

УДК 551.510.42

Связь загрязнения воздуха взвешенными частицами со смертностью населения г. Томска от ряда заболеваний

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 24.12.2021 г.;
после доработки 11.05.2022 г.;
принята к печати 15.06.2022 г.

Дана оценка влияния взвешенных частиц в атмосфере города на здоровье разных групп населения. Показано, что женщины в целом наиболее подвержены неблагоприятному воздействию загрязнения атмосферы твердыми частицами и экстремальных (высоких летом и низких зимой) температур воздуха. Из всех возрастных групп наиболее уязвимыми оказались женщины 65–74 года.

Установлено, что наибольшую чувствительность к повышенной концентрации аэрозоля и экстремальным температурам воздуха проявили следующие группы населения: женщины 65–74 года с причинами смерти «злокачественные новообразования органов пищеварения» (коды МКБ-10 C15-C26), «злокачественное новообразование молочной железы» (код МКБ-10 C50), «острый инфаркт миокарда» (код МКБ-10 I21); женщины 34–50 лет, «неуточненные причины» (коды МКБ-10 R00-R99); женщины 75–87 лет, «стенокардия» (код МКБ-10 I20); мужчины 53–65 лет, «другие формы острой ишемической болезни сердца» (код МКБ-10 I24); мужчины 78+, «злокачественные новообразования мужских половых органов» (коды МКБ-10 C60-C63).

Показано, что на общую смертность населения главным образом влияют факторы, не исследованные в настоящей работе. Для выделенных групп населения риск негативного влияния загрязняющих веществ в исследуемом регионе является значимым.

Ключевые слова: взвешенные частицы, загрязнение, воздух, $PM_{2.5}$, PM_{10} , смертность, здоровье, город; particular matter, pollution, air, $PM_{2.5}$, PM_{10} , mortality, health, town.

Введение

Таблица 1

По оценкам Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), загрязнение воздуха ежегодно приводит к преждевременной смерти ~ 8 млн чел. во всем мире. Главным индикатором качества атмосферного воздуха, согласно ВОЗ [1], является содержание в нем мелкодисперсных взвешенных частиц размером менее 10 (PM_{10}) и 2,5 мкм ($PM_{2.5}$). Эти частицы представляют собой сложную смесь твердых и жидких органических и неорганических веществ, основными компонентами которых являются сульфаты, нитраты, аммиак, хлорид натрия, сажа, минеральная пыль и вода.

Основываясь на многочисленных исследованиях [1], ВОЗ утверждает, что нет безопасного уровня содержания аэрозоля в атмосфере и даже низкая концентрация частиц может представлять угрозу жизни и здоровью человека. При этом существуют установленные нормы качества воздуха. В табл. 1 приведены предельно-допустимые концентрации (ПДК) взвешенных частиц в атмосферном воздухе городов, принятые в Российской Федерации и ВОЗ в разные годы.

Установленные ПДК взвешенных частиц в воздухе

Загрязняющее вещество, $мкг/м^3$	ПДК (период)	РФ	ВОЗ	ВОЗ
		до наст. вр. [2]	от 2005 г. [3]	от 2021 г. [4]
$PM_{2.5}$	ПДК _{мр} (20 мин)	160	–	–
	ПДК _{сс} (24 ч)	35	25	15
	ПДК _{год} (1 год)	25	10	5
PM_{10}	ПДК _{мр} (20 мин)	300	–	–
	ПДК _{сс} (24 ч)	60	50	45
	ПДК _{год} (1 год)	40	20	15

Примечание: мр – максимально-разовая; сс – среднесуточная; год – годовая.

Частицы разного размера по-разному влияют на возникновение и течение острых и хронических заболеваний человека: PM_{10} способны проникать глубоко в легкие и оседать в них; более мелкая фракция $PM_{2.5}$ попадает непосредственно в легочные альвеолы, где происходит газообмен между легкими и кровеносными сосудами. При газообмене $PM_{2.5}$ попадают в кровь, что провоцирует возникновение различных заболеваний. В научной литературе описано достаточно много примеров вредного воздействия взвешенных частиц, приводящего к функциональным нарушениям в организме человека и возникновению многих болезней.

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

Приведем некоторые из них: учащенное или затрудненное дыхание [5, 6]; деструкция легочного эпителия [7]; сердечные аритмии, инфаркт и остановка сердца [8–11]; системные воспаления [12, 13]; нарушение свертываемости крови [14]; нарушения липидного обмена [15]; сужение сосудов и инсульт [16, 17], канцерогенное воздействие [18] и т.д.

Однако прямая зависимость между увеличением концентрации и ростом заболеваемости наблюдается не всегда. В работе Szyszkowicz M. с соавторами [19] показано, что гипертония у населения усиливалась с ростом концентрации PM_{10} . При этом не удалось установить устойчивой связи с $PM_{2,5}$. Авторы [20], наоборот, показали, что остановку сердца провоцируют $PM_{2,5}$, и нет связи таких событий с PM_{10} . Более поздние исследования выявили, что связь между концентрацией микро-частиц в атмосфере и здоровьем населения определяется такими факторами, как место проживания, возраст, пол и даже национальность [21–23].

Вредное влияние аэрозоля усиливается в сочетании с другими загрязнителями. В [24–26] показано усиление негативного воздействия аэрозоля озонем, диоксидом азота и диоксидом серы, в [27] — только озонем, в [28] — озонем и хлоридами, в [29] — озонем, H_2SO_4 , $(NH_4)_2SO_4$, HNO_3 , $HCHO$ и сигаретным дымом. Кроме того, в летний и зимний сезоны вредное воздействие загрязненного воздуха усиливается негативным действием на человека экстремальных температур воздуха [30]. Бойцов С.А. с соавторами [31] сравнили увеличение смертности населения г. Москвы только от волн жары летом 2014 г. и сочетанного воздействия волн жары, повышенной влажности и высокого уровня загрязнения воздуха летом 2010 г. Показано, что совокупное воздействие различных факторов приводит к более выраженному росту смертности населения.

По оценкам ВОЗ, даже при кратковременном увеличении концентрации PM_{10} на 10 мкг/м^3 суточная смертность от всех причин возрастает на 0,2–0,6%. При длительном увеличении концентрации $PM_{2,5}$ повышение на каждые 10 мкг/м^3 сопряжено с ростом долговременного риска смертности

от заболеваний сердечно-сосудистой и дыхательной систем организма на 6–13% [3]. Ввиду того, что высокие концентрации взвешенных частиц в атмосфере часто сопряжены с другими загрязнителями, а также экстремальными температурами воздуха, возникает проблема дифференциации воздействия каждого явления на здоровье человека. Ревич Б.А. с соавторами предложил модель, позволяющую определить долевые вклады каждой компоненты и их совместное воздействие на увеличение смертности населения на примере Москвы [32]. Эта же группа российских исследователей показала относительный прирост смертности населения Москвы от всех естественных причин на 0,47% на каждые 10 мкг/м^3 возрастания среднесуточной концентрации PM_{10} [30].

Несмотря на большое количество исследований влияния аэрозольного загрязнения воздуха на здоровье людей, остается плохо изученным ряд вопросов, в том числе связанных с влиянием загрязнений воздуха на разные группы, определяемые полом, возрастом и другими параметрами. Цель настоящей работы — оценка влияния взвешенных частиц в воздухе на смертность населения г. Томска, а также определение групп, наиболее подверженных такому воздействию.

1. Данные, используемые для анализа

Деперсонифицированные записи о смертности населения Томска за 2011–2019 гг. были предоставлены Федеральной службой государственной статистики [33] с указанием даты смерти, пола, возраста умершего и причины смерти, зашифрованной кодами Международной классификации болезней 10-го пересмотра (МКБ-10). За период исследования количество жителей Томска выросло почти на 37500 чел., поэтому при исследовании внутри года рассматривалось фактическое число умерших, а при межгодовом исследовании — количество умерших на 100 тыс. чел. населения (D). На рис. 1 представлена возрастная зависимость среднегодовой смертности населения Томска от всех естественных причин за период 2011–2019 гг.

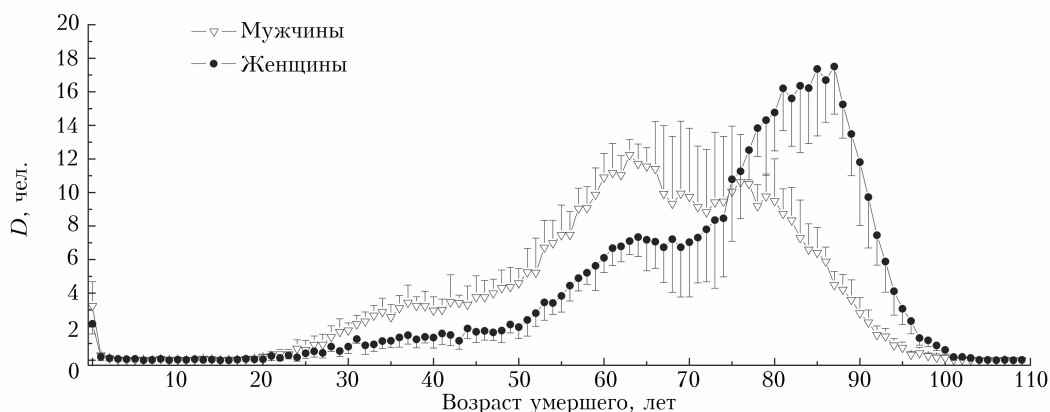


Рис. 1. Возрастная зависимость среднегодовой смертности населения Томска от всех естественных причин за период 2011–2019 гг.

На основе анализа статистических характеристик зависимости смертности от возраста были определены возрастные группы мужчин и женщин. Первая группа (а) характеризуется небольшим ростом смертности при увеличении возраста и малым СКО (среднеквадратическое отклонение) за период наблюдения. Вторая группа (б) характеризуется резким ростом смертности с увеличением возраста и малым СКО. Третья группа (в) характеризуется отсутствием выраженного роста смертности при увеличении возраста и большим СКО. Четвертая группа (г), зафиксированная только для женщин, характеризуется резким ростом смертности при увеличении возраста и большим СКО. Пятая группа (д) характеризуется резким уменьшением смертности при увеличении возраста и малым СКО. Такое формирование возрастных групп, по нашему мнению, может указать на большую или меньшую чувствительность к воздействию внешних неблагоприятных факторов. Малое СКО за период наблюдения указывает преимущественно на постоянную смертность данной возрастной категории. Большое СКО может указывать на существенную добавку к постоянной смертности за счет внешних факторов, например атмосферных параметров. Таким образом, для мужчин было сформировано четыре возрастные группы: а) 42–52, б) 53–65, в) 66–77, д) 78+ лет; для женщин – пять: а) 34–50, б) 51–64, в) 65–74, г) 75–87, д) 88+ лет.

Массовая концентрация взвешенных частиц (m) в атмосфере Томска была рассчитана на основе измерений счетной концентрации аэрозоля. Плотность частиц принималась равной $1,5 \text{ г/см}^3$. Ежечасные измерения проводились на базе TOR-станции, расположенной на восточной окраине Томска. Технические характеристики TOR-станции и ее модернизация за последние 25 лет описаны в [33]. Для оценки корректности экстраполяции данных измерений атмосферных параметров с одной станции на весь город были использованы результаты исследований атмосферы Томска с помощью мобильной станции АКВ-2 [35–37].

2. Результаты и обсуждение

2.1. Массовая концентрация аэрозоля в атмосфере Томска

Маршрутные измерения концентрации аэрозоля в городском воздухе с помощью мобильной станции АКВ-2 проводились в разное время года, суток и при различных погодных условиях. В табл. 2 приведены средние показатели массовой концентрации аэрозоля в атмосфере Томска, рассчитанные на основе измерений TOR- и мобильной станций. Средние значения массовой концентрации аэрозоля для TOR-станции рассчитывались как усредненные по девятилетнему ряду измерений (2011–2019 гг.) в указанный сезон. Средние значения для мобильной станции рассчитывались по всем маршрутам внутри города или его окрестностей в указанный

сезон. Максимальные значения для TOR-станции рассчитывались как усредненные за девять лет максимальные значения массовой концентрации аэрозоля в указанный сезон. Максимальные значения для мобильной станции рассчитывались как усредненные по всем выездным экспериментам максимальные значения внутри города или в его окрестностях в указанный сезон.

Таблица 2

Средние показатели массовой концентрации аэрозоля в атмосфере Томска, измеренные с помощью TOR- и мобильной станций

Сезон	Загрязнитель	Показатель	TOR-станция	Мобильная станция	
				Город	Окрестности
Зима	PM _{2,5}	среднее	9,78	13,87	9,65
		макс.	41,51	92,03	20,76
	PM ₁₀	среднее	12,56	16,95	11,24
		макс.	79,33	98,73	26,65
Лето	PM _{2,5}	среднее	9,26	14,66	6,10
		макс.	73,44	135,83	17,19
	PM ₁₀	среднее	15,48	32,67	11,26
		макс.	105,82	496,75	35,92

Видно, что массовая концентрация аэрозоля, измеренная с помощью мобильной станции внутри города, сопоставима со значениями, полученными на TOR-станции. Ввиду того, что в нашем исследовании задействованы данные о смертности населения Томска без учета места проживания граждан, мы полагаем возможным использовать данные о загрязнении атмосферы города, измеренные только на TOR-станции.

В табл. 3 приведены статистические характеристики массовой концентрации аэрозоля в воздухе Томска, рассчитанные на основе измерений. Видно, что среднегодовые значения массовой концентрации аэрозоля в атмосфере Томска удовлетворяют нормативам ВОЗ по качеству воздуха. Исключение составляет 2012 г., когда высокая температура воздуха летом в совокупности с дефицитом осадков привели к возникновению многочисленных лесных пожаров на территории Томской обл. и соседних областей, вследствие чего населенные пункты были окутаны дымной мглой [38]. Первые признаки дымной мглы в Томске были отмечены 19 июня, а максимальные значения содержания твердых частиц в воздухе – 25–28 июля. Общее количество суток, когда наблюдалось превышение среднесуточной ПДК массовой концентрации аэрозоля, составило 33 дня. Такая длительная экспозиция аэрозоля в Томске была беспрецедентной за весь исследуемый период.

Всего в Томске было зафиксировано 111 (3,6% от исследуемого периода) и 60 (2%) сут с превышенными ПДК_{сс} PM_{2,5} и PM₁₀ соответственно. Для краткости в табл. 4 представлены только периоды, когда среднесуточная концентрация PM_{2,5} и PM₁₀ превышала ПДК_{сс} двое и более суток подряд. Длительный период превышения ПДК твердых частиц

Таблица 3

Статистические характеристики массовой концентрации аэрозоля и температуры воздуха в Томске

Характеристика			Год								
			2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Зима	PM _{2,5}	среднее	12,67	12,96	7,20	8,47	7,19	10,44	7,03	12,25	9,83
		макс.	44,76	43,54	24,03	53,14	24,57	51,69	22,03	73,54	36,27
		$N > 25$	4	7	0	4	0	8	0	8	4
	PM ₁₀	среднее	15,66	17,95	8,66	11,63	9,05	12,77	7,41	14,33	15,61
		макс.	43,84	72,46	112,79	72,22	32,24	55,41	41,43	83,24	200,37
		$N > 50$	0	2	1	2	0	1	0	1	4
Весна	PM _{2,5}	среднее	7,01	7,28	3,30	5,66	4,82	5,03	4,29	4,38	4,32
		макс.	19,63	28,55	8,16	23,78	14,75	14,24	16,65	12,27	9,95
		$N > 25$	0	2	0	0	0	0	0	0	0
	PM ₁₀	среднее	20,06	14,87	4,54	11,06	14,15	11,03	6,20	6,91	9,29
		макс.	368,43	64,28	12,39	35,68	290,68	40,70	52,95	21,05	68,57
		$N > 50$	2	1	0	0	3	0	1	0	2
Лето	PM _{2,5}	среднее	5,29	29,99	6,60	4,76	4,03	12,05	4,09	7,18	9,36
		макс.	16,35	330,37	51,44	12,26	11,33	95,90	9,25	70,99	63,04
		$N > 25$	0	33	3	0	0	15	0	5	8
	PM ₁₀	среднее	18,01	33,41	10,13	12,77	9,29	14,28	11,48	12,25	17,69
		макс.	71,13	333,79	65,61	34,25	27,40	99,92	110,75	74,62	134,89
		$N > 50$	2	15	2	0	0	2	1	3	6
T	T_{max}	22,38	25,99	23,07	23,57	24,41	23,13	22,02	22,97	23,78	
	T_{min}	12,31	14,82	12,68	12,95	11,95	12,93	12,05	12,79	12,95	
	T_{sr}	17,34	20,35	17,80	18,34	18,30	17,97	17,01	17,93	18,39	
Осень	PM _{2,5}	среднее	5,94	3,80	3,71	4,85	4,55	9,31	4,27	3,56	4,65
		макс.	20,42	9,38	10,15	17,39	15,44	60,80	14,73	11,13	18,62
		$N > 25$	0	0	0	0	0	9	0	0	0
	PM ₁₀	среднее	22,38	4,80	9,05	8,25	9,07	10,18	8,24	5,35	14,55
		макс.	447,50	11,18	41,31	27,64	48,15	64,31	64,40	13,01	278,07
		$N > 50$	4	0	0	0	0	1	1	0	2
Год	PM _{2,5}	среднее	7,65	13,76	4,86	6,11	4,97	9,28	5,16	7,03	6,73
	PM ₁₀	среднее	19,00	18,20	7,63	11,07	10,21	12,17	8,53	9,95	13,92

Примечание. $N > 25$, $N > 50$ – количество суток, когда фиксировалось превышение ПДК_{сс} массовой концентрации частиц в воздухе. В настоящей работе ПДК_{сс} = 25 мкг/м³ для PM_{2,5} и 50 мкг/м³ для PM₁₀. Зимой текущего года считается декабрь предыдущего года, январь и февраль текущего. T_{max} , T_{min} , T_{sr} – средние температуры за сезон из максимальных, минимальных, средних за сутки.

Таблица 4

Периоды превышения ПДК_{сс} среднесуточными концентрациями твердых частиц двое и более суток подряд

Период	PM _{2,5}			PM ₁₀			
	N	Среднее	Макс.	Период	N	Среднее	Макс.
7–8.01.2011 г.	2	32,17	34,79				
20–21.02.2012 г.	2	36,84	43,54				
19.06–4.08.2012 г.	33	52,44	330,37	4.07–2.08.2012 г.	15	67,84	333,79
10–13.02.2014 г.	4	41,75	53,14	11–12.02.2014 г.	2	67,73	72,22
				20–23.04.2015 г.	3	127,75	290,68
20–24.01.2016 г.	4	33,12	51,69	23–24.07.2016 г.	2	80,26	99,92
15–16.02.2016 г.	2	27,52	29,82				
17–30.07.2016 г.	12	38,54	95,90				
18–21.08.2016 г.	3	28,45	38,49				
17–27.09.2016 г.	8	30,65	60,80				
3–4.01.2018 г.	2	31,11	31,47				
3–4.02.2018 г.	2	55,46	73,54				
22–26.07.2018 г.	5	50,61	70,99	23–25.07.2018 г.	3	65,09	74,62
				2–05.02.2019 г.	4	122,72	200,37
				8–9.05.2019 г.	2	59,80	68,57
20–26.07.2019 г.	7	51,25	63,04	19–26.07.2019 г.	6	69,92	134,89
				15–16.09.2019 г.	2	241,65	278,07

в атмосфере Томска наблюдался только летом 2012 г. Все остальные периоды были кратковременными. Поэтому для лета 2012 г. был проведен анализ как мгновенной реакции организма человека на экспозицию взвешенных частиц, так и отложенной. Все остальные случаи анализировались только для мгновенной реакции.

Из данных, представленных в табл. 3 и 4, видно, что повышенные концентрации загрязнителей связаны главным образом не с жизнедеятельностью города, а с изменениями атмосферы во всем регионе, например вследствие летних лесных пожаров. Поэтому в Томске летний период характеризуется наиболее высокими значениями массовой концентрации аэрозоля. В связи с этим анализ был проведен преимущественно для этого сезона.

2.2. Температура воздуха в Томске

В табл. 3 приведены статистические характеристики летней температуры воздуха в Томске. Это необходимо для оценки синергетического эффекта загрязнения воздуха и высоких температур на организм человека. Видно, что лето 2012 г. характеризовалось не только самыми высокими за весь исследуемый период концентрациями вредных веществ в атмосфере, но и самой высокой температурой воздуха, как максимальной, так и минимальной. По уровню загрязнения воздуха твердыми частицами после лета 2012 г. следует лето 2016 г. Последнее характеризовалась комфортной температурой воздуха. Летние сезоны 2014 и 2015 гг. были жаркие, но с низкой концентрацией загрязняющих веществ в воздухе.

2.3. Зависимость смертности населения Томска от атмосферных показателей

Анализ воздействия на человека максимальной, минимальной и средней температуры воздуха в летний сезон показал, что наиболее выраженная связь смертности населения обнаружилась с высокими значениями T_{\min} , регистрируемой ночью. Объясняется

это тем, что в Сибири не распространено оснащение жилых помещений кондиционерами. Поэтому при высокой ночной температуре помещения не успевают охлаждаться после жаркого дня и человеческий организм не получает необходимого отдыха от жары. На рис. 2 показаны значения суммарной смертности населения Томска на 100 тыс. чел. от всех естественных причин и атмосферных параметров в летний период каждого года. Видно, что женщины в целом сильнее подвержены неблагоприятному воздействию как загрязнения атмосферы взвешенными частицами, так и высокой ночной температуры. В табл. 5 представлены коэффициенты корреляции между смертностью мужчин и женщин в летний период и атмосферными показателями, а также их уровни значимости.

Таблица 5

Коэффициенты корреляции между смертностью населения Томска и атмосферными параметрами в летний период и их уровни значимости

Параметр	Мужчины	Женщины	
	Коэффициент корреляции	Коэффициент корреляции	Уровень значимости
T_{\min}	-0,11	0,72	0,05
$PM_{2,5}$	-0,20	0,76	0,05
PM_{10}	-0,01	0,81	0,01

Из всех возрастных групп женщин наиболее уязвимой оказалась группа 65–74 года. На рис. 3 для нее представлены накопленная за 30 дней смертность на 100 тыс. чел. от всех естественных причин, среднее значение смертности за 2011–2019 гг., а также скользящие средние (период усреднения 30 дней соответствует периоду накопленной смертности) $PM_{2,5}$, PM_{10} и минимальной в течение суток температуры воздуха в Томске за период 1 мая–31 августа 2012 г. Видно заметное увеличение смертности в этой подгруппе через ~10 дней после увеличения концентрации взвешенных частиц в атмосфере в первой декаде июня. При этом пик скользящей средней концентрации аэрозоля приходится на 4 июля (период осреднения с 4.07–4.08),

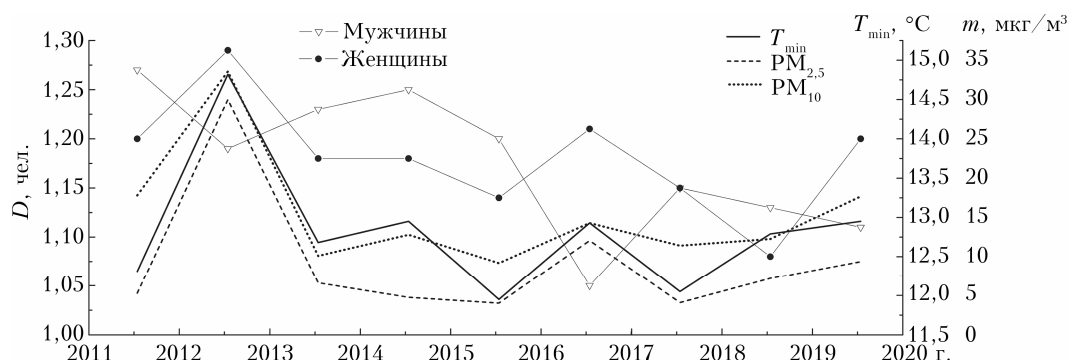


Рис. 2. Сравнение средней ежедневной смертности населения Томска на 100 тыс. чел. от всех естественных причин и атмосферных параметров ($PM_{2,5}$, PM_{10} , T_{\min}) в летний период

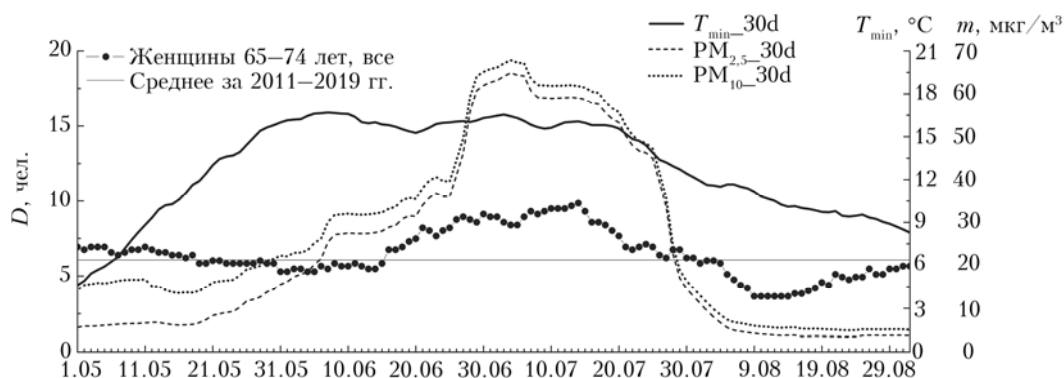


Рис. 3. Накопленная (за 30 дней) смертность женщин 65–74 лет на 100 тыс. чел. от всех естественных причин; скользящие средние $PM_{2,5}$ и PM_{10} , а также минимальной температуры воздуха в Томске с 1 мая – 31 августа 2012 г.

пик накопленной смертности приходится на 14 июля (период осреднения с 14.07–14.08), что соответствует периоду максимального задымления атмосферы Томска. Заметный спад смертности после снижения содержания аэрозоля в конце июля говорит о том, что в этой возрастной подгруппе не наблюдается продолжительной отложенной реакции. Также можно отметить некоторый провал (~1 мес) во временном ходе накопленной смертности после пика, связанного с аэрозольным загрязнением. Далее кривая накопленной смертности приближается к своему среднему значению. Это может говорить о том, что для исследуемой группы населения аэрозольное загрязнение такого уровня снижает продолжительность жизни всего на несколько месяцев. Для других возрастных подгрупп подобной зависимости обнаружено не было.

Также была проанализирована смертность групп людей, разделенных не только по возрасту и полу, но и по основным видам заболеваний, указанных в МКБ-10. Получено, что наибольшую чувствительность к повышенной концентрации аэрозоля и экстремальным температурам воздуха проявили следующие группы: женщины 65–74 года, «злокачественные новообразования органов пищеварения» (коды МКБ-10 C15-C26), «злокачественное новообразование молочной железы» (код МКБ-10 C50), «острый инфаркт миокарда» (код МКБ-10 I21); женщины 34–50 лет, «неуточненные причины» (коды МКБ-10 R00-R99); женщины 75–87 лет, «стенокардия» (код МКБ-10 I20); мужчины 53–65 лет, «другие формы острой ишемической болезни сердца» (код МКБ-10 I24); мужчины 78+, «злокачественные новообразования мужских половых органов» (коды МКБ-10 C60-C63).

На рис. 4 показаны накопленная и фактическая суммарная смертности выбранных групп населения на 100 тыс. чел., а также скользящие средние $PM_{2,5}$, PM_{10} и минимальной суточной температуры воздуха в Томске. Видно, что смертность населения выбранных групп летом 2012 г. увеличилась в три раза по сравнению со средней смертностью за девять лет. При этом рост смертности выбранных

групп начинается 27.06.2012 г., т.е. через восемь дней после прихода в Томск дымной мглы. Важно отметить, что среднесуточные значения массовой концентрации аэрозоля за эти восемь дней составили $25,4 \text{ мкг/м}^3$ для $PM_{2,5}$ и $31,1 \text{ мкг/м}^3$ для PM_{10} , что можно характеризовать как критические условия, вызывающие заметное увеличение смертности населения. Также можно отметить увеличение смертности в 1,7 раза от средней в следующие полгода после эпизода летних пожаров 2012 г. (см. рис. 4, а и б).

На рис. 5 для лета и зимы, характеризующихся экстремальными температурами, представлена многолетняя динамика средней смертности выбранных групп населения и атмосферных параметров. В табл. 6 даны коэффициенты корреляции этих зависимостей и их уровни значимости. Видно, что летом установлена тесная связь между смертностью населения выбранных групп и атмосферными параметрами, при этом коэффициент корреляции между смертностью и содержанием аэрозоля выше, чем с температурой воздуха. Зимой связь между смертностью и содержанием аэрозоля слабая и недостоверная (коэф. корр. 0,47–0,49), хотя в холодный период времени низкие температуры воздуха оказывают существенное влияние на смертность выбранных групп населения (коэф. корр. 0,84, с вероятностью случайного совпадения 1%). Это можно объяснить как более низким средним уровнем загрязнения атмосферы, так и короткими периодами непрерывного превышения ПДК в зимний период.

Стоит отметить, что за исследуемый девятилетний период средний вклад смертности выбранных групп в общую смертность населения Томска составляет всего 3%. Летом 2012 г. этот вклад вырос до 6,7%. При этом общая смертность населения Томска не коррелирует с высокими значениями загрязняющих веществ в атмосфере и экстремальными температурами. Это можно объяснить тем, что в среднем атмосфера Томска не является сильно загрязненной, а климат жестким, на общую смертность населения главным образом влияют факторы,

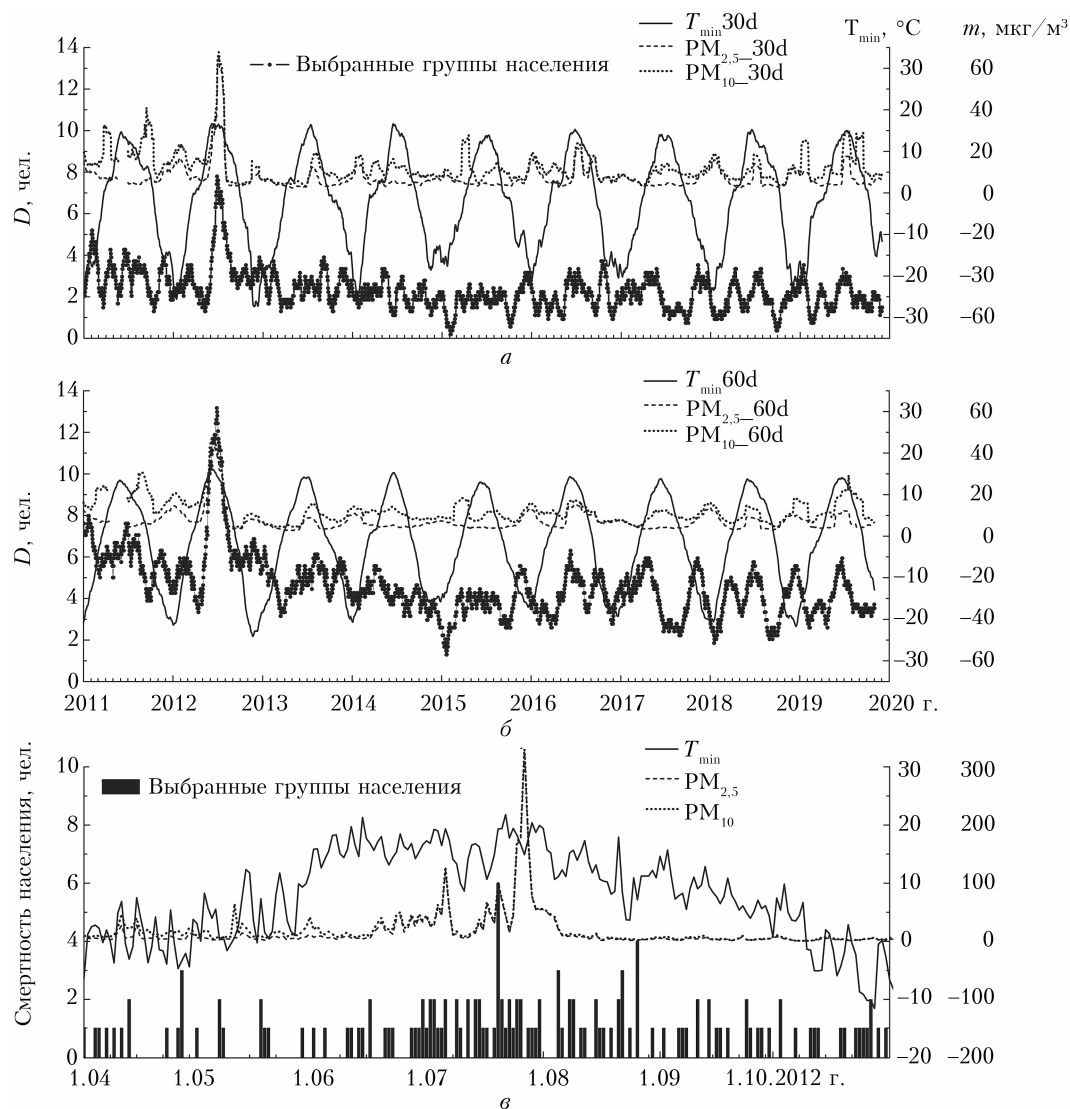


Рис. 4. Накопленная и фактическая смертность выбранных групп населения на 100 тыс. чел. (женщины 65–74 лет, «злокачественные новообразования органов пищеварения, молочной железы, острый инфаркт миокарда»; женщины 34–50 лет, «неуточненные причины»; женщины 75–87 лет, «стенокардия»; мужчины 53–65 лет, «другие формы острой ишемической болезни сердца»; мужчины 78+, «злокачественные новообразования мужских половых органов»); скользящие средние $PM_{2,5}$, PM_{10} , минимальной температуры воздуха в Томске: *a* – за 30 дней; *b* – за 60 дней; *v* – фактическая (1.04–1.11.2012 г.)

Таблица 6

**Коэффициенты корреляции между смертностью
выбранных групп и атмосферными параметрами и их уровни значимости**

Параметр	Лето		Зима		Все сезоны	
	Коэффициент корреляции	Уровень значимости	Коэффициент корреляции	Уровень значимости	Коэффициент корреляции	Уровень значимости
T_{min}	0,85	0,01	-0,79	0,05	-0,14	—
T_{max_night}	0,85	0,01	-0,84	0,01	-0,15	—
$PM_{2,5}$	0,91	0,001	0,47	—	0,71	0,001
PM_{10}	0,92	0,001	0,49	—	0,68	0,001

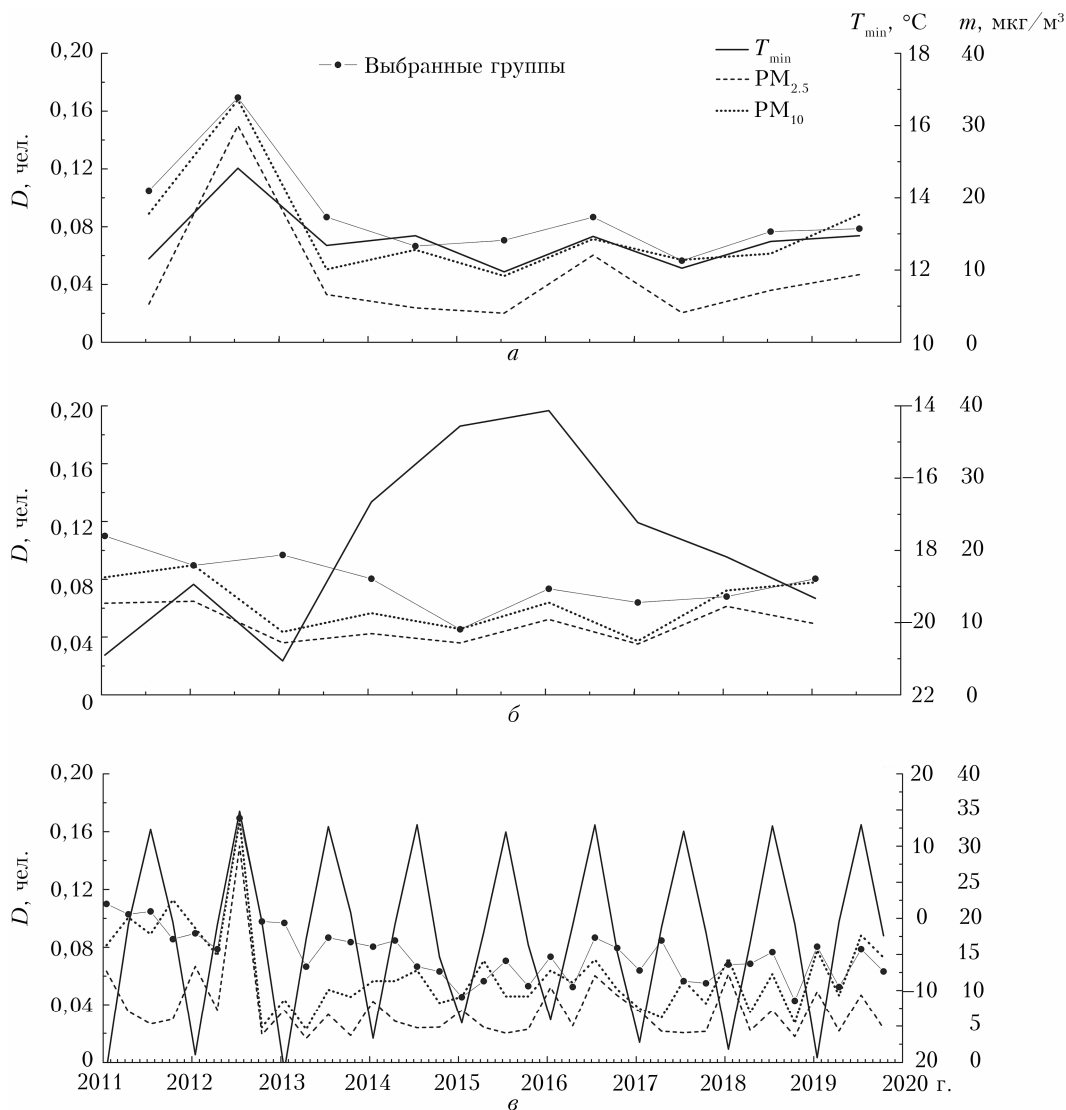


Рис. 5. Средняя ежедневная смертность населения выбранных групп за сезон на 100 тыс. чел.: а – летом; б – зимой; в – все сезоны

не исследованные в настоящей работе. При этом для выделенных наиболее чувствительных групп населения риск негативного влияния загрязняющих веществ в исследуемом регионе является значимым.

Заключение

Таким образом, анализ влияния параметров атмосферы на смертность разных групп населения показал, что женщины в целом наиболее подвержены неблагоприятному воздействию как загрязнения атмосферы твердыми частицами, так и экстремальной (высокой летом и низкой зимой) температуры. Наибольшую чувствительность к повышенной концентрации аэрозоля и экстремальным температурам воздуха проявили следующие группы: женщины 65–74 лет с причинами смерти «злокачественные новообразования органов пищеварения» (коды МКБ-10 C15-C26), «злокачественное новообразо-

вание молочной железы» (код МКБ-10 C50), «острый инфаркт миокарда» (код МКБ-10 I21); женщины 34–50 лет, «неуточненные причины» (коды МКБ-10 R00-R99); женщины 75–87 лет, «стенокардия» (код МКБ-10 I20); мужчины 53–65 лет, «другие формы острой ишемической болезни сердца» (код МКБ-10 I24); мужчины 78+, «злокачественные новообразования мужских половых органов» (коды МКБ-10 C60-C63).

Корреляционный анализ параметров атмосферы и смертности населения в целом показал, что атмосфера Томска не является сильно загрязненной, а климат жестким, и на общую смертность населения главным образом влияют факторы, не исследованные в настоящей работе. При этом для выделенных наиболее чувствительных групп населения риск негативного влияния загрязняющих веществ в регионе является значимым.

Финансирование. Исследование проведено при поддержке РФФИ (грант № 19-05-50024).

Список литературы

1. *Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development*. New York: United Nations, 2015.
2. Санитарные правила и нормы. СанПиН 1.2.3685-21. «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». Постановление главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28 января 2021 года N 2.
3. Влияние взвешенных частиц на здоровье человека. Рекомендации в отношении политики для стран Восточной Европы, Кавказа и Центральной Азии // Всемирная организация здравоохранения. 2013.
4. WHO Global Air Quality Guidelines. Particulate Matter (PM_{2.5} and PM₁₀), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide // World Health Organization, 2021. 273 p.
5. Wang F., Chen T., Chang Q., Kao Y.W., Li J., Chen M., Li Y., Shia B.C. Respiratory diseases are positively associated with PM_{2.5} concentrations in different areas of Taiwan // PLoS One. 2021. 16(4):e0249694. DOI: 10.1371/journal.pone.0249694.
6. Zhao C., Wang Y., Su Z., Pu W., Niu M., Song S., Wei L., Ding Y., Xu L., Tian M., Wang H. Respiratory exposure to PM_{2.5} soluble extract disrupts mucosal barrier function and promotes the development of experimental asthma // Sci. Total Environ. 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139145.
7. Huang H.C., Lin F.C., Wu M.F., Nfor O.N., Hsu S.Y., Lung C.C., Ho C.C., Chen C.Y., Liaw Y.P. Association between chronic obstructive pulmonary disease and PM_{2.5} in Taiwanese Nonsmokers // Int. J. Hyg. Environ. Health. 2019. V. 222, N 5. P. 884–888. DOI: 10.1016/j.ijheh.2019.03.009.
8. Song X., Liu Y., Hu Y., Zhao X., Tian J., Ding G., Wang S. Short-term exposure to air pollution and cardiac arrhythmia: A meta-analysis and systematic review // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2016. V. 13, N 7. P. 642. DOI: 10.3390/ijerph13070642.
9. Madrigano J., Kloog I., Goldberg R., Coull B.A., Mittleman M.A., Schwartz J. Long-term exposure to PM_{2.5} and incidence of acute myocardial infarction // Environ. Health Perspect. 2013. V. 121, N 2. P. 192–6. DOI: 10.1289/ehp.1205284.
10. Dennekamp M., Akram M., Abramson M.J., Tonkin A., Sim M.R., Fridman M., Erbas B. Outdoor air pollution as a trigger for out-of-hospital cardiac arrests // Epidemiology. 2010. V. 21, N 4. P. 494–500.
11. Zhao R., Chen S., Wang Z., Huang J., Wang K., Liu L., Wei S. The impact of short-term exposure to air pollutants on the onset of out-of-hospital cardiac arrest: A systematic review and meta-analysis // Int. J. Cardiol. 2017. V. 1, N 226. P. 110–117.
12. Jeong S., Park S.A., Park I., Kim P., Cho N.H., Hyun J.W., Hyun Y.M. PM_{2.5} exposure in the respiratory system induces distinct inflammatory signaling in the lung and the liver of mice // J. Immunol. Res. 2019. P. 3486841. DOI: 10.1155/2019/3486841.
13. Kim R.E., Shin C.Y., Han S.H., Kwon K.J. Astaxanthin suppresses PM_{2.5}-induced Neuroinflammation by regulating akt phosphorylation in BV-2 microglial cells // Int. J. Mol. Sci. 2020. V. 21, N 19. P. 7227. DOI: 10.3390/ijms21197227.
14. Hajat A., Allison M., Diez-Roux A.V., Jenny N.S., Jorgensen N.W., Szpiro A.A., Vedal S., Kaufman J.D. Long-term exposure to air pollution and markers of inflammation, coagulation, and endothelial activation: A repeat-measures analysis in the Multi-Ethnic Study of Atherosclerosis (MESA) // Epidemiology. 2015. V. 26, N 3. P. 310–320. DOI: 10.1097/EDE.0000000000000267.
15. Bai Y., Sun Q. Fine particulate matter air pollution and atherosclerosis: Mechanistic insights // Biochim. Biophys. Acta. 2016. V. 1860. P. 2863–2868. DOI: 10.1016/j.bbagen.2016.04.030.
16. Urch B., Brook J.R., Wasserstein D., Brook R.D., Rajagopalan S., Corey P., Silverman F. Relative contributions of PM_{2.5} chemical constituents to acute arterial vasoconstriction in humans // Inhal. Toxicol. 2004. V. 16, N 6–7. P. 345–52. DOI: 10.1080/08958370490439489.
17. Shah A.S., Lee K.K., McAllister D.A., Hunter A., Nair H., Whiteley W., Langrish J.P., Newby D.E., Mills N.L. Short term exposure to air pollution and stroke: Systematic review and meta-analysis // BMJ. 2015. V. 350 P. h1295. DOI: 10.1136/bmj.h1295.
18. Chen S., Li D., Zhang H., Yu D., Chen R., Zhang B., Tan Y., Niu Y., Duan H., Mai B., Chen S., Yu J., Luan T., Chen L., Xing X., Li Q., Xiao Y., Dong G., Niu Y., Aschner M., Zhang R., Zheng Y., Chen W. The development of a cell-based model for the assessment of carcinogenic potential upon long-term PM_{2.5} exposure // Environ. Int. 2019. V. 131. P. 104943. DOI: 10.1016/j.envint.2019.104943.
19. Szyszkwowicz M., Rowe B.H., Brook R.D. Even low levels of ambient air pollutants are associated with increased emergency department visits for hypertension // Can. J. Cardiol. 2012. V. 28, N 3. P. 360–366.
20. Rosenthal F.S., Kuisma M., Lanki T., Hussein T., Boyd J., Halonen J.I., Pekkanen J. Association of ozone and particulate air pollution with out-of-hospital cardiac arrest in Helsinki, Finland: Evidence for two different etiologies // J. Exposure Sci. Environ. Epidemiol. 2013. V. 23, N 3. P. 281–288.
21. Rissler J., Nickslasson H., Gudmundsson A., Wollmer P., Swietlicki E., Löndahl J. A set-up for respiratory tract deposition efficiency measurements (15–5000 nm) and first results for a group of children and adults // Aerosol Air Qual. Res. 2017. V. 17, N 5. P. 1244–1255.
22. Kodros J.K., Volckens J., Jathar S.H., Pierce J.R. Ambient particulate matter size distributions drive regional and global variability in particle deposition in the respiratory tract // GeoHealth. 2018. V. 2. P. 298–312.
23. Soleimani Z., Bolorani A.D., Khalifeh R., Teymouri P., Mesdaghinia A., Griffin D.W. Air pollution and respiratory hospital admissions in Shiraz, Iran, 2009 to 2015 // Atmos. Environ. 2019. V. 209. P. 233–239.
24. Burnett R.T., Cakmak S., Brook J.D., Krewski D. The role of particulate size and chemistry in the association between summer time ambient air pollution and hospitalization for cardiorespiratory diseases // Environ. Health Perspect. 1977. V. 105, N 6. P. 614–620.
25. Kampa M., Castanas E. Human health effects of air pollution // Environ. Pollut. 2008. V. 151, N 2. P. 362–367.
26. van Zelm R., Huijbregts M.A.J., den Hollander H.A., van Jaarsveld H.A., Sauter F.J., Struijs J., van Wijnen H.J., van de Meent D. European characterization factors for human health damage of PM₁₀ and ozone in life cycle impact assessment // Atmos. Environ. 2008. V. 42, N 3. P. 441–453.
27. Thurston G.D., Ito K., Hayes C.G., Bates D.V., Lippman M. Respiratory hospital admissions and summer-time haze air pollution in Toronto, Ontario: Consideration of the role of acid aerosols // Environ. Res. 1994. V. 65, N 2. P. 271–290.
28. Frampton M.W., Morrow P.E., Cox C., Levy P.C., Condemi J.J., Speers D., Gibb F.R., Utell M.J.

- Sulfuric acid aerosol followed by ozone exposure in healthy and asthmatic subjects // *Environ. Res.* 1995. V. 69, N 1. P. 1–14.
29. *Schlesinger R.B.* Assessment of toxicologic interactions resulting from acute inhalation exposure to surface acid and ozone mixtures // *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 1992. V. 115, N 2. P. 183–190.
 30. *Ревич Б.А., Шапошников Д.А., Авалиани С.Л., Рубинштейн К.Г., Емелина С.В., Ширяев М.В., Семутникова Е.Г., Захарова П.В., Кислова О.Ю.* Оценка опасности для здоровья населения Москвы высокой температуры и загрязнения атмосферного воздуха // *Гигиена и санитария.* 2015. № 1. С. 36–40.
 31. *Бойцов С.А., Лукьянов М.М., Деев А.Д., Кляшторный В.Г., Иваненко А.В., Волкова Н.С., Кузнецов А.С., Скворцов А.С., Соловьев Д.В.* Влияние экологических факторов на смертность населения г. Москвы; возможности оценки рисков и прогнозирования // *Российский кардиологический журнал.* 2016. Т. 134, № 6. С. 34–40.
 32. *Ревич Б.А., Шапошников Д.А., Першаген Г.* Новая эпидемиологическая модель по оценке воздействия аномальной жары и загрязненного атмосферного воздуха на смертность населения (на примере Москвы 2010 г.) // *Профилактическая медицина.* 2015. № 5. С. 15–19.
 33. *Федеральная служба государственной статистики* <https://rosstat.gov.ru/>.
 34. *Давыдов Д.К., Белан Б.Д., Антохин П.Н., Антохина О.Ю., Антонович В.В., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Алхестин А.Ю., Белан С.Б., Дудорова Н.В., Ивлев 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., Фофанов А.В.* Мониторинг атмосферных параметров: 25 лет ТОР-станции ИОА СО РАН // *Оптика атмосф. и океана.* 2018. Т. 31, № 10. С. 845–853; *Давыдов Д.К., Белан Б.Д., Антохин П.Н., Антохина О.Ю., Антонович В.В., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Алхестин А.Ю., Белан С.Б., Дудорова Н.В., Ивлев 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., Фофанов А.В.* 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.
 35. *Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Пестунов Д.А., Покровский Е.В., Симоненков Д.В., Ужегова Н.В., Фофанов А.В.* Мобильная станция АКВ-2 и ее применение на примере г. Томска // *Оптика атмосф. и океана.* 2005. Т. 18, № 8. С. 643–648.
 36. *Ужегова Н.В., Антохин П.Н., Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Фофанов 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.
 37. *Ужегова Н.В., Антохин П.Н., Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Фофанов 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.
 38. *Складнева Т.К., Ивлев Г.А., Белан Б.Д., Аршинов М.Ю., Симоненков Д.В.* Радиационный режим г. Томска в условиях дымной мглы // *Оптика атмосф. и океана.* 2015. Т. 28, № 3. С. 215–222.

N.V. Dudorova, B.D. Belan. Relationship between particulate air pollution and mortality: the case of Tomsk, Russia.

The impact of suspended particles in the urban air on the health of different groups of the population of Tomsk, Russia, is studied. It is shown that women are generally most susceptible to the adverse effects of aerosol air pollution and extreme (high summer and low winter) air temperatures. Women at age of 65–74 are the most vulnerable to the environment hazards.

The age-and-sex matched analysis of mortality allows us to determined groups of population (age, causes of death) the most sensitive to high aerosol concentrations and extreme air temperatures: women at age of 65–74, cancer of the digestive system, breast cancer, and acute myocardial infarction; women at age 34–50, undetermined causes; women at age 75–87, breast-pang; men at age 53–65, other forms of coronary artery disease; men at age 78+, male reproductive organ cancer.

It is shown that the general mortality of the population is mainly due factors not studied in this work. However, the risk of the negative impact of air pollution is significant for the selected groups of population in the region under study.