

Самоочищение атмосферного воздуха от пылевых частиц в условиях прибрежного морского климата

© 2024. Л. В. Веремчук, д. б. н., в. н. с.,
Т. И. Виткина, д. б. н., зав. лабораторией,
Л. С. Барскова, к. м. н., м. н. с.,

Владивостокский филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения
«Дальневосточный научный центр физиологии и патологии дыхания» – Научно-
исследовательский институт медицинской климатологии и восстановительного лечения,
690105, Россия, г. Владивосток, ул. Русская, д. 73г,
e-mail: tash30@mail.ru

Влияние климатических условий на распределение твёрдых взвешенных частиц в приземном слое атмосферы г. Владивостока зависит от интенсивности загрязнения воздушной среды, формируемого близостью расположения источников загрязнения, характером дорожного покрытия, интенсивностью автотранспорта, удалённостью от моря, топографией местности, плотностью селитебной застройки и наличием зелёной зоны. Целью исследования явилось определение гранулометрического состава твёрдых взвешенных частиц в приземном слое атмосферы и оценка условий самоочищения городского воздуха под влиянием прибрежного морского климата. Загрязнение атмосферы города оценивали по содержанию твёрдых взвешенных частиц, собранных в приземном слое воздуха в районах с разным уровнем загрязнения городской среды. Определяли показатели температуры, влажности, давления воздуха, направления и скорости ветра, использовали мониторинг метеоданных (точка росы, порывы ветра, облачность, туманы) ближайших районных метеостанций. В статистической обработке использовали модуль «Канонический анализ». В загрязнённом районе города наибольшее влияние на распределение опасных для здоровья частиц тонкодисперсного ряда (2,5–10 мкм) оказала циркуляция атмосферы (направление, скорость и порывы ветра). Воздействие температурно-влажностного режима снижено по мощности. На слабо загрязнённой островной части города влияние на ультрадисперсный спектр пыли формируется температурно-влажностным режимом, атмосферным давлением, облачностью с частыми туманами, эти факторы способствуют усилению процесса нуклеации наночастиц. Условия самоочищения воздуха от приземных пылевых частиц в загрязнённой и слабо загрязнённой частях г. Владивостока связаны с действием ветрового режима южного направления, что указывает на определяющую роль муссонного морского климата в очищении воздуха региона. Температурно-влажностный режим активно влияет на дисперсный состав пыли на обоих участках отбора проб, в островном районе он определяет содержание частиц фракции до 10 мкм, в континентальном – фракций размером 0,1–50 мкм.

Ключевые слова: пылевые частицы, приземный слой воздуха, муссонный климат, самоочищение атмосферы.

Self-purification of atmospheric air from dust particles in a coastal marine climate

© 2024. L. V. Veremchuk ORCID: 0000-0001-6372-6560
T. I. Vitkina ORCID: 0000-0002-1009-9011
L. S. Barskova ORCID: 0000-0001-7582-343X

Vladivostok department of the Russian Federal State Budgetary Scientific Institution
“Far Eastern Scientific Center of Physiology and Pathology of Respiration” –
Research Institute of Medical Climatology and Restorative Treatment,
73g, Russkaya St., Vladivostok, Russia, 690105,
e-mail: tash30@mail.ru

The intensity of air pollution depends on the characteristics of pollution sources, distance from the sea, terrain, density of residential buildings and the presence of a green zone. The influence of climatic conditions on the distribution of suspended particulate matter in the atmospheric surface layer of Vladivostok was studied. The aim of the study was

to determine the particle size distribution of suspended particulate matter in the atmospheric surface layer and to assess the conditions for self-purification of urban air under the influence of the coastal maritime climate. The assessment of the urban air pollution with suspended particulate matter was carried out in two areas with different levels of pollution. The human breathing zone was examined. The temperature, humidity, air pressure, wind direction and speed at sampling points were determined. We used monitoring of meteorological data (dew point, wind gusts, clouds, fog) from the nearest regional meteorological stations. Statistical processing included the “Canonical Analysis” module. In the polluted area of the city the atmospheric circulation (direction, speed and gusts of wind) greatly affect the distribution of fine-dispersed particles (2.5–10.0 μm) that are hazardous to health. The impact of temperature and humidity conditions is reduced in power. The temperature and humidity regime, atmospheric pressure, cloudiness with frequent fog affect the ultrafine dust spectrum in the slightly polluted island area of the city. The above factors contribute to the enhancement of the nanoparticle nucleation process. Self-purification of the air surface layer from dust particles in both polluted and slightly polluted areas of Vladivostok is associated with the southerly winds. The monsoon maritime climate defines the air purifying in the region. The temperature and humidity regime actively affects the dust disperse composition in both sampling sites. In the island area of the city it determines the content of particles up to 10 μm ; in the continental area – fractions of 0.1–50.0 μm .

Keywords: dust particles, air surface layer, monsoon climate, self-purification of the atmosphere.

Загрязнение воздуха промышленных городов является одной из важнейших детерминант, определяющих здоровье человека [1, 2]. Крайне остро стоит проблема загрязнения атмосферы городов аэрозольными твёрдыми взвешенными частицами (ТВЧ) в приземном слое, обусловленными выбросами автотранспорта, предприятиями энергетики и промышленными объектами [3, 4]. В долгосрочной перспективе это приводит к хроническому накоплению в органах и тканях человека пылевых частиц с наиболее патогенным воздействием диаметром менее 2,5 мкм. Установлено, что ТВЧ вызывают увеличение частоты случаев бронхолёгочных и сердечнососудистых заболеваний, повышение частоты обострений заболеваний и уровня смертности [5–8]. В г. Владивостоке зафиксировано 437 автомобилей на тысячу жителей, поэтому в городе проблема мониторинга качества воздушной среды в приземном слое (зоне дыхания человека) является первостепенной.

Загрязнение воздуха пылевыми частицами вызывает ограничения поступления солнечной радиации, что снижает температуру и повышает влажность воздуха, способствуя изменению микроклимата в сторону патогенного действия на здоровье человека [9–12]. Климатические условия (циркуляция атмосферы, температура, влажность, осадки, солнечная радиация и др.) в зависимости от широты, степени континентальности и топографических условий местности вызывают непрерывную изменчивость метеопараметров, формирующих специфику условий естественного самоочищения воздушной среды [13]. Знание условий участия климато-погодного режима в естественном самоочищении атмосферы позволит эффективно проводить в жизнь профилактические, здравоохранительные административные решения.

Целью исследования явилось определение гранулометрического состава твёрдых взвешенных частиц в приземном слое атмосферы и оценка условий самоочищения городского воздуха под влиянием прибрежного морского климата.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является атмосферный воздух городской среды. Исследования проведены в г. Владивостоке, расположенном на возвышенном расчленённом морском побережье. В зависимости от территориальной удалённости от моря в городе создаются условия с разным уровнем скопления пылевых аэрозолей, особенно в межсочных долинах [7, 10, 14, 15]. Территория города была разделена на зону с плотной жилищно-производственной застройкой с высоким уровнем загрязнения приземного слоя воздуха (континентальная часть г. Владивостока) и слабо загрязнённую прибрежно-морскую островную территорию (остров Русский).

С использованием разработанной в Институте медицинской климатологии и восстановительного лечения авторской методики, отбор проб твёрдых взвешенных частиц [16] проводили в приземном слое зоны дыхания человека (на уровне 1,5–2,5 м), в утренние часы (10–13 ч), вблизи автомобильных дорог. Круглогодично за период 2013–2018 гг. в континентальной зоне была отобрана 231 проба, а в островной части города – 239 проб. Для отбора проб использовался электрический аспиратор ПУ–4Э (ЗАО «ХИМКО», Россия), предназначенный для оценки состояния атмосферного воздуха населённых мест. Изучение гранулометрического состава ТВЧ микроразмерного ряда атмосферного воздуха осуществлялось в пробах воздуха, пропущен-

ного через поглотитель с жидкой средой (высокоочищенная вода), которая предотвращала склеивание и агрегацию твёрдых частиц. Для оценки распределения ТВЧ по размеру использовался лазерный анализатор Analysette 22 NanoTech plus (фирма Fitch, Германия). Микровзвеси в диапазоне (0–2000 мкм) классифицировали по 9 диапазонам (0–0,1; 0,1–1,0; 1,0–2,5; 2,5–10; 10–50; 50–100; 100–400; 400–700; 700–2000 мкм). Одновременно в месте отбора проб ТВЧ каждые 10 мин снимали показания температуры, влажности, давления воздуха, направления и скорости ветра для стандартизации расчётов [16, 17]. В едином пространственно-временном режиме использовали метеоданные ближайших районных метеостанций (точка росы, порывы ветра, облачность, туманы).

Исследование проводили в два этапа. На первом этапе в районах с высокой и низкой техногенной нагрузкой определяли весовое содержание твёрдых взвешенных частиц (мкг/м³) с учётом ошибки средней и статистической значимости различия средних значений по зонам загрязнения в каждом фракционном диапазоне ТВЧ. На втором этапе оценивали влияние метеопараметров на фракционное распределение ТВЧ, позволяющее устанавливать уровень и особенности процесса самоочищения в зависимости от характера загрязнения и ландшафтно-климатических условий. Для расчётов использовали модуль «Канонический анализ» (STATISTICA 8). Для получения репрезентативности результатов применяли пошаговый алгоритм расчё-

тов. Из множества канонических связей $R_{кан}$ выделяли зависимости, имеющие высокую статистическую значимость ($p < 0,05$). При анализе факторной структуры канонических корней проводили повторные аналогичные расчёты канонических зависимостей с более значимыми корнями. Условия самоочищения атмосферы оценивали по мощности воздействия метеопараметров на ТВЧ (среднее значение канонической связи $R_{кан}$ при $p < 0,05$) и активности воздействия (количество связей при $p < 0,05$), характеризующих интенсивность процесса самоочищения воздуха.

Результаты и обсуждение

На основании полученных данных в загрязнённой континентальной части города были зафиксированы 775 диапазонов (0–2000 мкм) гранулометрического состава ТВЧ, в менее загрязнённой островной части – 706 диапазонов, которые были классифицированы на 9 диапазонов (табл. 1). Общая масса ТВЧ ($294,7 \pm 14,2$ мкг/м³) континентальной части города в 1,9 раз ($p = 0,038$) превышает пылевую массу островной территории ($156,3 \pm 11,79$ мкг/м³). Первый этап исследования выявил различие весового содержания ТВЧ по фракциям в районах города с различным уровнем загрязнения среды. Полученные результаты позволили структурировать дисперсный состав ТВЧ с выделением доминантных диапазонов. При сравнении весового содержания пыли по диапазонам в районах с разным техногенным прессом

Таблица 1 / Table 1

Содержание твёрдых взвешенных частиц в приземном слое воздушной среды континентальной и островной части г. Владивостока / The suspended particulate matter content in the surface air layer of the continental and island parts of Vladivostok

Диапазоны, мкм Ranges, μm	Содержание твёрдых взвешенных частиц (мкг/м ³) The suspended particulate matter content (μg / m ³)		
	островная территория (о. Русский) island area (Russky Island)	континентальная часть города Владивостока the continental part of Vladivostok	P (статистически значимые различия) P (statistically significant differences)
< 0,1	0,1±0,01	2,3±0,1	0,002
0,1–1	1,0±0,1	4,6±0,3	0,01
1–2,5	11,5±0,8	35,2±2,2	0,02
2,5–10	40,9±2,9	134,4±9,8	0,01
10–50	55,1±3,5	32,4±2,2	0,04
50–100	1,4±0,1	0,00	0,001
100–400	6,7±0,4	2,0±0,2	0,02
400–700	5,7±0,4	26,1±1,9	0,01
700–2000	33,8±2,6	57,0±3,9	0,05

было определено статистически значимое различие, в наибольшей степени значимое отличие зафиксировано для фракций размером менее 0,1 и 2,5–10 мкм (табл. 1).

На 2-ом этапе исследования в приземном слое атмосферы в зонах различного уровня загрязнения среды определено доминантное влияние метеопараметров на распределение ТВЧ по фракциям (табл. 2, 3). Анализ показал, что климатические параметры в районах с высокой и низкой техногенной нагрузкой вызывают аналогичную реакцию фракционных диапазонов от 0 до 50 мкм. Различие зафиксировано только по крупным фракциям, причём в загрязнённой среде на метеофакторы реагируют диапазоны 50–100 и 100–400 мкм, в районе с низкой техногенной нагрузкой – более крупные фракции (> 400 мкм). Качество воздуха приземного слоя городов и весовые характеристики содержания в нём ТВЧ в значительной степени определяются хозяйственной деятельностью, особенностями ландшафтных и погоднo-климатических условий [18].

Наиболее загрязнённый район г. Владивостока в участке отбора проб представлен возвышенно-долинным рельефом при удалённости от моря (3–4 км), жилищно-производственной зоной с плотной застройкой, слабым озеленением, значительной площадью асфальтового покрытия, в совокупности формирующими в приземном слое воздуха характерные динамические условия циркуляции атмосферы [3, 14, 19, 20]. В континентальном районе города важный вклад в загрязнение воздуха вносит мусорожигательный завод, располагающийся в 500 м от участка отбора проб [21]. Небольшое сезонное загрязнение оказывает теплоцентральный «Северная», работающая на природном газе. Однако максимальное загрязнение приземного слоя воздуха на участке отбора проб оказал автомобильный транспорт [22, 23]. Узкая (10 м) асфальтированная дорога с интенсивным движением грузового и автомобильного транспорта (2400–3000 авт./час) приводит к многочисленным пробкам, вызывающим повышение уровня выхлопных газов, максимально загрязняющих воздух патогенными фракциями размером < 10 мкм [10]. Перечисленные источники загрязнения выбрасывают в атмосферу характерный диапазон ТВЧ, поэтому в континентальной части города весовое преимущество имеют 4 фракции: 1–2,5; 2,5–10; 10–50; 700–2000 мкм (табл. 1). Повышенное содержание грубодисперсной пыли объясняется слабым озеленением, вы-

зывающим усиление смёта пыли вдоль дороги [20, 24]. Островная часть города расположена на возвышенной прибрежной территории, покрытой лесом с густым подлеском. Для района характерна незначительная техногенная нагрузка, связанная с отсутствием предприятий, слабой загруженностью дорог автотранспортом (трафик 40–60 авт./час). В холодные сезоны года на о. Русском основными источниками загрязнения являются 6 небольших котельных и отопительные системы частного сектора, работающие преимущественно на каменном угле. Наибольший вклад в загрязнение воздуха ТВЧ вносят грунтовые дороги с высоким уровнем запылённости. В береговой части острова важным источником нано- и тонкодисперсных частиц являются морские акватории, выбрасывающие в воздух мелкие кристаллы солей, носящих саногенный (оздоравливающий) характер воздействия на человека [20, 25]. За счёт меньшего количества источников загрязнения на о. Русском весовое преимущество принадлежит 3 фракциям: 2,5–10; 10–50 и 700–2000 мкм. Наличие большего количества грубодисперсной пыли на о. Русском определено наличием грунтовых дорог, которые являются главными поставщиками пыли. Сравнительный анализ показал наибольшее различие содержания в приземном слое фракции с размером частиц < 0,1 мкм в континентальной части г. Владивостока относительно островной (в 29 раз). Значимый медико-биологический вклад вносят фракции с размером частиц < 2,5 мкм, которые в континентальном районе с интенсивным транспортным потоком могут быть опасными для здоровья населения. В островной части за счёт морских аэрозолей создаются благоприятные условия [6].

На втором этапе исследования определяли особенности влияния климатических параметров на процесс самоочищения атмосферного воздуха от пылевых частиц (табл. 2, 3). В районе г. Владивостока с высоким уровнем техногенного загрязнения установлен широкий охват аэрозольных фракций ТВЧ (0–400 мкм). Наибольшее воздействие на распределение опасных для здоровья частиц тонкодисперсного ряда (0–0,1; 0,1–1,0; 1,0–2,5; 2,5–10) оказала циркуляция атмосферы (направление, скорость и порывы ветра). В условиях производственно-жилой зоны с плотной застройкой, в связи с инверсионными процессами, происходящими в приземном слое над асфальтированной поверхностью, направление ветра часто меняется и, как

Таблица 2 / Table 2

«Мощность» ($R_{кан}^-$) и «активность» ($\Sigma R_{кан}^-$) влияния климата на дисперсность взвешенных частиц в районе г. Владивостока с высокой техногенной нагрузкой
 “Power” (R_{can}^-) and “activity” (ΣR_{can}^-) of the climate influence on dispersion of suspended particulate matter in the area of Vladivostok with high technogenic load

Метеофакторы / Фракции ТВЧ Meteorological factors / SPM fractions	$R_{кан}^- / p / p < 0,05$ $\Sigma R_{кан}^-$ $R_{can}^- / p / p < 0,05$ ΣR_{can}^-							Итоговая по климату Climate summary
	0–0,1 мкм μm	0,1–1,0 мкм μm	1,0–2,5 мкм μm	2,5–10 мкм μm	10–50 мкм μm	50–100 мкм μm	100–400 мкм μm	
Температура воздуха, °C Air tempera- ture, °C	–	0,34/0,03 3	0,35/0,03 3	0,37/0,002 9	0,36/0,03 3	–	0,35/0,02 3	0,35/0,02 21
Точка росы, °C Dew point, °C	–	0,31/0,05 1	0,35/0,03 3	0,4/0,02 11	0,35/0,03 3	–	0,37/0,02 3	0,36/0,03 21
Направление ветра, в град. Wind direction, in degrees	0,44/0,004 3	0,44/0,004 3	0,42/0,007 4	0,42/0,001 8	0,32/0,04 3	–	0,44/0,003 1	0,4/0,01 22
Скорость ветра, м/с Wind speed, m/s	0,31/0,05 2	0,32/0,04 5	0,4/0,01 5	0,37/0,02 3	0,37/0,02 1	–	–	0,35/0,03 16
Порывы ветра, м/с Wind gusts, m/s	0,32/0,04 2	0,39/0,003 9	0,49/0,001 2	0,38/0,02 8	0,4/0,02 8	–	0,44/0,003 1	0,4/0,02 30
Относительная влажность, % Relative moisture, %	–	0,34/0,03 1	0,33/0,03 1	0,37/0,02 11	0,35/0,03 10	0,32/0,04 3	0,34/0,03 4	0,34/0,03 30
Атм. давление на уровне морья, мм рт. ст. Atm. pressure at sea level, mm Hg.	–	0,32/0,04 1	–	0,32/0,04 1	–	–	0,33/0,03 1	0,32/0,04 3
Облачность, туманы Clouds, fogs	–	–	–	0,33/0,03 2	–	–	0,34/0,03 1	0,33/0,03 3
Итоговая по ТВЧ Summary SPM	0,36/0,03 7	0,3/0,03 23	0,39/0,02 18	0,37/0,02 53	0,36/0,03 28	0,32/0,04 3	0,37/0,02 14	0,36/0,03 146

Примечание: здесь и в таблице 2 в первой строке ($R_{кан}^-$) – «мощность», после / – среднее значение статистической значимости связей (p); во второй строке ($\Sigma R_{кан}^-$) – «активность»; «–» – отсутствие статистически значимых связей; ТВЧ – твёрдые взвешенные частицы.

Note: here and in Table 2 in the first line (R_{can}^-) – “power”, after / – the average value of the statistical significance of connections (p); in the second line (ΣR_{can}^-) – “activity”; “–” – absence of statistically significant relationships; SPM – suspended particulate matter.

Таблица 3 / Table 3

«Мощность» ($R_{кан}^-$) и «активность» ($\sum R_{кан}$) влияния климата на дисперсность взвешенных частиц в районе г. Владивостока с низкой техногенной нагрузкой
 “Power” (R_{can}^-) and “activity” ($\sum R_{can}$) of the climate influence on the dispersion of suspended particulate matter in the area of Vladivostok with a low technogenic load

Метеофакторы / Фракции ТВЧ Meteorological factors / SPM fractions	$R_{кан}^- / p / p < 0,05$ $\sum R_{кан}$ $R_{can}^- / p / p < 0.05$ $\sum R_{can}$						Итоговая по климату Climate summary
	0–0,1 мкм μm	0,1–1,0 мкм μm	1,0–2,5 мкм μm	2,5–10 мкм μm	10–50 мкм μm	> 400 мкм μm	
Температура воздуха, °C Air temperature, °C	0,42/0,01 1	0,37/0,03 2	0,37/0,03 3	0,38/0,03 1	–	–	0,39/0,03 7
Точка росы, °C Dew point, °C	0,33/0,05 3	0,36/0,04 2	0,36/0,04 1	0,35/0,04 2	–	–	0,35/0,04 8
Направление ветра, в град. Wind direction, in degrees	–	0,36/0,03 4	0,37/0,04 3	0,41/0,02 4	0,39/0,03 3	0,38/0,03 1	0,38/0,03 15
Скорость ветра, м/с Wind speed, m/s	–	0,36/0,04 4	0,38/0,03 2	0,36/0,04 4	0,43/0,01 1	–	0,38/0,03 11
Порывы ветра, м/с Wind gusts, m/s	–	0,41/0,02 3	0,38/0,03 3	0,39/0,03 2	0,41/0,02 2	0,37/0,03 5	0,39/0,03 15
Относительная влажность, % Relative moisture, %	0,46/0,006 1	–	–	0,36/0,04 6	–	0,35/0,04 2	0,39/0,03 9
Атм. давление на уровне моря, мм. рт. ст Atm. pressure at sea level, mm Hg	–	0,42/0,01 1	0,39/0,02 1	0,38/0,02 1	–	–	0,4/0,02 3
Облачность, туманы Clouds, fogs	0,42/0,02 2	–	0,36/0,03 2	0,37/0,03 2	–	–	0,38/0,03 6
Итоговая по ТВЧ Summary SPM	0,41/0,02 7	0,38/0,03 16	0,37/0,03 15	0,38/0,03 22	0,41/0,02 6	0,37/ 0,038	0,38/0,03 74

следствие, сила влияния на дисперсность ТВЧ также варьирует [11, 13, 25]. В нашем исследовании направление ветра оказывает воздействие на широкий диапазон частиц 0–50 мкм и 100–400 мкм. При анализе активности воздействия отмечается преимущественное влияние южных и юго-восточных ветров, что позволяет предположить занос пылевых частиц со стороны расположения источников загрязнения. При увеличении скорости ветра увеличивается также и занос пыли. Однако при порывах ветра влияние скорости сглаживается, так как направление ветра в условиях плотной застройки при порывах, как правило, хаотично меняется. Поэтому при сильном ветре активность воздействия на занос пыли несколько снижается. В летний период муссонный климат города имеет характерные южные направления ветров, дующие с моря, поэтому в тёплое время года, помимо выноса

пылевых частиц, влажные южные ветра могут способствовать коагуляции нано- и тонкодисперсных частиц [26].

При анализе влияния ветрового режима на размер фракций ТВЧ установлено, что «мощность» максимальна для направления ветра и наночастиц (0–0,1 мкм), особенно при южном ветре. Скорость и порывы ветра достаточно сильно влияют на тонкодисперсные фракции 1,0–2,5 мкм ($R_{кан}^- = 0,4–0,49$). Эти данные соотносятся с результатами работы [11] в том, что сила и направление ветра являются ключевой особенностью распространения загрязняющих веществ в городской среде, что следует учитывать в прогнозных системах оповещения населения. Средне- и грубодисперсные фракции > 10 мкм выносятся из атмосферы, в основном, благодаря порывам ветра ($R_{кан}^- = 0,4–0,44$) (табл. 2). Несколько снижена «мощность» ($R_{кан}^- = 0,31–0,4$) и «активность» ($\sum R_{кан} = 72$)

влияния на ТВЧ температурно-влажностного режима (температура, влажность воздуха, точка росы). Анализ «мощности» показал преимущественную зависимость комплексного показателя «точки росы» (итоговая $R_{кан}^- = 0,36$), однако по «активности» охвата реагирования метеопараметр «относительная влажность» имеет наибольшую величину ($\Sigma R_{кан} = 30$). Зависимость от температуры воздуха можно связать с повышенным прогреванием воздуха над асфальтированной территорией, что способствует увеличению концентрации взвешенных частиц [15, 26, 27]. Нужно заметить, что температурно-влажностный режим не влияет на распространение наночастиц (0–0,1 мкм), возможно, в сложных ландшафтных условиях города данные частицы мало подвергаются процессу агрегации. Слабое участие в процессе самоочищения воздуха оказывают показатели атмосферного давления, облачности и туманов («мощность» $R_{кан}^- = 0,32–0,34$; «активность» $\Sigma R_{кан} = 6$), влияние которых можно объяснить опосредованностью действия данных показателей, однако именно они формируют доминирующий температурно-влажностный, циркуляционный режим атмосферы и погоду в целом [3, 11, 23]. Ветра южных направлений приносят со стороны мусоросжигательного завода фракции ТВЧ < 10 мкм, причём, чем выше скорости ветра, тем процесс самоочищения атмосферы от частиц размером 1,0–2,5 мкм увеличивается. Определённое положительное влияние оказывает температурно-влажностный режим, особенно на фракции > 1,0 мкм. В загрязнённом континентальном районе наиболее интенсивное очищение воздуха происходит от фракций 2,5–50 мкм. Условия самоочищения атмосферы в островной части города несколько отличаются. Устойчивый локальный пылевой смёт с грунтовых дорог острова сформировал большую размерность фракций (> 400 мкм), однако эти частицы довольно быстро оседают и критического воздействия на здоровье населения не оказывают [2, 7] (табл. 3). Анализ влияния отдельных метеорологических параметров на фракции ТВЧ в островных условиях по мощности связи мало отличается от загрязнённой среды (селитебный район $R_{кан}^- = 0,31–0,49$; о. Русский $R_{кан}^- = 0,33–0,46$). В то же время показатель активности реагирования на метеопараметры в островном районе вдвое уменьшился ($\Sigma R_{кан} = 74$). Данную зависимость можно объяснить преобладанием в приземном слое острова крупных фракций, которые быстро оседают (табл. 1). Согласно

мнению многих исследователей [1, 5, 6, 8], наибольшую нагрузку на органы дыхания оказывают пылевые фракции размером до 10 мкм. Выявлено, что наиболее активная реакция на климатическое воздействие отмечается у фракций размером до 10 мкм ($\Sigma R_{кан} = 60$). Наночастицы (0–0,1 мкм) реагируют на температурно-влажностный режим и облачность с туманами, которые способствуют повышенной коагуляции микровзвесей в воздухе (табл. 3). Анализ итоговой реакции на климат установил преимущественную активность реагирования фракций 0,1–10 мкм ($\Sigma R_{кан} = 41$) на воздействие циркуляционных процессов ($R_{кан} = 0,36–0,41$). Температурно-влажностный режим, облачность и туманы при аналогичной мощности ($R_{кан}^- = 0,35–0,41$) имел несколько сниженную активность ($\Sigma R_{кан} = 30$). Известно, что естественная природная среда имеет высокий потенциал самоочищения воздуха [13, 20]. В условиях слабой техногенной нагрузки о. Русский зафиксирован повышенный уровень воздействия климатических параметров на ТВЧ, способствующий высокой степени естественного самоочищения атмосферы. Так как морские акватории могут приносить в окружающую воздушную среду нано- и тонкодисперсные частицы морских солей, благоприятные для здоровья человека, островные районы города при достаточном благоустройстве дорожного покрытия могут быть прекрасными зонами отдыха горожан. Преимуществом исследования явилось использование разработанной авторской методики в определении весового состава ТВЧ в зоне дыхания человека с учётом мониторинга за метеопараметрами. Ограничением исследования является региональный аспект. В дальнейшем необходимо увеличить количество участков отбора и проб атмосферного воздуха, расширить количество регистрируемых метеопараметров.

Заключение

Формирование в континентальной части города неблагоприятного качества воздушной среды обусловлено высоким содержанием ТВЧ с размером 2,5–10 мкм, характеризующихся значительными патогенными свойствами. Распространение на о. Русский частиц с аэродинамическим диаметром 10,0–50,0 мкм и > 400 мкм не является критичным для здоровья человека, так как они быстро оседают, а высокий уровень активности процесса самоочищения, связанный с прилегающей

морской акваторией, повышенными скоростями ветра, высокой влажностью на фоне залесённости территории делает островной район более благополучным. Анализ воздействия метеопараметров на распределение в атмосферном воздухе фракций ТВЧ показал преобладание действия ветрового режима (преимущественно ветров южного направления), как в сильно, так и слабо загрязнённой части г. Владивостока. Это указывает на роль муссонного морского климата в очищении воздуха. Температурно-влажностный режим активно влияет на дисперсный состав ТВЧ в обоих участках отбора проб. На островной территории данное воздействие сосредоточено на наночастицах и фракциях от 0,1 до 10 мкм, в континентальной части – на фракции размером 0,1–50 мкм, что связано с тем, что на территории города температурно-влажностная инверсия в приземном слое имеет большие градиенты. Усиление вертикального перемешивания воздуха приводит к захватыванию более тяжёлых частиц пыли.

Литература

1. Chen R., Hu B., Liu Y., Xu J., Yang G., Xu D., Chen C. Beyond PM_{2.5}: The role of ultrafine particles on adverse health effects of air pollution // *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – General Subjects*. 2016. V. 1860. No. 12. P. 2844–2855. doi: 10.1016/j.bbagen.2016.03.019
2. Veremchuk L.V., Tsarouhas K., Vitkina T.I., Mineeva E.E., Gvozdenko T.A., Antonyuk M.V., Rakitskii V.N., Sidletskaya K.A., Tsatsakis A.M., Golokhvast K.S. Impact evaluation of environmental factors on respiratory function of asthma patients living in urban territory // *Environmental Pollution*. 2018. V. 235. P. 489–496. doi: 10.1016/j.envpol.2017.12.122
3. Леванчук А.В. Загрязнение окружающей среды продуктами эксплуатационного износа автомобильно-дорожного комплекса // *Гигиена и санитария*. 2014. Т. 93. № 6. С. 17–21.
4. Longhin E., Gualtieri M., Capasso L., Bengalli R., Mollerup S., Holme J.A., Øyrevik J., Casadei S., Benedetto C., Parenti P., Camatini M. Physico-chemical properties and biological effects of diesel and biomass particles // *Environ. Pollut.* 2016. V. 215. P. 366–375. doi: 10.1016/j.envpol.2016.05.015
5. Pardo M., Porat Z., Rudich A., Schauer J.J., Rudich Y. Repeated exposures to roadside particulate matter extracts suppresses pulmonary defense mechanisms, resulting in lipid and protein oxidative damage // *Environ. Pollut.* 2016. V. 210. P. 227–237. doi: 10.1016/j.envpol.2015.12.009
6. Paulin L., Hansel N. Particulate air pollution and impaired lung function [version 1; peer review: 3 approved] //

- F1000Research. 2016. V. 5. (F1000 Faculty Rev). Article No. 201. doi: 10.12688/f1000research.7108.1
7. Veremchuk L.V., Mineeva E.E., Vitkina T.I., Gvozdenko T.A., Golokhvast K.S. Impact of atmospheric microparticles and heavy metals on external respiration function of urbanized territory population // *ROMJ*. 2017. V. 6. No. 4. P. 402–407. doi: 10.15275/rusomj.2017.0402
8. Zivin J.G., Neidell M. Air pollution's hidden impacts // *Science*. 2018. V. 359. No. 6371. P. 39–40. doi: 10.1126/science.aap7711.
9. Fang X., Fang B., Wang C., Xia T., Bottai M., Fang F., Yang C. Relationship between fine particulate matter, weather condition and daily non-accidental mortality in Shanghai, China: A Bayesian approach // *PLoS ONE*. 2017. V. 12. No. 11. Article No. e0187933. doi: 10.1371/journal.pone.0187933
10. Голохваст К.С. Атмосферные взвеси городов Дальнего Востока. Владивосток: Изд-во ДВФУ, 2013. 178 с.
11. Contreras-Ochando L., Ferry C. Wind-sensitive interpolation of urban air pollution forecasts // *Procedia Computer Science*. 2016. V. 80. P. 313–323. doi: 10.1016/j.procs.2016.05.343
12. Makar P.A., Gong W., Hogrefe C., Zhang Y., Curci G., Žabkar R., Milbrandt J., Im U., Balzarini A., Baró R., Bianconi R., Cheung P., Forkel R., Gravel S., Hirtl M., Honzak L., Hou A., Jiménez-Guerrero P., Langer M., Moran M.D., Pabla B., Pérez J.L., Pirovano G., San José R., Tuccella P., Werhahn J., Zhang J., Galmarini S. Feedbacks between air pollution and weather, part 2: Effects on chemistry // *Atmospheric Environment*. 2015. V. 115. P. 499–526. doi: 10.1016/j.atmosenv.2014.10.021
13. Mizuo K., Hiromasa U., Zhiwei H., Rei K., Yayoi I., Hidenori K. Synergy between air pollution and urban meteorological changes through aerosol-radiation-diffusion feedback – A case study of Beijing in January 2013 // *Atmospheric Environment*. 2017. V. 171. P. 98–110. doi: 10.1016/j.atmosenv.2017.10.018
14. Аббасов П.А., Одинцова Е.Ю., Шатрова Н.Э. Потенциал самоочищения воздушного бассейна города Владивосток // *Academia. Архитектура и строительство*. 2009. № 5. С. 132–135.
15. Zhou Y., Cheng S., Chen D., Lang J., Wang G., Xu T., Wang X., Yao S. Temporal and spatial characteristics of ambient air quality in Beijing, China // *Aerosol and Air Quality Research*. 2015. V. 15. No. 5. P. 1868–1880. doi: 10.4209/aaqr.2014.11.0306
16. Янькова В.И., Гвозденко Т.А., Голохваст К.С., Чайка В.В., Городный В.А. Гранулометрический анализ атмосферных взвесей экологически благополучного и неблагополучного районов Владивостока // *Здоровье. Медицинская экология. Наука*. 2014. № 2 (56). С. 62–66.
17. Barskova L.S., Vitkina T.I., Gvozdenko T.A., Veremchuk L.V., Golokhvast K.S. Assessment of air pollution by small-sized suspended particulate matter in urbanized territories with various technogenic load (on the

example of Vladivostok, Russia) // *Russian Open Medical Journal*. 2019. V. 8. No. 3. Article No. e0304. doi: 10.15275/rusomj.2019.0304

18. Singh K.P., Gupta S., Rai P. Identifying pollution sources and predicting urban air quality using ensemble learning methods // *Atmospheric Environment*. 2013. V. 80. P. 426–437. doi: 10.1016/j.atmosenv.2013.08.023

19. ФГБУ «Приморское УГМС» [Электронный ресурс] <https://primogoda.ru/news/ecology> (Дата обращения: 30.07.2021).

20. Beier C.M., Caputo J., Lawrence G.B., Sullivan T.J. Loss of ecosystem services due to chronic pollution of forests and surface waters in the Adirondack region (USA) // *Journal of Environmental Management*. 2017. V. 191. P. 19–27. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.12.069

21. Мусоросжигательный завод отравляет воздух Владивостока [Электронный ресурс] <https://www.ecoindustry.ru/NEWS/view/42464.html?ysclid=ltfl5nnrid488830001> (Дата обращения: 30.07.2021).

22. Азаров В.К., Кутенёв В.Ф., Сайкин А.М. Автомобиль и его влияние на систему «дорога – окружающая среда – человек» // *Труды НАМИ*. 2013. № 254. С. 47–57.

23. Безуглая Э.Ю., Смирнова И.В. Воздух городов и его изменения. СПб.: Астерион, 2008. 253 с.

24. Fiddes S.L., Pezza A.B., Mitchell T.A., Kozyniak K., Mills D. Synoptic weather evolution and climate drivers associated with winter air pollution in New Zealand // *Atmospheric Pollution Research*. 2016. V. 7. No. 6. P. 1082–1089. doi: 10.1016/j.apr.2016.06.014

25. Marignani M., Bruschi D., Astiaso-Garcia D., Frondoni R., Carli E., Pinna M.S., Cumo F., Gugliermetti F., Saatkamp A., Doxa A., Queller M., Chaieb M., Bou Dagher-Kharrat M., El Zein R., El Jeitani S., Khater C., Mansour S., Al-Shami A., Harik G., Alameddine I., El-Fadel M., Blasi C. Identification and prioritization of areas with high environmental risk in Mediterranean coastal areas: A flexible approach // *Science of the Total Environment*. 2017. V. 590–591. P. 566–578. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.221

26. Zhang H., Wang Y., Hu J., Ying Q., Hu X.M. Relationships between meteorological parameters and criteria air pollutants in three megacities in China // *Environmental Research*. 2015. V. 140. P. 242–254. doi: 10.1016/j.envres.2015.04.004

27. Liang C.S., Duan F.K., He K.B., Ma Y.L. Review on recent progress in observations, source identifications and countermeasures of PM_{2.5} // *Environmental International*. 2016. V. 86. P. 150–170. doi: 10.1016/j.envint.2015.10.016

References

1. Chen R., Hu B., Liu Y., Xu J., Yang G., Xu D., Chen C. Beyond PM_{2.5}: The role of ultrafine particles on adverse health effects of air pollution // *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – General Subjects*. 2016. V. 1860. No. 12. P. 2844–2855. doi: 10.1016/j.bbagen.2016.03.019

2. Veremchuk L.V., Tsarouhas K., Vitkina T.I., Mineeva E.E., Gvozdenko T.A., Antonyuk M.V., Rakitskii V.N., Sidletskaia K.A., Tsatsakis A.M., Golokhvast K.S. Impact evaluation of environmental factors on respiratory function of asthma patients living in urban territory // *Environmental Pollution*. 2018. V. 235. P. 489–496. doi: 10.1016/j.envpol.2017.12.122

3. Levanchuk A.V. Environmental pollution by products of wear and tear automobile-road complex // *Gigiena i sanitariya*. 2014. V. 93. No. 6. P. 17–21 (in Russian).

4. Longhin E., Gualtieri M., Capasso L., Bengalli R., Mollerup S., Holme J.A., Øvrevik J., Casadei S., Benedetto C., Parenti P., Camatini M. Physico-chemical properties and biological effects of diesel and biomass particles // *Environ. Pollut.* 2016. V. 215. P. 366–375. doi: 10.1016/j.envpol.2016.05.015

5. Pardo M., Porat Z., Rudich A., Schauer J.J., Rudich Y. Repeated exposures to roadside particulate matter extracts suppresses pulmonary defense mechanisms, resulting in lipid and protein oxidative damage // *Environ. Pollut.* 2016. V. 210. P. 227–237. doi: 10.1016/j.envpol.2015.12.009

6. Paulin L., Hansel N. Particulate air pollution and impaired lung function [version 1; peer review: 3 approved] // *F1000Research*. 2016. V. 5. (F1000 Faculty Rev). Article No. 201. doi: 10.12688/f1000research.7108.1

7. Veremchuk L.V., Mineeva E.E., Vitkina T.I., Gvozdenko T.A., Golokhvast K.S. Impact of atmospheric microparticles and heavy metals on external respiration function of urbanized territory population // *ROMJ*. 2017. V. 6. No. 4. P. 402–407. doi: 10.15275/rusomj.2017.0402

8. Zivin J.G., Neidell M. Air pollution's hidden impacts // *Science*. 2018. V. 359. No. 6371. P. 39–40. doi: 10.1126/science.aap7711.

9. Fang X., Fang B., Wang C., Xia T., Bottai M., Fang F., Yang C. Relationship between fine particulate matter, weather condition and daily non-accidental mortality in Shanghai, China: A Bayesian approach // *PLoS ONE*. 2017. V. 12. No. 11. Article No. e0187933. doi: 10.1371/journal.pone.0187933

10. Golokhvast K.S. Atmospheric suspensions of the cities of the Far East. Vladivostok: Izdatelstvo DVFU, 2013. 178 p. (in Russian).

11. Contreras-Ochando L., Ferry C. Wind-sensitive interpolation of urban air pollution forecasts // *Procedia Computer Science*. 2016. V. 80. P. 313–323. doi: 10.1016/j.procs.2016.05.343

12. Makar P.A., Gong W., Hogrefe C., Zhang Y., Curci G., Žabkar R., Milbrandt J., Im U., Balzarini A., Baró R., Bianconi R., Cheung P., Forkel R., Gravel S., Hirtl M., Honzak L., Hou A., Jiménez-Guerrero P., Langer M., Moran M.D., Pabla B., Pérez J.L., Pirovano G., San José R., Tuccella P., Werhahn J., Zhang J., Galmarini S. Feedbacks between air pollution and weather, part 2: Effects on chemistry // *Atmospheric Environment*. 2015. V. 115. P. 499–526. doi: 10.1016/j.atmosenv.2014.10.021

13. Mizuo K., Hiromasa U., Zhiwei H., Rei K., Yayoi I., Hidenori K. Synergy between air pollution and urban meteorological changes through aerosol-radiation-diffusion feedback – A case study of Beijing in January 2013 // *Atmospheric Environment*. 2017. V. 171. P. 98–110. doi: 10.1016/j.atmosenv.2017.10.018
14. Abbasov P.A., Odintsova E.Yu., Shatrova N.E. The potential of self-cleaning of the air basin of the city of Vladivostok // *Academia. Arkhitektura i stroitelstvo*. 2009. No. 5. P. 132–135 (in Russian).
15. Zhou Y., Cheng S., Chen D., Lang J., Wang G., Xu T., Wang X., Yao S. Temporal and spatial characteristics of ambient air quality in Beijing, China // *Aerosol and Air Quality Research*. 2015. V. 15. No. 5. P. 1868–1880. doi: 10.4209/aaqr.2014.11.0306
16. Yankova V.I., Gvozdenko T.A., Golokhvast K.S., Chaika V.V., Gorodnyi V.A. Granulometric analysis of atmospheric particles from environmentally favorable and problematic areas of Vladivostok // *Zdorov'e. Meditsinskaya ekologiya. Nauka*. 2014. V. 2. No. 56. P. 62–66 (in Russian).
17. Barskova L.S., Vitkina T.I., Gvozdenko T.A., Veremchuk L.V., Golokhvast K.S. Assessment of air pollution by small-sized suspended particulate matter in urbanized territories with various technogenic load (on the example of Vladivostok, Russia) // *Russian Open Medical Journal*. 2019. V. 8. No. 3. Article No. e0304. doi: 10.15275/rusomj.2019.0304
18. Singh K.P., Gupta S., Rai P. Identifying pollution sources and predicting urban air quality using ensemble learning methods // *Atmospheric Environment*. 2013. V. 80. P. 426–437. doi: 10.1016/j.atmosenv.2013.08.023
19. FGBU “Primorskoe UGMS” (in Russian) [Internet resource] <https://primogoda.ru/news/ecology> (Accessed: 30.07.2021).
20. Beier C.M., Caputo J., Lawrence G.B., Sullivan T.J. Loss of ecosystem services due to chronic pollution of forests and surface waters in the Adirondack region (USA) // *Journal of Environmental Management*. 2017. V. 191. P. 19–27. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.12.069
21. Waste incinerator poisons the air of Vladivostok (in Russian) [Internet resource] <https://www.ecoindustry.ru/NEWS/view/42464.html?ysclid=1tfl5nnrid488830001> (Accessed: 30.07.2021).
22. Azarov V.K., Koutenev V.F., Saikin A.M. Vehicle and its influence on the system “road – environment – man” // *Trudy NAMI*. 2013. No. 254. P. 47–57 (in Russian).
23. Bezuglaya E.Yu., Smirnova I.V. The air of cities and its changes. Sankt-Peterburg: Asterion, 2008. 253 p. (in Russian).
24. Fiddes S.L., Pezza A.B., Mitchell T.A., Kozyniak K., Mills D. Synoptic weather evolution and climate drivers associated with winter air pollution in New Zealand // *Atmospheric Pollution Research*. 2016. V. 7. No. 6. P. 1082–1089. doi: 10.1016/j.apr.2016.06.014
25. Marignani M., Bruschi D., Astiaso-Garcia D., Frondoni R., Carli E., Pinna M.S., Cumo F., Gugliermetti F., Saatkamp A., Doxa A., Queller M., Chaieb M., Bou Dagher-Kharrat M., El Zein R., El Jeitani S., Khater C., Mansour S., Al-Shami A., Harik G., Alameddine I., El-Fadel M., Blasi C. Identification and prioritization of areas with high environmental risk in Mediterranean coastal areas: A flexible approach // *Science of the Total Environment*. 2017. V. 590–591. P. 566–578. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.221
26. Zhang H., Wang Y., Hu J., Ying Q., Hu X.M. Relationships between meteorological parameters and criteria air pollutants in three megacities in China // *Environmental Research*. 2015. V. 140. P. 242–254. doi: 10.1016/j.envres.2015.04.004
27. Liang C.S., Duan F.K., He K.B., Ma Y.L. Review on recent progress in observations, source identifications and countermeasures of PM_{2.5} // *Environmental International*. 2016. V. 86. P. 150–170. doi: 10.1016/j.envint.2015.10.016