

УДК 502.3

## Изменчивость приземной концентрации твердых частиц $PM_1$ – $PM_{10}$ в воздушном бассейне южного Прибайкалья

М.Ю. Шиховцев<sup>✉</sup>, В.А. Оболкин, Т.В. Ходжер, Е.В. Моложникова\*

*Лимнологический институт СО РАН  
664033, г. Иркутск, Улан-Баторская, 3*

Поступила в редакцию 15.02.2023 г.;  
после доработки 24.03.2023 г.;  
принята к печати 14.04.2023 г.

Впервые приведены результаты исследований содержания твердых частиц  $PM_1$ – $PM_{10}$  в атмосфере западного побережья южного Байкала с высоким временным разрешением. Установлено, что источниками поступления РМ в атмосферу южного Байкала являются как антропогенные, так и природные объекты. В зимний период увеличивается влияние объектов теплоэнергетики, о чем свидетельствуют синхронные повышения концентраций субмикронного аэрозоля  $PM_1$  и диоксида серы. В летний период значительный вклад в загрязнение атмосферы твердыми частицами вносят удаленные лесные пожары. Выявлена связь между повышением концентрации  $PM_1$  в атмосфере в исследуемом районе и мезометеорологическими особенностями (температурные инверсии и мезомасштабный перенос шлейфов от крупных ТЭЦ). Повышения концентраций  $PM_1$  в большинстве случаев происходят в ночные и утренние часы, что связано с уменьшением толщины пограничного слоя атмосферы.

*Ключевые слова:* южный Байкал, HYSPLIT, мониторинг атмосферы, твердые частицы (РМ), инверсии; South Baikal, HYSPLIT, atmospheric monitoring, particulate matter (PM), inversions.

### Введение

Устойчивый интерес к изучению загрязнения атмосферы твердыми частицами (РМ) обусловлен их негативным влиянием на различные среды. В ряде работ доказано, что РМ оказывают неблагоприятное воздействие на дыхательную и кровеносную системы человека даже в тех случаях, когда их концентрации не превышают допустимые уровни [1, 2]. Изменения в дыхательной, сердечно-сосудистой и когнитивной функциях снижают продуктивность работников, что, в свою очередь, приводит к неблагоприятным экономическим последствиям [3, 4]. Было установлено, что загрязнение воздуха твердыми частицами уменьшает атмосферную прозрачность для световых волн [5] и метеорологическую дальность видимости [6], влияет на радиационный баланс атмосферы и образование облаков и осадков [7, 8], что, в свою очередь, может являться одной из причин снижения урожайности в сельском хозяйстве [9]. Учитывая, что РМ могут переноситься на значительные расстояния в сотни и тысячи

километров от источника выбросов, загрязнение атмосферы твердыми частицами представляет собой глобальную угрозу. Эти причины обуславливают необходимость непрерывного мониторинга РМ во многих странах в рамках стратегии сокращения выбросов [10].

В настоящее время исследования и мониторинг в этом направлении ведутся, с одной стороны, путем измерения счетной и массовой концентрации РМ как с наземных станций, так и со спутников. С другой стороны, развиваются физико-статистические модели распространения твердых частиц [11], проводится моделирование их переноса и диффузии в атмосфере [12]. Оценки и прогнозирование атмосферных характеристик, включая РМ, могут быть уточнены для конкретного места с помощью искусственных нейронных сетей, устанавливающих связи между атмосферными характеристиками [13, 14].

Источниками поступления аэрозоля в атмосферу выступают различные естественные и антропогенные объекты. К природным источникам, вносящим более 80% аэрозоля в атмосферу [15], относят: выветривание почв и мирового океана [16], лесные пожары [17], вулканическую активность и жизнедеятельность растений [18]. Основные антропогенные источники – сжигание ископаемого органического топлива (уголь, нефть, бензин) и биомассы [19], строительство, горнодобывающая промышленность,

\* Максим Юрьевич Шиховцев (max97Irk@yandex.ru); Владимир Аркадьевич Оболкин (obolkin@lin.irk.ru); Тамара Викторовна Ходжер (khodzher@lin.irk.ru); Елена Владимировна Моложникова (yelena@lin.irk.ru).

производство цемента и керамики и другая промышленная деятельность [20], износ дорожного покрытия, шин и тормозов, а также образование вторичного аэрозоля [21].

### Объект и методы исследования

В работе использованы данные о массовой концентрации твердых частиц аэрозоля различных размерных фракций (от 1 до 10 мкм), полученные на станции мониторинга Листвянка, расположенной на западном побережье оз. Байкал (51,84° с.ш., 104,89° в.д.) в 60 км к юго-востоку от Иркутска. Согласно результатам модельных расчетов воздушных течений пункт измерений находится под воздействием мезомасштабной вихревой структуры линейным размером порядка 10–20 км [22]. Расположение станции на вершине прибрежного холма (на высоте ~ 200 м от уреза воды) позволяет уменьшить влияние локальных источников загрязнения атмосферы, расположенных в пос. Листвянка, и отследить влияние региональных источников [23, 24]. Для определения счетной и массовой концентрации использовался лазерный фотометр DUSTTRAK 8533 (TSI Incorporated, США) с пределом обнаружения 0,001 мг/м<sup>3</sup> и относительной ошибкой 20%. Концентрация диоксида серы регистрировалась хемилюминесцентным газоанализатором СВ-320 (ОПТЭК, Санкт-Петербург, Россия) с разрешением 0,001 мг/м<sup>3</sup>, приведенной погрешностью ± 25% в диапазоне от 0 до 0,05 мг/м<sup>3</sup> и относительной погрешностью ± 25% в диапазоне от 0,05 до 2,0 мг/м<sup>3</sup>. Для определения влияния переноса от региональных источников на состояние воздушного бассейна над озером проведена серия детальных расчетов с помощью модели HYSPLIT, разработанной Национальным управлением океанических и атмосферных исследований США (<https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>). В качестве входных данных использован метеорологический архив GDAS с сеткой 1° × 1° за период с 1 января по 31 декабря 2021 г. Для каждого дня построены прямые траектории движения воздушных масс. Все траектории моделировались на 00:00 UTC. Продолжительность траекторий была выбрана равной 24 ч. Расчеты проводились для трех высотных уровней: 250, 500 и 800 м над уровнем земли (AGL). Первый уровень (250 м) был выбран как отображающий поведение частицы в нижнем слое атмосферы. Второй (500 м) и третий (800 м) уровни характеризуют перенос дымовых шлейфов от промышленных объектов с высокими трубами [25]. В качестве источников были выбраны промышленные города Иркутск, Ангарск, Шелехов. Результаты расчетов были проанализированы с помощью геоинформационной системы QGIS 3.18. Данные радиозондирования атмосферы были получены на ст. Ангарск, расположенной в 100 км к северо-западу от ст. Листвянка (<https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>).

## Результаты исследования и обсуждение

### Перенос воздушных масс и метеорологические параметры

Важными факторами, влияющими на загрязнение воздуха в определенной области, являются объем местных выбросов, рельеф, метеорологические условия и специфика региональной циркуляции атмосферы [26]. Согласно работе [27] в 69% воздушные массы приходят на южную котловину озера с западного и северо-западного направлений. Однако повторяемость направления переноса значительно изменяется от месяца к месяцу, что в совокупности с другими метеопараметрами (например, температурой и влажностью) отражается и на количестве поступающих загрязняющих веществ. На рис. 1 отображена повторяемость направлений переноса воздушных масс от крупных стационарных источников Иркутской агломерации в 2021 г.

### Временная изменчивость концентрации твердых частиц

Проанализировав динамику содержания РМ в атмосфере на ст. Листвянка, мы установили его значительные изменения в течение года. Среднемесячные концентрации РМ<sub>10</sub> регистрировались в пределах от 6 до 36 мкг/м<sup>3</sup> с медианами от 5 до 13 мкг/м<sup>3</sup>. Среднемесячные значения РМ<sub>2,5</sub> за период исследования варьировались в пределах от 4 до 32 мкг/м<sup>3</sup> (медианы — от 4 до 12 мкг/м<sup>3</sup>). На рис. 2 представлена диаграмма временной изменчивости среднечасовых концентраций РМ<sub>10</sub> на ст. Листвянка. На ней отражены медиана, первая (Q<sub>1</sub>) и третья (Q<sub>3</sub>) квантили, минимальная и максимальная концентрации, а также возможные выбросы, которые определяются как нетипичные значения, выходящие за пределы полуротного произведения разницы между Q<sub>3</sub> и Q<sub>1</sub>. Наибольшие концентрации крупнодисперсных частиц наблюдались в июле и августе 2021 г. с максимумом РМ<sub>10</sub>, равным 241 мкг/м<sup>3</sup>, что связано с экстремальным загрязнением атмосферы лесными пожарами в Якутии, описанным в [28].

Для лучшего понимания процессов переноса и вероятных источников поступления твердых частиц в атмосферу над южным Байкалом их разделили на две группы: субмикронные — с аэродинамическим диаметром менее 1 мкм (РМ<sub>1</sub>), и крупнодисперсные — с диаметром от 1 до 10 мкм (определяется как разность между РМ<sub>10</sub> и РМ<sub>1</sub>). На рис. 3 (цв. вкладка) показана динамика содержания РМ<sub>1</sub> и РМ<sub>10</sub> – РМ<sub>1</sub> в атмосфере над ст. Листвянка.

Анализ рис. 3 показывает, что наибольшие концентрации субмикронного аэрозоля отмечаются с января по март и в августе. Траекторный анализ, представленный на рис. 1, показал, что наибольшая повторяемость переноса от источников Иркутской промышленной агломерации в южную котловину озера отмечается в январе. Это в совокупности с увеличением интенсивности работы энергоисточников

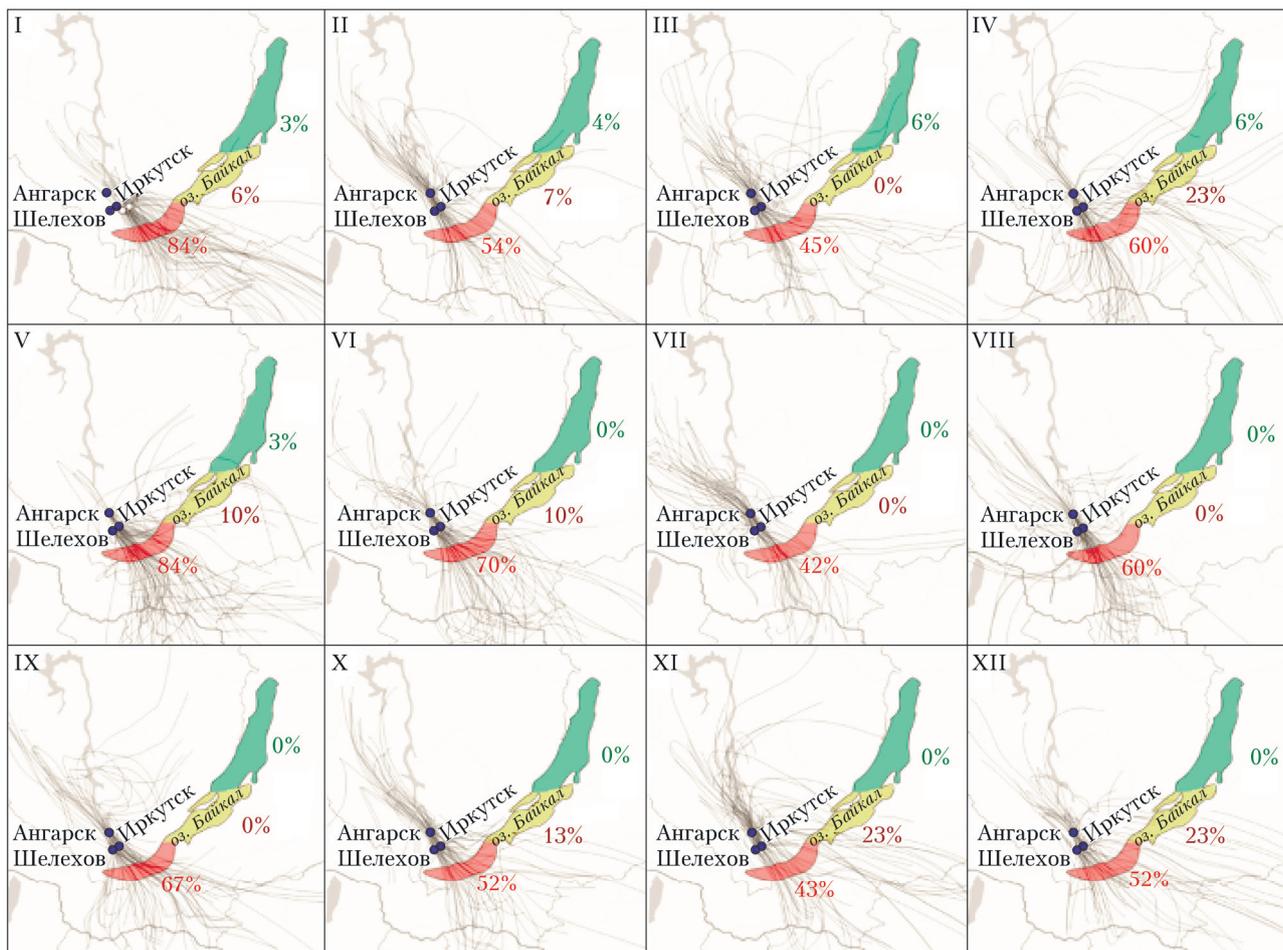


Рис. 1. Повторяемость направлений переноса воздушных масс от источников загрязнения атмосферы, расположенных в г. Иркутске, Ангарске, Шелехове, на южную (красный), среднюю (желтый) и северную (зеленый) котловины оз. Байкал, рассчитанная с помощью модели HYSPLIT в 2021 г. (месяцы обозначены римскими цифрами) (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.36-2023/iss.06>)

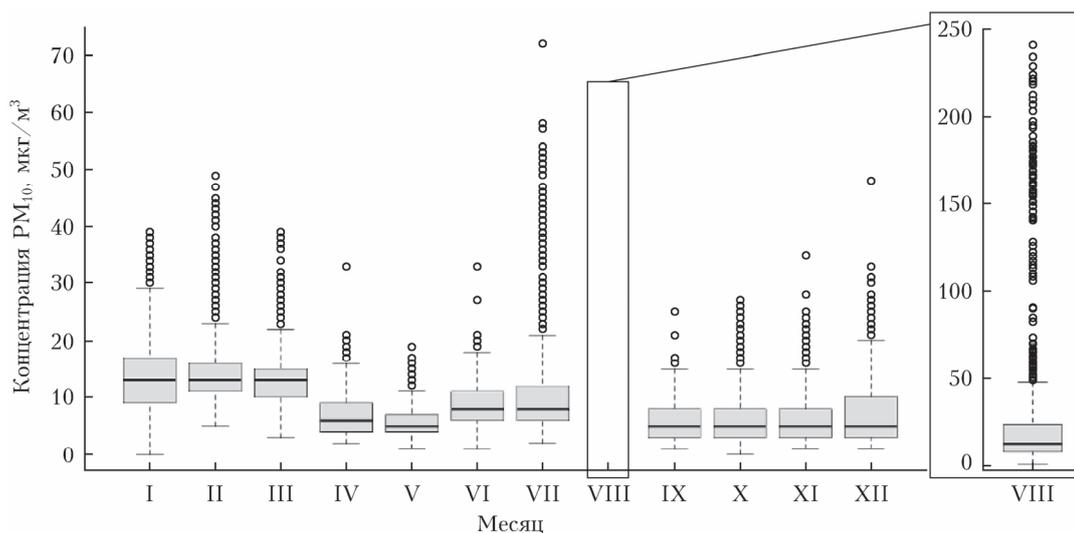


Рис. 2. Внутригодовая изменчивость концентрации  $PM_{10}$  на ст. Листвянка: медиана (полужирная линия),  $Q_1$  (нижняя граница «ящика») и  $Q_3$  (верхняя граница «ящика»); нетипичные значения, выходящие за пределы полуторного произведения разницы между  $Q_3$  и  $Q_1$  (кружки)

и конденсационным образованием мелких частиц из газообразных выбросов вызывает зимний максимум

загрязнения [23]. После окончания отопительного сезона отмечаются уменьшение концентрации суб-

микронных частиц и увеличение количества крупно-дисперсных частиц (выделено зеленым на рис. 3). Такие изменения могут быть обусловлены местным природным фоном в совокупности с повышением температуры и относительной влажности в летний период (ввиду близости крупного открытого водоема), что способствует конденсации водяных паров на поверхности мелких частиц, приводя к их укрупнению [29]. Так же из анализа рис. 3 видно, что в с января по март 2022 г. увеличилась концентрация субмикронного аэрозоля примерно на 30% относительно такого же периода в 2021 г. (средняя концентрация  $PM_{10}$  за январь – март 2022 г.  $\sim 13$   $\mu\text{кг}/\text{м}^3$ , за январь – март 2021 г.  $\sim 10$   $\mu\text{кг}/\text{м}^3$ ). Однако для установления причин, повлиявших на это, потребуются дальнейшие наблюдения.

При сопоставлении среднемесячных концентраций  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$  на ст. Листвянка с результатами других исследователей (таблица) видно, что концентрации, полученные нами, соизмеримы со значениями, измеренными на «сельских» станциях в других регионах мира.

26 длительных эпизодов (продолжительностью более 2 ч), 19 из которых зафиксированы в ночные и утренние часы. Это, вероятно, связано с переносом выбросов со стороны удаленных источников в системе ночных тропосферных струйных течений [38] и уменьшением высоты пограничного слоя атмосферы (следовательно, накоплением твердых частиц в нижнем приземном слое атмосферы). В дневное время повышения концентраций  $PM_{10}$  наблюдались значительно реже из-за развития турбулентности и роста высоты атмосферного пограничного слоя [39, 40].

Стоит отметить, что над Байкалом часто образуются слои приземных термических инверсий в пределах 1 км [41]. На рис. 4 (цв. вкладка) показан эпизод изменения концентрации  $PM_{10}$ , произошедший 7.01.2022 г. в условиях термической инверсии. Вертикальный профиль температуры на ст. Ангарск (рис. 5) говорит о наличии приземной инверсии в 00:00 7 января, которая способствовала повышению концентраций примесей в нижнем слое атмосферы. После этого вместе с северо-западными воз-

Среднемесячные концентрации  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$  в различных регионах мира

Место	Тип станции	Период измерения	$PM_{10}$ , $\mu\text{кг}/\text{м}^3$	$PM_{2,5}$ , $\mu\text{кг}/\text{м}^3$	Источник
Листвянка, Россия	сельская	2021 г., лето	9–36	5–32	Данное исследование
		2021 г., зима	7–15	7–13	
Акватория Южного Байкала, Россия	фоновая	2020 г., лето	1,3–3,3	–	[30]
Акватория Среднего Байкала, Россия	фоновая	2020 г., лето	0,4–2,3	–	[30]
Ланьчжоу, Китай	городская	2015/2016 г., зима	–	106–122	[31]
		2015 г., лето	–	50–66	
Чеджудо, Южная Корея	сельская	2011 г., март	11–130	5–78	[32]
Долина Кланг, Малазия	городская	2011 и 2012 гг., лето	–	17–118	[21]
		2010/2011 г., зима	–	10–36	
Бургос, Филиппины	сельская	2015 г., лето	–	7–17	[33]
		2014/2015 г., зима	–	9–19	
Ташкент, Узбекистан	городская	2011/2014 г., зима	64	41	[34]
		2011–2014 гг., лето	46	22	
Дака, Бангладеш	городская	2002–2005 гг., лето	50–80	20–60	[35]
		2002–2005 гг., зима	100–250	70–165	
Тегеран, Иран	городская	2012–2017 гг., лето	91–98	55–62	[36]
		2012–2017 гг., зима	80–93	60–85	
Пуне, Индия	сельская	2011 г., лето	48–85	40–60	[37]

Содержание частиц  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$  в атмосфере Листвянки значительно ниже, чем в «городских» условиях, но выше, чем в «фоновых» районах.

### Случаи экстремального повышения концентраций $PM_{10}$

Для выяснения причин возникновения ситуаций экстремального загрязнения атмосферы субмикронным аэрозолем  $PM_{10}$  в районе Южного Байкала нами детально исследованы случаи, когда концентрации  $PM_{10}$  превышали условную границу 25  $\mu\text{кг}/\text{м}^3$ . С января 2021 г. по март 2022 г. зарегистрировано 28 случаев. После выбраковки мы выполнили анализ

душными потоками слабодисперсионный шлейф достиг ст. Листвянка к 06:00 (по данным <https://www.ventusky.com> скорость ветра на высоте 250 м изменялась в пределах до 20 м/с). Эти метеорологические условия привели к повышению концентрации  $SO_2$  на станции с 10 до 80  $\mu\text{кг}/\text{м}^3$  с дальнейшим ростом до 224  $\mu\text{кг}/\text{м}^3$  к 15:00. Зафиксированное спустя несколько часов возрастание концентрации субмикронного аэрозоля ( $PM_{10}$ ) с 10 до 32  $\mu\text{кг}/\text{м}^3$ , вероятно, вызвано единым источником – сжиганием твердого органического топлива [23]. Проведенный траекторный анализ показал, что воздушные массы проходили над городами Иркутск и Ангарск, где расположены несколько крупных ТЭЦ.

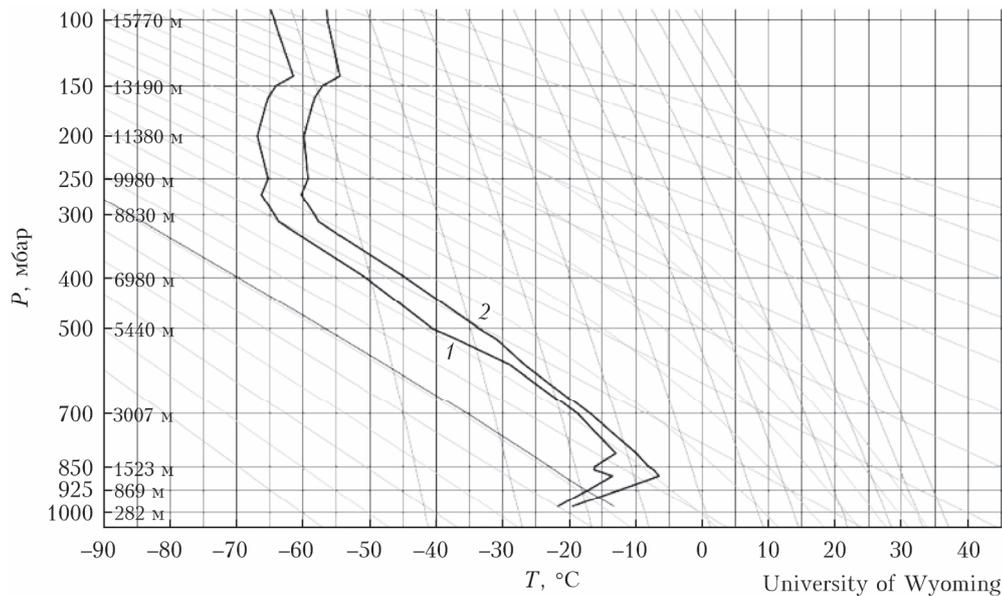


Рис. 5. Вертикальный профиль температуры, измеренный на подъеме (кривая 1) и на спуске (2) аэростата, на ст. Ангарск 7.01.2022 г., 00:00 (<https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>)

Пик повышения  $\text{SO}_2$ , возникший 9.01.2022 г. в 01:30, вызван теми же факторами, что и пик 7.01.2022 г., однако ввиду отсутствия солнечного света формирование вторичного аэрозоля из выбрасываемых объектами теплоэнергетики веществ происходило не так активно, поэтому возрастание  $\text{SO}_2$  не сопровождалось повышением  $\text{PM}_{10}$  на станции.

## Заключение

Проанализированные результаты непрерывного мониторинга твердых частиц на ст. Листвянка позволили сделать следующие выводы. Среднемесячные концентрации  $\text{PM}_{10}$  и  $\text{PM}_{2,5}$  оказались меньше, но сопоставимы со значениями, измеренными на станциях «сельского» типа, и на порядок меньше, чем на станциях «городского» типа, представленными в работах других исследователей.

В зимний период были обнаружены случаи синхронного повышения концентраций субмикронного аэрозоля ( $\text{PM}_{10}$ ) и  $\text{SO}_2$ , вызванные сжиганием твердого органического топлива на ТЭЦ, расположенной к северо-западу от станции. В летний период значительный вклад в загрязнение атмосферы твердыми частицами внесли удаленные лесные пожары. Установление факторов, ответственных за повышение концентраций субмикронного аэрозоля в январе – марте 2022 г. (~ на 30%) по отношению к аналогичному периоду 2021 г., требует дальнейшего изучения.

Обнаружена взаимосвязь между ростом концентрации  $\text{PM}_{10}$  и возникновением температурных инверсий в районе удаленных источников. Повышения  $\text{PM}_{10}$  в Листвянке в большинстве случаев происходят в ночные и утренние часы, что связано с уменьшением толщины пограничного слоя атмосферы. Неоднородность пространственного распределения  $\text{PM}_{10}$  обусловлена формированием мезомас-

штабных вихревых структур, наиболее выраженных в дневное время, и локальных воздушных циркуляций, что подтверждено результатами моделирования воздушных течений с высоким горизонтальным разрешением. В целом анализ, проведенный в настоящей работе, подтверждает влияние крупных антропогенных источников на качество воздуха в удаленных районах.

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках государственного задания ЛИН СО РАН № 0279-2021-0014 (тема «Исследование роли атмосферных выпадений на водные и наземные экосистемы бассейна оз. Байкал, идентификация источников загрязнения атмосферы»).

## Список литературы

1. Southerland V.A., Brauer M., Mohegh A., Hammer M.S., van Donkelaar A., Martin R.V., Apte J.S., Anenberg S.C. Global urban temporal trends in fine particulate matter ( $\text{PM}_{2,5}$ ) and attributable health burdens: Estimates from global datasets // *Lancet Planet. Health*. 2022. V. 6, N 2. P. e139–e146.
2. Tiotiu A.I., Novakova P., Nedeva D., Chong-Neto H.J., Novakova S., Steiropoulos P., Kowal K. Impact of air pollution on asthma outcomes // *Int. J. Environ. Res. Publ. Health*. 2020. V. 17, N 17. P. 6212.
3. Chang T., Graff Zivin J., Gross T., Neidell M. Particulate pollution and the productivity of pear packers // *Am. Econ. J.: Econ. Policy*. 2016. V. 8, N 3. P. 141–169.
4. Aragon F.M., Miranda J.J., Oliva P. Particulate matter and labor supply: The role of caregiving and nonlinearities // *J. Environ. Econ. Manag.* 2017. V. 86. P. 295–309.
5. Kovadlo P., Shikhovtsev A., Lukin V., Kochugova E. Solar activity variations inducing effects of light scattering and refraction in the Earth's atmosphere // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2018. V. 179. P. 468–471. DOI: 10.1016/j.jastp.2018.06.001.

6. Shi Y., Chen J., Hu D., Wang L., Yang X., Wang X. Airborne submicron particulate (PM<sub>1</sub>) pollution in Shanghai, China: Chemical variability, formation/dissociation of associated semi-volatile components and the impacts on visibility // *Sci. Total Environ.* 2014. V. 473. P. 99–206.
7. Gharibzadeh M., Bidokhti A.A., Alam K. The interaction of ozone and aerosol in a semi-arid region in the Middle East: Ozone formation and radiative forcing implications // *Atmos. Environ.* 2021. V. 245. P. 118015.
8. Liu J., Guo Z., Zhou L., Wang L., Wang J., Yan Q., Hua D. Inversion and analysis of aerosol optical properties and lidar ratios based on sky-radiometer and Raman lidar measurements in Xi'an, China // *Front. Environ. Sci.* 2022. V. 10. P. 2082.
9. Pandya S., Gadekallu T.R., Maddikunta P.K.R., Sharma R. A study of the impacts of air pollution on the agricultural community and yield crops (Indian context) // *Sustainability.* 2022. V. 14, N 20. P. 13098.
10. Hoffman S., Jasiński R. The use of multilayer perceptrons to model PM<sub>2.5</sub> concentrations at air monitoring stations in Poland // *Atmosphere.* 2023. V. 14. P. 96.
11. Li Y., Chen Q., Zhao H., Wang L., Tao R. Variations in PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, and PM<sub>1.0</sub> in an urban area of the Sichuan Basin and their relation to meteorological factors // *Atmosphere.* 2015. V. 6, N 1. P. 150–163.
12. Wei J., Li Z., Lyapustin A., Sun L., Peng Y., Xue W., Cribb M. Reconstructing 1-km-resolution high-quality PM<sub>2.5</sub> data records from 2000 to 2018 in China: Spatiotemporal variations and policy implications // *Remote Sens. Environ.* 2021. V. 252. P. 112136.
13. Kurnaz G., Demir A.S. Prediction of SO<sub>2</sub> and PM<sub>10</sub> air pollutants using a deep learning-based recurrent neural network: Case of industrial city Sakarya // *Urban Climate.* 2022. V. 41. P. 101051.
14. Eren B., Aksangür I., Erden C. Predicting next hour fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) in the Istanbul Metropolitan City using deep learning algorithms with time windowing strategy // *Urban Clim.* 2023. V. 48. P. 101418.
15. Ивлев Л.С. Механизмы образования и распада атмосферных аэрозолей и облачности и их экологическое значение // *Биосфера.* 2013. Т. 5, № 2. С. 182–210.
16. Mayer K.J., Wang X., Santander M.V., Mitts B.A., Sauer J.S., Sultana C.M., Prather K.A. Secondary marine aerosol plays a dominant role over primary sea spray aerosol in cloud formation // *ACS Central Sci.* 2020. V. 6, N 12. P. 2259–2266.
17. Бизин М.А., Попова С.А., Куценогий К.П. Влияние лесных пожаров на массовую концентрацию, дисперсный и химический состав атмосферного аэрозоля в региональном масштабе // *Оптика атмосф. и океана.* 2013. Т. 26, № 6. С. 484–489.
18. Søreide J.E., Leu E.V., Berge J., Graeve M., Falk-Petersen S. Timing of blooms, algal food quality and *Calanus glacialis* reproduction and growth in a changing Arctic // *Glob. Change Biol.* 2010. V. 16, N 11. P. 3154–3163.
19. Popovicheva O.B., Shonija N.K., Persiantseva N., Timofeev M., Diapouli E., Eleftheriadis K., Borgese L., Nguyen X.A. Aerosol pollutants during agricultural biomass burning: A case study in Ba Vi region in Hanoi, Vietnam // *Aerosol. Atmos. Chem.* 2017. V. 17. P. 2762–2779.
20. Ji X., Qin R., Shi C., Yang L., Yao L., Deng S., Jiang G. Dynamic landscape of multi-elements in PM<sub>2.5</sub> revealed by real-time analysis // *Environ. Int.* 2022. V. 170. P. 107607.
21. Amil N., Latif M.T., Khan M.F., Mohamad M. Seasonal variability of PM<sub>2.5</sub> composition and sources in the Klang Valley urban-industrial environment // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16, N 8. P. 5357–5381.
22. Shikhovtsev A.Y., Kovadlo P.G., Lezhenin A.A., Korobov O.A., Kiselev A.V., Russkikh I.V., Kolobov D.Y., Shikhovtsev M.Y. Influence of atmospheric flow structure on optical turbulence characteristics // *Appl. Sci.* 2023. V. 13, N 3. P. 1282.
23. Obolkin V., Molozhnikova E., Shikhovtsev M., Netsvetaeva O., Khodzher T. Sulfur and nitrogen oxides in the atmosphere of Lake Baikal: Sources, automatic monitoring, and environmental risks // *Atmosphere.* 2021. V. 12, N 10. P. 1–10. DOI: 10.3390/atmos12101348.
24. Marinaite I., Penner I., Molozhnikova E., Shikhovtsev M., Khodzher T. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the atmosphere of the Southern Baikal Region (Russia): Sources and relationship with meteorological conditions // *Atmosphere.* 2022. V. 13, N 3. P. 420.
25. Shikhovtsev M.Yu., Molozhnikova Y.V. Inter-annual dynamics of regional and transboundary transport of air masses of the Baikal region for 2010–2018 // *Proc. SPIE.* 2020. V. 11560. P. 1–8. DOI: 10.1117/12.2574735.
26. Tiwari S., Bisht D.S., Srivastava A.K., Pipal A.S., Taneja A., Srivastava M.K., Attri S.D. Variability in atmospheric particulates and meteorological effects on their mass concentrations over Delhi, India // *Atmos. Res.* 2014. V. 145. P. 45–56.
27. Shikhovtsev M.Y., Molozhnikova Y.V. Inter-annual dynamics of regional and transboundary transport of air masses of the Baikal region for 2010–2018 // *Proc. SPIE.* 2020. V. 11560. P. 1318–1324.
28. Molozhnikova Y.V., Shikhovtsev M.Y., Popova A.K., Obolkin V.A., Khodzher T.V. Comparative analysis of satellite and continuous surface measurements of gas impurities in the air basin at the Listvyanka station, Lake Baikal // *Proc. SPIE.* 2022. V. 12341. P. 1048–1052.
29. Liu Z., Hu B., Wang L., Wu F., Gao W., Wang Y. Seasonal and diurnal variation in particulate matter (PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub>) at an urban site of Beijing: Analyses from a 9-year study // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2015. V. 22. P. 627–642.
30. Marinaite I.I., Potyomkin V.L., Molozhnikova E.V., Penner I.E., Shikhovtsev M.Yu., Izosimova O.N., Khodzher T.V. Polycyclic aromatic hydrocarbons and PM<sub>10</sub> solid particles above the water area of Lake Baikal in the summer of 2020 // *Proc. SPIE.* 2021. V. 11916. P. 1–6. DOI: 10.1117/12.2600470.
31. Zhang M., Jia J., Wang B., Zhang W., Gu Ch., Zhang X., Zhao Yu. Source apportionment of fine particulate matter during the day and night in Lanzhou, NW China // *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2022. V. 19, N 12. P. 7091.
32. Kirillova E.N., Andersson A., Han J., Lee M., Gustafsson Ö. Sources and light absorption of water-soluble organic carbon aerosols in the outflow from northern China // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. V. 14, N 3. P. 1413–1422.
33. Bagtasa G., Cayetano M.G., Yuan C.S. Seasonal variation and chemical characterization of PM<sub>2.5</sub> in northwestern Philippines // *Atmos. Chem. Phys.* 2018. V. 18, N 7. P. 4965–4980.
34. Amonov M., Nishonov B. Seasonal variability of PM concentration in Tashkent // *IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng.* 2020. V. 869, N 2. P. 022030.
35. Rouf M.A., Nasiruddin M., Hossain A., Islam M. Trend of particulate matter PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in Dhaka City // *Bangladesh J. Sci. Industrial Res.* 2011. V. 46, N 3. P. 389–398.
36. Yousefian F., Faridi S., Azimi F., Aghaei M., Sham-sipour M., Yaghmaeian K., Sadegh Hassanvand M.

- Temporal variations of ambient air pollutants and meteorological influences on their concentrations in Tehran during 2012–2017 // *Sci. Report.* 2020. V. 10, N 1. P. 1–11.
37. *Bisht D.S., Srivastava A.K., Pipal A.S., Srivastava M.K., Pandey A.K., Tiwari S., Pandithurai G.* Aerosol characteristics at a rural station in southern peninsular India during CAIPEEX-IGOC: Physical and chemical properties // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2015. V. 22. P. 5293–5304.
  38. *Obolkin V.A., Potemkin V.L., Makukhin V.L., Chipanina Y.V., Marinayte I.I.* Low-level atmospheric jets as main mechanism of long-range transport of power plant plumes in the Lake Baikal region // *Int. J. Environ. Stud.* 2014. V. 71, N 3.
  39. *Shikhovtsev A., Kovadlo P., Lukin V., Nosov V., Kiselev A., Kolobov D., Kopylov E., Shikhovtsev M., Avdeev F.* Statistics of the optical turbulence from the micrometeorological measurements at the Baykal Astrophysical Observatory Site // *Atmosphere.* 2019. V. 10. P. 661. DOI: 10.3390/atmos10110661.
  40. *Шиховцев А.Ю., Киселев А.В., Ковадло П.Г., Колобов Д.Ю., Лукин В.П., Томин В.Е.* Метод определения высот турбулентных слоев в атмосфере // *Оптика атмосф. и океана.* 2019. Т. 32, № 12. С. 994–1000; *Shikhovtsev A.Y., Kiselev A.V., Kovadlo P.G., Kolobov D.Y., Lukin V.P., Tomin V.E.* Method for estimating the altitudes of atmospheric layers with strong turbulence // *Atmos. Ocean. Opt.* 2020. V. 33, N 3. P. 295–301.
  41. *Шиховцев А.Ю.* Метод определения характеристик оптической турбулентности по лучу зрения астрономического телескопа // *Оптика атмосф. и океана.* 2022. Т. 35, № 1. С. 74–80; *Shikhovtsev A.Yu.* Method of determining optical turbulence characteristics by the line of sight of an astronomical telescope // *Atmos. Ocean. Opt.* 2022. V. 35, N 3. P. 303–309.

*M.Yu. Shikhovtsev, V.A. Obolkin, T.V. Khodzher, Ye.V. Molozhnikova.* **Variability of the ground concentration of particulate particles  $PM_1$ – $PM_{10}$  in the air basin of the southern Baikal region.**

The paper presents the results of studies of the content of particulate matter  $PM_1$ – $PM_{10}$  in the atmosphere of the western coast of South Baikal with high temporal resolution. It has been established that PM are emitted into the atmosphere of Southern Baikal from both anthropogenic and natural sources. In winter, the influence of thermal power engineering increases, as evidenced by synchronous increases in the concentrations of submicron aerosol  $PM_1$  and sulfur dioxide. In summer, remote forest fires make a significant contribution to atmospheric pollution with particulate matter. The relationship between the increase in the concentration of  $PM_1$  in the atmosphere in the region under study and mesometeorological features (temperature inversions and mesoscale transfer of plumes from large thermal power plants) has been revealed. Increases in  $PM_1$  concentrations in most cases occur during the night and morning hours, which is associated with a decrease in the thickness of the atmospheric boundary layer.

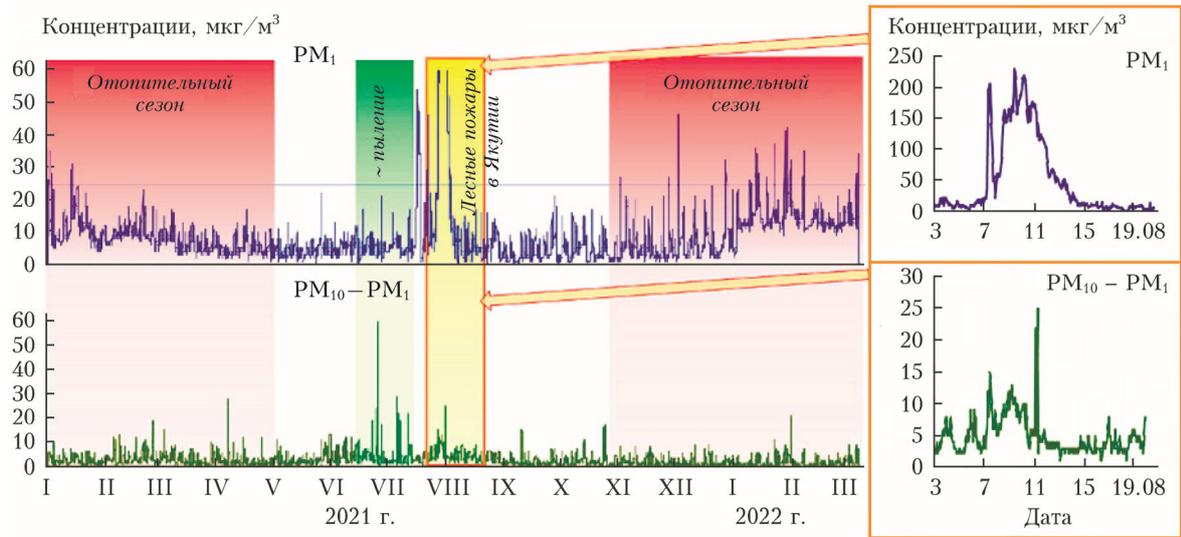


Рис. 3. Динамика содержания  $PM_{10} - PM_1$  и  $PM_1$  в атмосфере над ст. Листвянка: красным цветом показано повышение концентрации  $PM_1$  в отопительный период; желтым — рост концентраций  $PM_1$  и  $PM_{10} - PM_1$  во время лесных пожаров в Якутии; зеленым — летнее повышение  $PM_{10} - PM_1$ , обусловленное природным и метеорологическим факторами

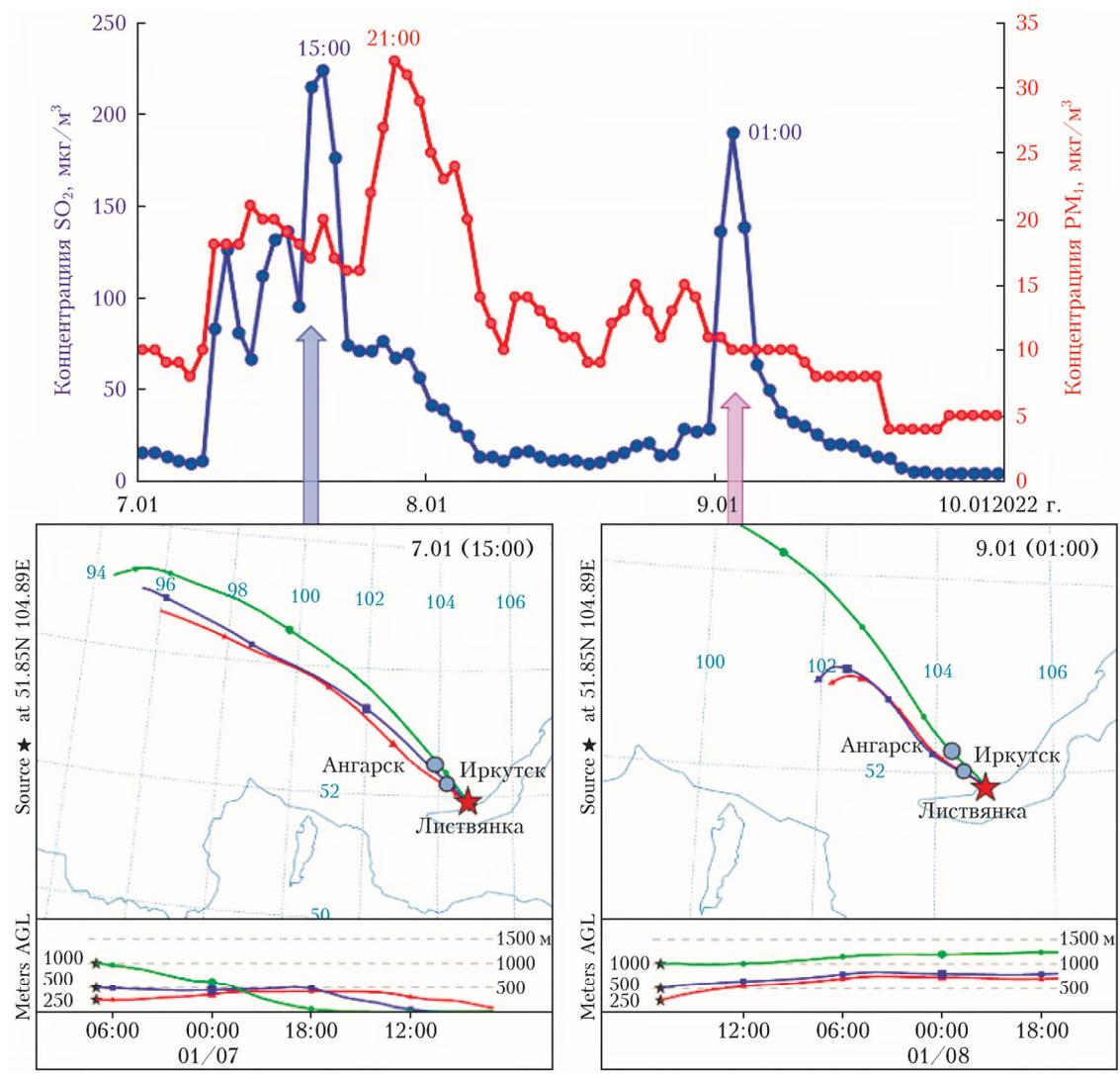


Рис. 4. Эпизоды повышения концентрации  $PM_1$  и  $SO_2$  на ст. Листвянка (7.01.2022 г. и 9.01.2022 г.) и траектории воздушных масс в соответствующие даты