1–2 дня. Стоит отметить, что такие запаздывания приращений количества госпитализаций относительно пиков $PM_{2,5}$ иногда

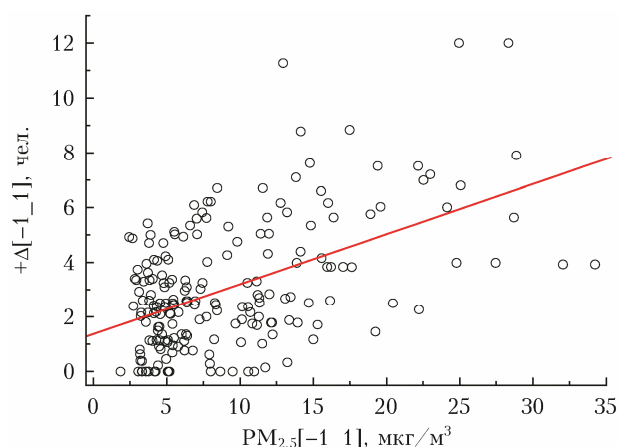


Рис. 2. Зависимость приращений количества госпитализаций по причинам БОД от усредненной за три дня массовой концентрации аэрозоля во все эпизоды (кружочки); сплошная кривая – тренд

существенно занижают коэффициенты их взаимной корреляции. Так, в эпизоде 1 можно наблюдать полное соответствие пиковых значений обеих переменных. Коэффициент корреляции между указанными величинами составил 0,69 с уровнем значимости 0,001. В эпизоде 3 он был ниже за счет большего лага между некоторыми пиками $+\Delta[-1_1]$ и $PM_{2,5}[-1_1]$. Очевидно, что наличие $PM_{2,5}$ в воздухе города является немаловажным фактором роста интенсивности сезонной заболеваемости населения, увеличивая нагрузку на систему здравоохранения в виде большего количества госпитализируемых граждан с БОД.

Вторая задача нашего исследования – изучить влияние увеличения концентрации $PM_{2,5}$ на частоту госпитализаций в Томске, исключая эпизоды 1–4. На рис. 4 показаны диаграммы рассеяния $+\Delta[-1_1]$ и $PM_{2,5}[-1_1]$ во все сезоны с марта 2010 по март 2020 г. Видно, что в данном случае нельзя говорить о повреждающем действии аэрозоля в Томске на организм человека. Даже летом 2012 г. (рис. 4, в),

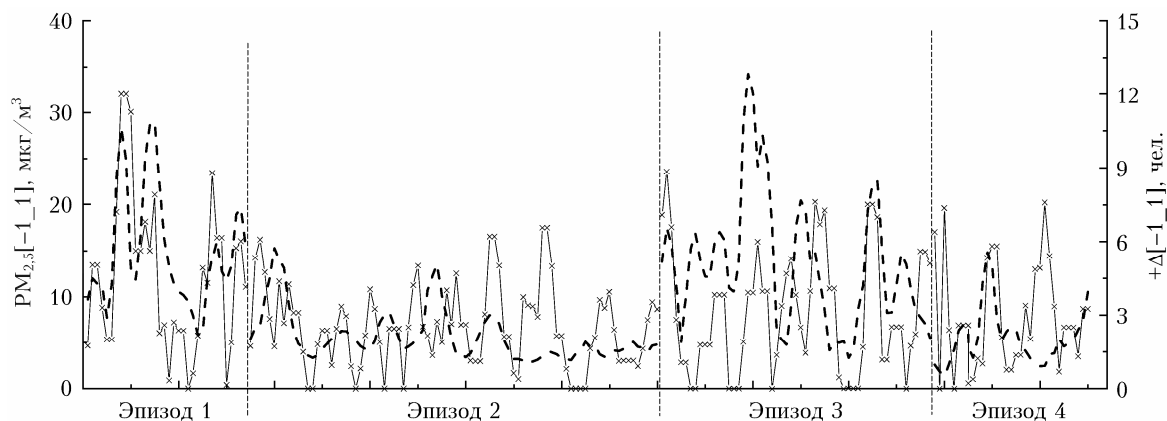


Рис. 3. Сравнение массовой концентрации $PM_{2,5}$ (штриховая кривая) и приращений количества госпитализаций по причинам БОД (кривая с символами) в эпизоды 1–4

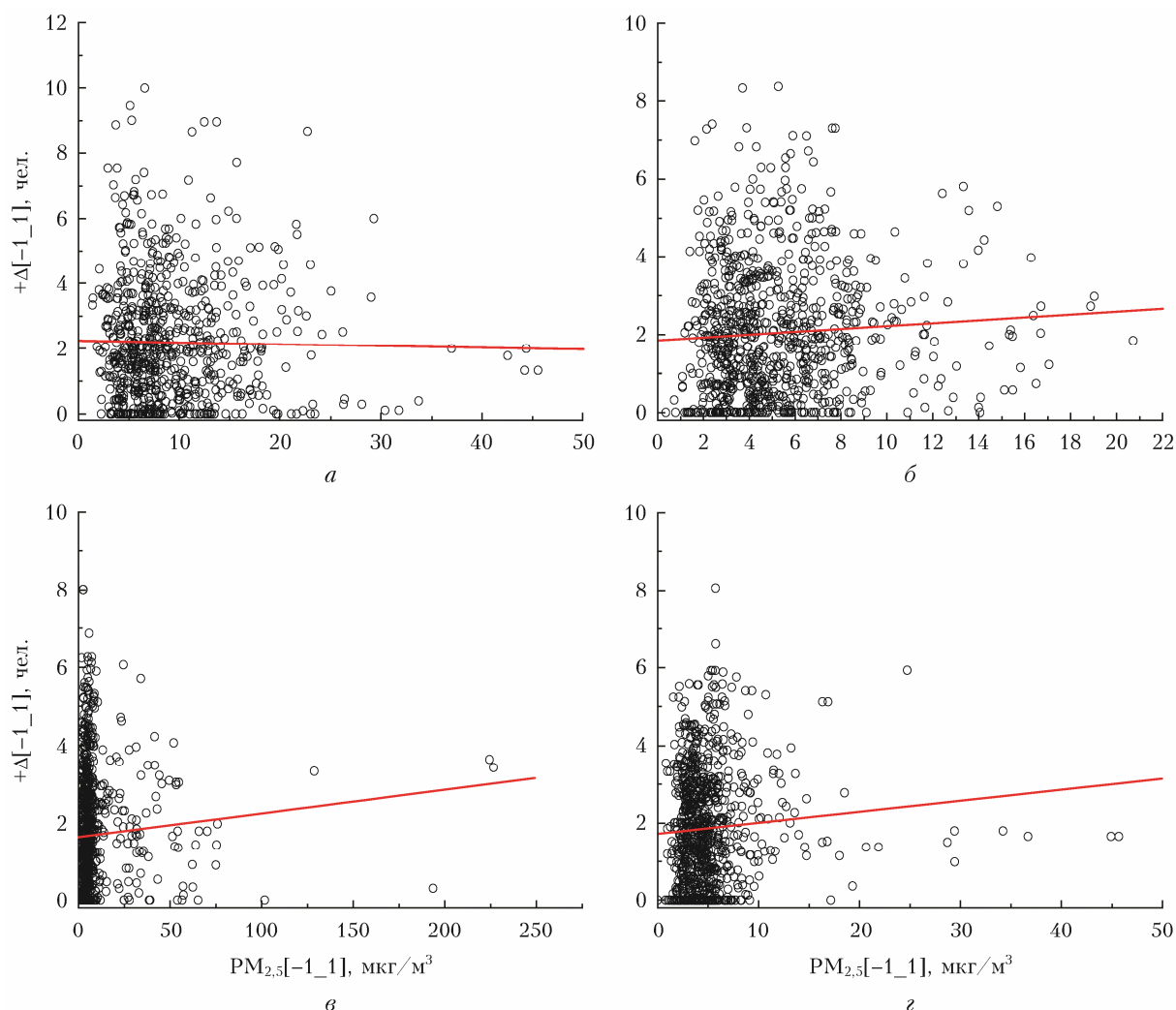


Рис. 4. Диаграммы рассеяния $+Δ[-1_1]$ и $PM_{2.5}[-1_1]$ с марта 2010 по март 2020 г.: а — зима, исключая эпизоды 1–4; б — весна; в — лето; г — осень

когда в Томске довольно продолжительное время наблюдались лесные пожары и среднесуточное значение $PM_{2.5}$ достигало 330 мкг/м^3 , мы не заметили всплеска госпитализаций граждан с БОД.

Можно отметить, что эпизоды 1–4 приходились на холодное время года и соответствовали сезонному увеличению количества госпитализаций. Однако не во всех холодных сезонах периода 2 отмечались подобные эпизоды повышенного количества госпитализаций, хотя концентрация $PM_{2.5}$ в воздухе Томска увеличивается каждую зиму. Поэтому можно сделать вывод, что кроме присутствия в воздухе $PM_{2.5}$ должны обнаруживаться какие-то особенные инфекционные агенты, которые в совокупности с $PM_{2.5}$ вызывают заметное увеличение количества госпитализаций по причинам БОД. К сожалению, природу этих агентов нам установить не удалось. Процентные распределения первичных диагнозов госпитализируемых в эпизоды 1–4 не отличались от соседних периодов.

2.2. Влияние длины промежутка времени с концентрацией $PM_{2.5} > 10 \text{ мкг/м}^3$ на количество госпитализаций по причинам БОД в г. Томске

За период 2, исключая эпизоды 1–4, выделены промежутки времени, когда концентрация $PM_{2.5}$ в воздухе Томска была выше 10 мкг/м^3 . В итоге был выбран 151 промежуток, из которых в 81 концентрация $PM_{2.5} > 10 \text{ мкг/м}^3$ в течение 1 сут; в 37 — 2–4 сут; в 16 — 5–9 сут; в 17 — ≥ 10 сут. Для снижения случайной ошибки измерений в эти промежутки были добавлены сутки до повышения и сутки после понижения указанной концентрации $PM_{2.5}$. Для выбранных промежутков рассчитывались максимальные (max) и средние (mean) значения $+Δ$. Зависимости этих значений от количества дней, когда $PM_{2.5} > 10 \text{ мкг/м}^3$, приведены на рис. 5. Аналогичные зависимости от средней и максимальной концентраций $PM_{2.5}$ показаны на рис. 6.

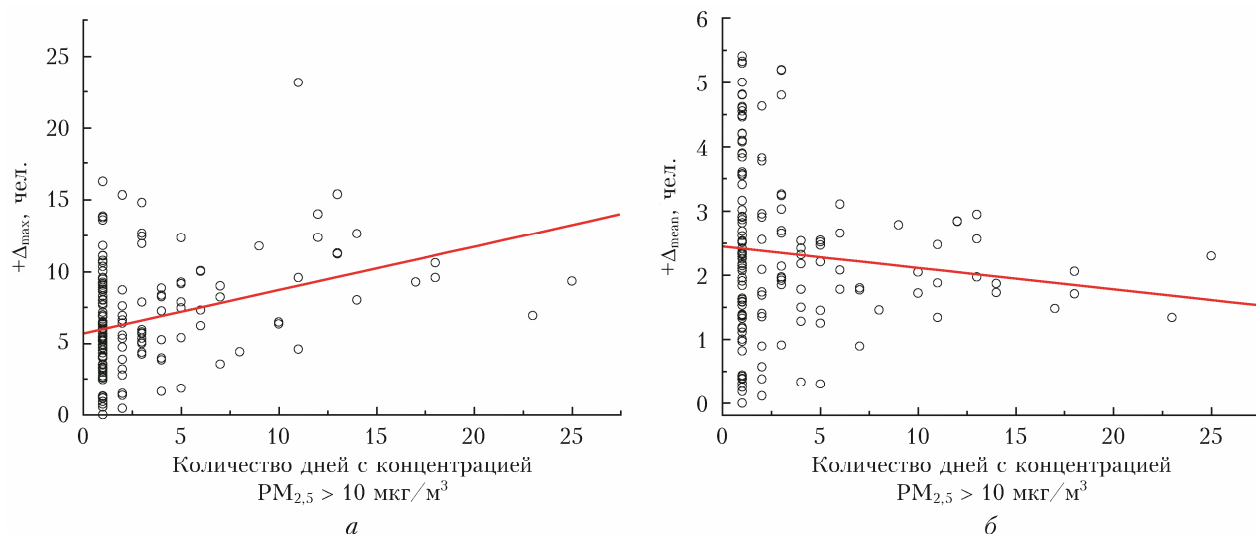


Рис. 5. Зависимость максимальных (а) и средних значений (б) $+\Delta$ для промежутков времени с концентрацией $PM_{2,5} > 10 \text{ мкг/м}^3$ от количества дней в этих промежутках

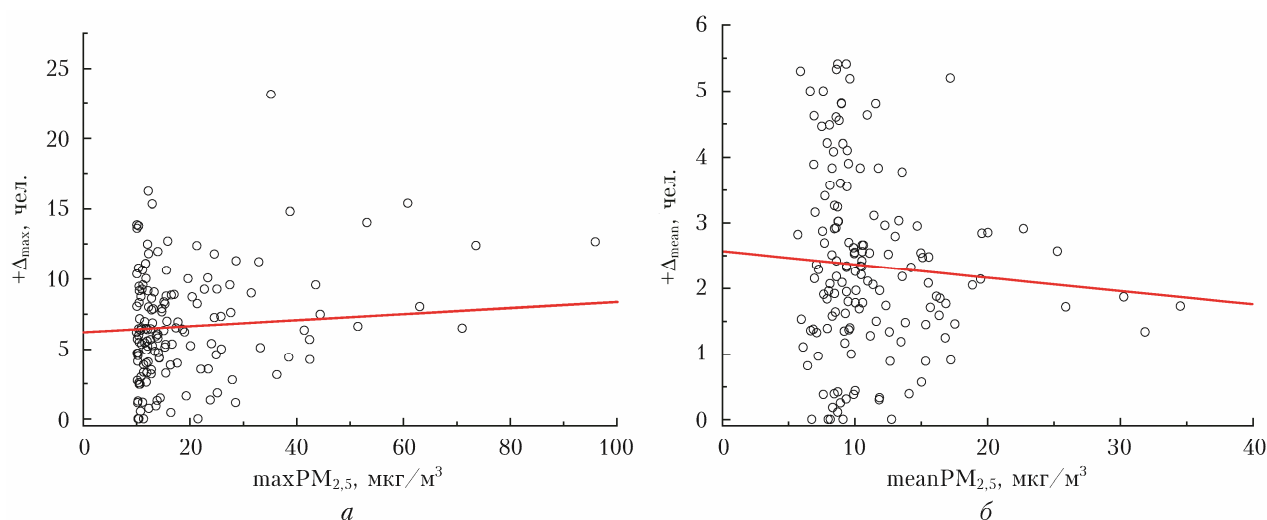


Рис. 6. Зависимость максимальных (а) и средних значений (б) $+\Delta$ (БОД) для промежутков времени с концентрацией $PM_{2,5} > 10 \text{ мкг/м}^3$ от максимальных и средних концентраций $PM_{2,5}$ за период 2 без учета эпизодов 1–4

Видно, что при отсутствии инфекционных агентов, вызывающих повышенное количество госпитализаций по причинам БОД, в Томске увеличение длительности периода с концентрацией $PM_{2,5} > 10 \text{ мкг/м}^3$ приводит к росту максимального суточного количества госпитализаций за каждый рассмотренный промежуток времени (рис. 5, а), но в среднем за каждый промежуток число госпитализированных существенно не изменится (рис. 5, б). Уровень концентрации $PM_{2,5}$ (как максимальный, так и средний) в рассматриваемых условиях умеренно загрязненной атмосферы при отсутствии возбудителей инфекционных заболеваний, вызывающих повышенное количество госпитализаций по причинам БОД, практически не влияет на число госпитализаций (рис. 6).

2.3. Влияние $PM_{2,5}$ на распространение коронавирусной инфекции среди населения г. Томска

Дополнительной задачей нашего исследования являлась оценка влияния мелкодисперсного аэрозоля на распространение коронавирусной инфекции среди населения г. Томска. Ввиду того, что пандемия COVID-19 длилась продолжительное время, было принято решение выделить такое исследование отдельным пунктом. Надо отметить, что период коронавирусной инфекции (01.04.2020–01.05.2022 гг.) в Томске характеризовался довольно чистым воздухом. Поэтому задача решалась подобно разд. 2 нашего исследования на основе выбора промежутков времени с концентрацией $PM_{2,5} > 10 \text{ мкг/м}^3$ и расчета по ним средних и максимальных значений

$PM_{2,5}$ и $+Δ$. За два исследуемых года наблюдалось 64 дня с концентрацией $PM_{2,5} > 10 \text{ мкг/м}^3$. Было выбрано 32 временных промежутка, из которых 20 содержали 1 сут с концентрацией выше указанной, 10 – 2–4 сут, 2 – 5–9 сут. Для выбранных промежутков времени рассчитывались максимальные и средние значения $+Δ$ и $PM_{2,5}$. Зависимости этих значений от количества дней и концентрации $PM_{2,5}$ за период 3 приведены на рис. 7 и 8.

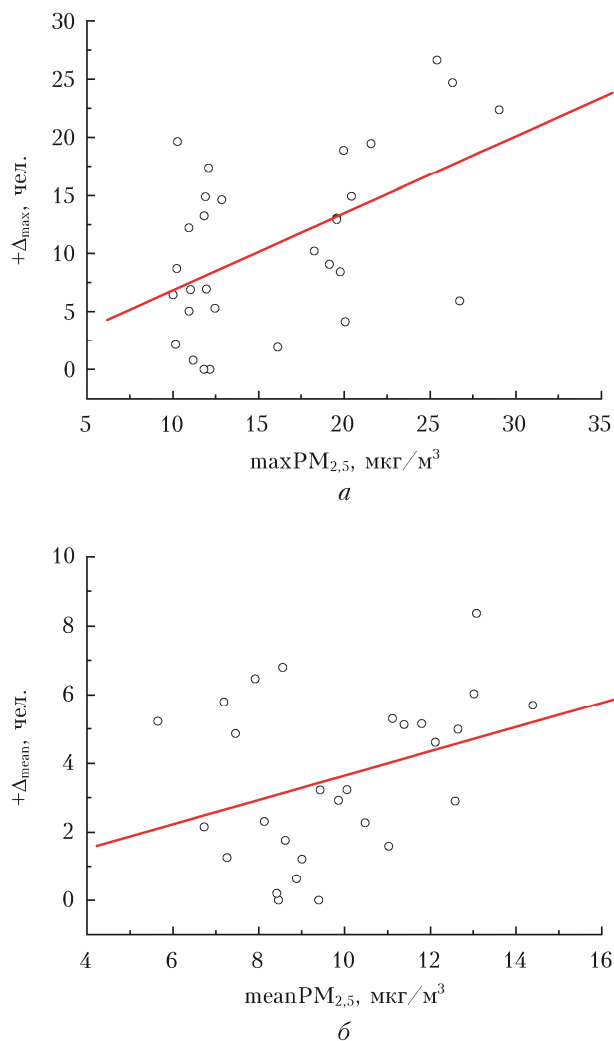


Рис. 7. Зависимость максимальных (а) и средних (б) значений $+Δ$ (COVID-19) от $PM_{2,5}$ в промежутках времени с концентрацией $PM_{2,5} > 10 \text{ мкг/м}^3$

Можно отметить, что коронавирусная инфекция распространяется быстрее в загрязненной атмосфере и охватывает большее количество граждан, чем в условиях более чистой атмосферы (рис. 7). Кроме того, рост количества дней подряд со среднесуточной концентрацией $PM_{2,5} > 10 \text{ мкг/м}^3$ увеличивает не только нагрузку на систему здравоохранения в отдельные дни, но и количество госпи-

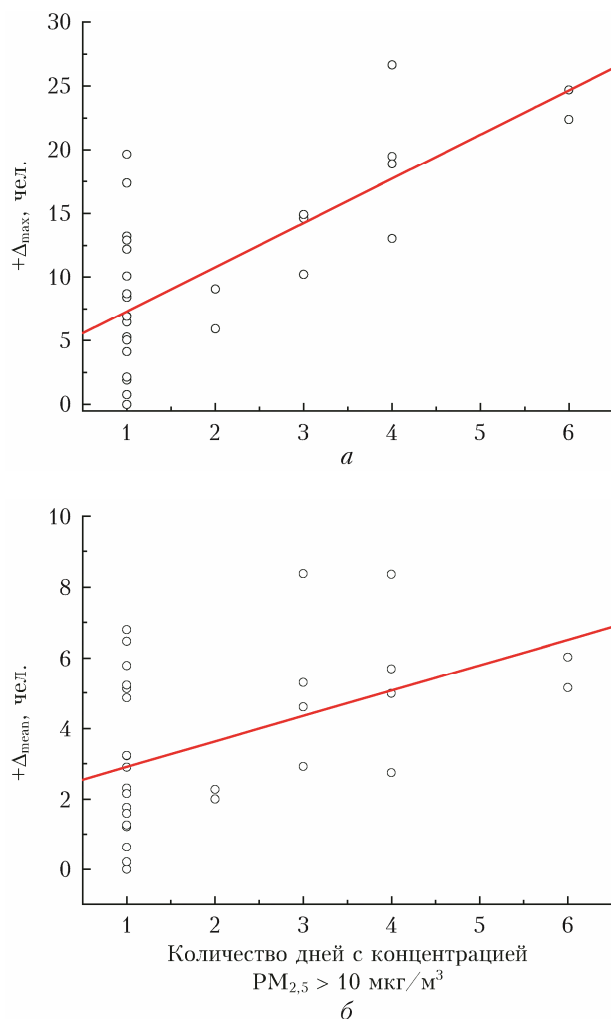


Рис. 8. Зависимость максимальных и средних значений $+Δ$ (COVID-19) от количества дней в промежутках времени с концентрацией $PM_{2,5} > 10 \text{ мкг/м}^3$

тализаций в среднем за выбранный временной промежуток (рис. 8).

Заключение

На основе результатов нашего исследования можно заключить, что при отсутствии в воздухе возбудителей инфекционных заболеваний, вызывающих повышенное количество госпитализаций по причинам БОД, уровень загрязнения мелкодисперсным аэрозолем в Томске, а также продолжительность промежутков времени с концентрацией $PM_{2,5} > 10 \text{ мкг/м}^3$ не влияют на здоровье населения, хотя в отдельные дни $PM_{2,5} > 10 \text{ мкг/м}^3$ увеличивает нагрузку на систему здравоохранения в виде большего количества госпитализируемых с заболеваниями органов дыхания. Однако при условии появления в воздухе инфекционных агентов мелкодисперсный аэрозоль способствует их более быстрому переносу, заражая большее количество

граждан, чем было бы в чистой атмосфере. В такие эпизоды, даже в условиях достаточно чистого воздуха города, такого как Томск, сравнительно небольшие концентрации $PM_{2.5}$ (30–50 мкг/м³) способны увеличить количество госпитализаций по причинам болезней органов дыхания, включая коронавирусную инфекцию, в несколько раз без учета увеличения количества госпитализаций за счет сезонной заболеваемости или эпидемии.

Благодарности. Авторы выражают благодарность за предоставленные медицинские данные сотрудникам ОГАУЗ «ССМП» главврачу Николаю Валерьевичу Родионову, Олегу Ефимовичу Шубе.

Финансирование. Исследование проведено в рамках госзадания ИОА СО РАН.

Список литературы

1. Fan J., Li S., Fan C., Bai Z., Yang K. The impact of $PM_{2.5}$ on asthma emergency department visits: A systematic review and meta-analysis // *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2016. V. 23, N 1. P. 843–850. DOI: 10.1007/s11356-015-5321-x.
2. Jia H., Liu Y., Guo D., He W., Zhao L., Xia S. $PM_{2.5}$ – induced pulmonary inflammation via activating of the NLRP3/caspase-1 signaling pathway // *Environ. Toxicol.* 2021. V. 36, N 3. P. 298–307. DOI: 10.1002/tox.23035.
3. Yang X., Zhang T., Zhang Y., Chen H., Sang S. Global burden of COPD attributable to ambient $PM_{2.5}$ in 204 countries and territories, 1990 to 2019: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019 // *Sci. Total. Environ.* 2021. V. 796. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.148819.
4. Xu F., Xu A., Guo Y., Bai Q., Wu X., Ji S.P., Xia R.X. $PM_{2.5}$ exposure induces alveolar epithelial cell apoptosis and causes emphysema through p53/Siva-1 // *Eur. Rev. Med. Pharmacol. Sci.* 2020. V. 24, N 7. P. 3943–3950. DOI: 10.26355/eurev_202004_20863.
5. Hamra G.B., Guha N., Cohen A., Laden F., Raaschou-Nielsen O., Samet J.M., Vineis P., Forastiere F., Saldiva P., Yorifuji T., Loomis D. Outdoor particulate matter exposure and lung cancer: A systematic review and meta-analysis // *Environ. Health. Perspect.* 2014. V. 122, N 9. P. 906–911. DOI: 10.1289/ehp/1408092.
6. Lei J., Chen R., Liu C., Zhu Y., Xue X., Jiang Y., Shi S., Gao Y., Kan H., Xuan J. Fine and coarse particulate air pollution and hospital admissions for a wide range of respiratory diseases: A nationwide case-crossover study // *Int. J. Epidemiol.* 2023. V. 52, N 3. P. 715–726. DOI: 10.1093/ije/dyad056.
7. Лю М.Б., Ибрагимова Н.А., Адамбеков Д.А. Оценка заболеваемости населения г. Алматы легочными болезнями в контексте с загрязнением атмосферного воздуха // *Наука и здравоохранение.* 2019. № 4. С. 90–99.
8. De P Pablo-Romero M., Román R., Limyn J.M., Praena-Crespo M. Effects of fine particles on children's hospital admissions for respiratory health in Seville, Spain // *J. Air. Waste. Manag. Assoc.* 2015. V. 65, N 4. P. 436–444. DOI: 10.1080/10962247.2014.1001499.
9. Титова А.Г., Заняткин И.А., Волкова А.Г., Нечаев Д.Н., Трусов Г.А. Эпигенетические маркеры воздействия твердых частиц с разным аэродинамическим диаметром на здоровье человека: обзор литературы // *Экология человека.* 2021. № 5. С. 4–12. DOI: 10.33396/1728-0869-2021-5-4-12.
10. Ревич Б.А. Мелкодисперсные взвешенные частицы в атмосферном воздухе и их воздействие на здоровье жителей мегаполисов // *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем.* 2018. Т. XXIX, № 3. С. 53–78. DOI: 10.21513/0207-2564-2018-3-53-78.
11. Гриценко Т.Д., Просвирякова И.А., Ганькин А.Н., Пшегорода А.Е., Соколов С.М. Гигиеническая оценка дополнительных случаев заболеваемости от воздействия мелкодисперсных твердых частиц // *Материалы X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием: в 2 т. / под ред. А.Ю. Поповой, Н.В. Зайцевой.* Пермь: Перм. национал. исслед. политехн. ун-т, 2020. Т. 1. С. 370–378.
12. *Глобальные рекомендации ВОЗ по качеству воздуха: касающиеся твердых частиц ($PM_{2.5}$ и PM_{10}), озона, двуокиси азота, двуокиси серы и окиси углерода.* Женева: ВОЗ, 2021. С. 11.
13. Dong Zh., Ma J., Qiu J., Ren Q., Shan Q., Duan X., Li G., Zuo Y.Y., Qi Y., Liu Y., Liu G., Lynch I., Fang M., Liu S. Airborne fine particles drive H1N1 viruses deep into the lower respiratory tract and distant organs // *Sci. Adv.* 2023. V. 9, N 23. DOI: 10.1126/sciadv.adf2165.
14. Ma J.H., Song S.H., Guo M., Zhou J., Liu F., Peng L., Fu Z.R. Long-term exposure to $PM_{2.5}$ lowers influenza virus resistance via down-regulating pulmonary macrophage Kdm6a and mediates histones modification in IL-6 and IFN- β promoter regions // *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 2017. V. 493, N 2. P. 1122–1128. DOI: 10.1016/j.bbrc.2017.09.013.
15. Feng C., Li J., Sun W., Zhang Y., Wang Q. Impact of ambient fine particulate matter ($PM_{2.5}$) exposure on the risk of influenza-like-illness: A time-series analysis in Beijing, China // *Environ. Health.* 2016. V. 15, N 17. DOI: 10.1186/s12940-016-0115-2.
16. Lau S.Y., Cheng W., Yu Z., Mohammad K.N., Wang M.H., Zee B.C., Li X., Chong K.C., Chen E. Independent association between meteorological factors, $PM_{2.5}$, and seasonal influenza activity in Hangzhou, Zhejiang province, China // *Influenza Other Respir. Viruses.* 2021. V. 15, N 4. P. 513–520. DOI: 10.1111/irv.12829.
17. Meo S.A., Alqahtani S.A., Meo A.S., Alkhalifah J.M., Al-Khlaifi T., Klonoff D.C. Environmental pollutants $PM_{2.5}$, PM_{10} , nitrogen dioxide (NO_2), and ozone (O_3) association with the incidence of monkeypox cases in European countries // *J. Trop. Med.* 2023. V. 2023. DOI: 10.1155/2023/9075358.
18. Vempilly J., Abejie B., Diep V., Gushiken M., Rawat M., Tyner T.R. The synergetic effect of ambient $PM_{2.5}$ exposure and rhinovirus infection in airway dysfunction in asthma: A pilot observational study from the Central Valley of California // *Exp. Lung. Res.* 2013. V. 39, N 10. P. 434–440. DOI: 10.3109/01902148.2013.840693.
19. Chen G., Zhang W., Li S., Williams G., Liu C., Morgan G.G., Jaakkola J.J.K., Guo Y. Is short-term exposure to ambient fine particles associated with measles incidence in China? A multi-city study // *Environ. Res.* 2017. V. 156. P. 306–311. DOI: 10.1016/j.envres.2017.03.046.
20. Ревич Б.А., Шапошников Д.А. Пандемия COVID-19: новые знания о влиянии качества воздуха на распространение коронавирусной инфекции в городах // *Проблемы прогнозирования.* 2021. № 4. С. 28–35. DOI: 10.47711/0868-6351-187-28-37.
21. Mendy A., Wu X., Keller J.L., Fassler C.S., Apewokin S., Mersha T.B., Xie Ch., Pinney S.M. Air pollution and the pandemic: Long-term $PM_{2.5}$ exposure and disease severity in COVID-19 patients // *Respirology.*

2021. V. 26, N 12. P. 1181–1187. DOI: 10.1111/resp.14140.
22. Baron Y.M. Are there medium to short-term multifaceted effects of the airborne pollutant PM_{2.5} determining the emergence of SARS-CoV-2 variants? // Med. Hypotheses. 2021. V. 158. DOI: 10.1016/j.mehy.2021.110718.
23. Zoran M.A., Savastru R.S., Savastru D.M., Tautan M.N. Assessing the relationship between surface levels of PM_{2.5} and PM₁₀ particulate matter impact on COVID-19 in Milan, Italy // Sci. Total. Environ. 2020. V. 738. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139825.
24. РД 52.04.667-2005 Документы о состоянии загрязнения атмосферы в городах для информирования государственных органов, общественности и населения. Общие требования к разработке, построению, изложению и содержанию. М.: Метеоагентство Росгидромета, 2006.
25. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Список городов России с наибольшим уровнем загрязнения атмосферного воздуха. М., 2023. URL: <http://voeikovmgo.ru/?id=681lang=ru&lang=ru> (дата обращения: 17.02.2023.).
26. Давыдов Д.К., Белан Б.Д., Антохин П.Н., Антохина О.Ю., Антонович В.В., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Ахлестин А.Ю., Белан С.Б., Дудорова Н.В., Ивлёв Г.А., Козлов А.В., Пестунов Д.А., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Складнева Т.К., Толмачев Г.Н., Фазлиев А.З., Фофонов А.В. Мониторинг атмосферных параметров: 25 лет ТОР-станции ИОА СО РАН // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 10. С. 845–853; Davydov D.K., Belan B.D., Antokhin P.N., Antokhina O.Yu., Antonovich V.V., Arshinova V.G., Arshinov M.Yu., Akhlestin A.Yu., Belan S.B., Dudorova N.V., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Pestunov D.A., Rasskazchikova T.M., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Sklyadneva T.K., Tolmachev G.N., Fazliev A.Z., Fofonov A.V. Monitoring of atmospheric parameters: 25 years of the tropospheric ozone research station of the Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences // Atmos. Ocean. Opt. 2019. V. 32, N 2. P. 180–192.
27. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Ивлёв Г.А., Козлов А.В., Пестунов Д.А., Покровский Е.В., Симоненков Д.В., Ужегова Н.В., Фофонов А.В. Мобильная станция АКВ-2 и ее применение на примере г. Томска // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18, № 8. С. 643–648.
28. Ужегова Н.В., Антохин П.Н., Белан Б.Д., Ивлёв Г.А., Козлов А.В., Фофонов А.В. Выделение антропогенного вклада в изменение температуры, влажности, газового и аэрозольного состава городского воздуха // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 7. С. 589–596.
29. Ужегова Н.В., Антохин П.Н., Белан Б.Д., Ивлёв Г.А., Козлов А.В., Фофонов А.В. Исследование суточной динамики характеристик воздуха в г. Томске в холодный период года // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 9. С. 782–789.
30. Дудорова Н.В., Белан Б.Д. Связь загрязнения воздуха взвешенными частицами со смертностью населения г. Томска от ряда заболеваний // Оптика атмосф. и океана. 2022. Т. 35, № 8. С. 645–654; Dudorova N.V., Belan B.D. The relationship between particulate air pollution and mortality: The case of Tomsk, Russia // Atmos. Ocean. Opt. 2022. V. 35, N 6. P. 694–703.
31. Областное государственное автономное учреждение здравоохранения «Станция скорой медицинской помощи». Томск, 2023. URL: <http://ssmp.tomsk.ru> (дата обращения: 17.09.2023).

N.V. Dudorova, B.D. Belan. Effect of fine aerosols in urban air on the frequency of hospitalizations for respiratory diseases.

The impact of PM_{2.5} in urban air on the frequency of hospitalizations for respiratory diseases is studied based on data on the atmospheric PM_{2.5} concentration from the TOR station (Tomsk) and on the number of hospitalizations of Tomsk residents for respiratory diseases and coronavirus infection (ICD-10 codes J00-J99, U07.1, and U07.2) from the register of emergency calls over a twelve-year period (2010–2022). It is shown that the level of air pollution with PM_{2.5} and the duration of pollution episodes almost do not affect the number of hospitalizations for respiratory diseases in the absence of infectious agents, which increase the number of such hospitalizations. However, in the cases where infectious agents, including SARS-CoV-2, are present in urban air, which promotes an increase in the number of hospitalizations for respiratory diseases, fine aerosols as carriers of the infectious agents contribute to their faster transfer and infection of more city residents compared to the cases of clean air. During such episodes, relatively low PM_{2.5} concentrations (30–50 µg/m³) can several times increase the number of hospitalizations for respiratory diseases, including coronavirus infection, even in such a fairly clean city as Tomsk, ignoring the rise of the number of hospitalizations due to seasonal morbidity or epidemic.