

УДК 504.3.054

Концентрация $PM_{2,5}$ в приземной атмосфере над территорией г. Красноярск и акваторией незамерзающего участка реки Енисей

В.В. Заворуев^{✉1}, О.В. Соколова², Е.Н. Заворуева³, О.Э. Якубайлик^{1*}

¹Институт вычислительного моделирования СО РАН
660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, стр. 44

²ФИЦ КНЦ СО РАН
660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50

³Сибирский федеральный университет
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79/10

Поступила в редакцию 21.03.2023 г.;
после доработки 7.04.2023 г.;
принята к печати 10.04.2023 г.

Проведена сравнительная оценка величин концентраций $PM_{2,5}$ в приземной атмосфере над территорией города и акваторией р. Енисей. Для временных периодов от нескольких суток до двух лет показано, что за редким исключением загрязнение над рекой ниже, чем над территорией города. Эта закономерность сохраняется в периоды неблагоприятных метеорологических условий и во время загрязнения городской атмосферы дымом лесных пожаров.

Ключевые слова: атмосфера, $PM_{2,5}$, неблагоприятные метеорологические условия, г. Красноярск, р. Енисей, мониторинг, станции CityAir; atmosphere, $PM_{2,5}$, unfavorable meteorological conditions, Krasnoyarsk, Yenisei River, monitoring, CityAir stations.

Введение

После строительства Красноярской ГЭС в нижнем бьефе р. Енисей сформировалась самая длинная полынья на евро-азиатском континенте. Ее протяженность варьируется от 70 до 250 км в зависимости от температуры воздуха в зимний период [1]. Незамерзающий участок реки разделяет территорию г. Красноярск на две части; приблизительное соотношение площадей левого и правобережного районов равно 3:2. Ширина р. Енисей в черте города (на протяжении около 35 км) варьирует от 570 до 1800 м. Город находится в котловине, в окружении холмов. В неоднородном ландшафте имеется восемь террас, которые расположены на высотах от 117 до 708 м н.у.м. [2]. Загрязнение приземной воздушной среды формируется в результате выбросов загрязнителей [3–5]. С начала XXI в. уровень загрязнения атмосферы Красноярска оценивается как высокий и очень высокий. В 2021 г. доминирующими загрязнителями были оксид азота, диоксид азота, формальдегид, бенз(а)пирен и взвешенные вещества [6].

Сочетание вышеперечисленных факторов (полынья, сложный рельеф, выбросы загрязняющих веществ) обуславливает экологические проблемы г. Красноярска [7] и связанных с ними ряд научных задач, к которым надо отнести актуальную, но слабо изученную тему оценки влияния незамерзающего участка реки на атмосферу города. В настоящее время выполнены различные модельные расчеты по картированию полей ветра, относительной влажности и температурных градиентов в атмосфере над руслом Енисея [8, 9] и распределению PM_{10} в приземном воздушном слое г. Красноярска в период неблагоприятных метеорологических условий (НМУ) [10].

Для того чтобы в дальнейшем можно было корректно верифицировать результаты модельных расчетов, необходимы данные мониторинга атмосферы, полученные синхронно как над территорией города, так и над руслом реки. Такие наблюдения осуществляются с помощью «Системы мониторинга воздуха г. Красноярска» (<http://air.krasn.ru>). Научную и техническую поддержку системы и базы данных осуществляет ФИЦ «Красноярский научный центр СО РАН». Накопленный массив данных, кроме возможного применения для верификации расчетных данных, был использован для оценки влияния р. Енисей на аэрозольное поле в приземной атмосфере г. Красноярска. При этом использовался

* Валерий Владимирович Заворуев (valzav@icm.krasn.ru); Оксана Валерьевна Соколова (oxana_zav@mail.ru); Елена Николаевна Заворуева (zavoruева_elena@mail.ru); Олег Эдуардович Якубайлик (oleg@icm.krasn.ru).

метод сравнения типа «фон — город», который ранее применялся в работах [11–15].

Один из компонентов атмосферного аэрозоля — твердые взвешенные частицы размером меньше 2,5 мкм ($PM_{2.5}$). Установлено, что $PM_{2.5}$ негативно влияет на здоровье людей [16–18]. В связи с этим изучению пространственно-временного распределения концентраций $PM_{2.5}$ в приземной атмосфере урбанизированных территорий посвящено множество научных исследований [19–23], в том числе и эта работа.

Цель исследования состояла в сравнительной оценке концентраций $PM_{2.5}$ в приземной атмосфере над территорией города и акваторией р. Енисей.

Аппаратура и методы

Концентрацию $PM_{2.5}$ измеряли с помощью станций мониторинга воздуха CityAir с дискретностью 20 мин. Показания датчиков $PM_{2.5}$ откорректированы относительно результатов измерения, полученных на стационарных постах наблюдения (работающих по лицензии Росгидромета) [24].

Станции CityAir, размещенные в разных районах города, составляют основу «Системы мониторинга воздуха Красноярского научного центра СО РАН» (КНЦ СО РАН). В настоящее время сеть станций CityAir включена в «Систему мониторинга воздуха г. Красноярска», в которую входят четыре наблюдательные системы. Локализация станций и постов мониторинга, а также результаты среднечасовых измерений представлены на сайте air.krasn.ru.

Для исследования воздушной среды над р. Енисей в декабре 2020 г. силами Института вычислительного моделирования СО РАН на островах Мо-

локова и Татышева были созданы два автоматизированных поста непрерывного мониторинга воздуха, обозначенные на рис. 1 как E1 и E2 соответственно. Они дополнили существующую с конца 2018 г. сеть постов системы мониторинга воздуха КНЦ СО РАН.

Для сравнительного анализа концентраций $PM_{2.5}$ использовали данные береговых станций наблюдения, которые ближе всего расположены к островам Молокова и Татышева. На левом берегу были выбраны посты Покровка (L1), Ленина, 41 (L2), Шахтеров, 25 (L3), Партизана, 3г (L4), а на правом берегу — Кировский (R1) и Спутник (R2). На карте города зона расположения постов обозначена прямоугольником (рис. 1).

Статистическую обработку данных осуществляли с помощью Microsoft Excel.

Результаты и обсуждение

Среднесибирское УГМС (Управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды) в г. Красноярске прогнозирует начало и окончание периода НМУ. Одним из необходимых критериев объявления НМУ — предшествующее этому явлению возрастание концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе. Рассматривая временной интервал с момента формирования загрязнения до окончания периода НМУ, можно установить диапазон вариации и динамическую картину изменения концентраций конкретного загрязняющего вещества.

Для временных рядов, которые включали в себя периоды январских НМУ 2021 и 2022 гг., были проанализированы зависимости изменения концентраций $PM_{2.5}$ от времени в приземном слое атмосферы над акваторией р. Енисей, а также левого и правого

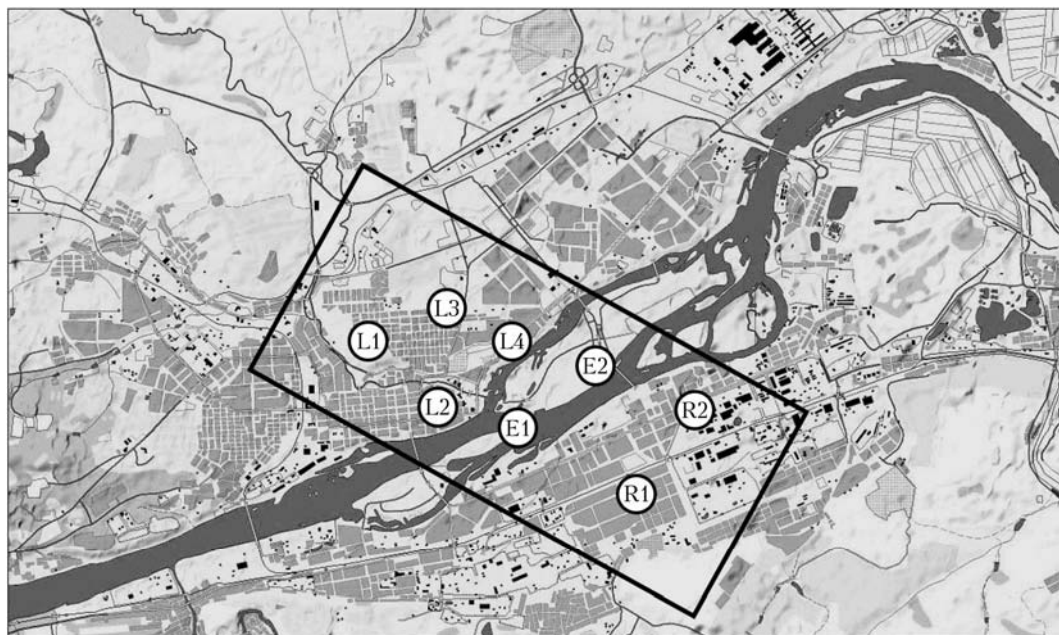


Рис. 1. Схема расположения постов мониторинга $PM_{2.5}$ в воздушной среде над акваторией р. Енисей (E1 и E2), на левом (L1–L4) и правом (R1 и R2) берегу

берега. Все данные мониторинга $PM_{2.5}$ были объединены в три группы: данные постов левого берега (L1–L4), правого берега (R1, R2) и р. Енисей (E1, E2). Динамика концентраций $PM_{2.5}$ представлена на рис. 2 и 3.

Анализ данных (рис. 2 и 3) показывает, что диапазоны изменения двадцатиминутных и часовых концентраций $PM_{2.5}$ на левом и правом берегах больше, чем над руслом р. Енисей. Кроме того, во всех случаях концентрация $PM_{2.5}$ над рекой меньше, чем над территорией обоих берегов или одного из них.

Для рядов концентраций $PM_{2.5}$, представленных на рис. 2 и 3, были рассчитаны коэффициенты корреляции (таблица). Видно, что корреляции между концентрациями взвешенных частиц над Енисеем и над территориями левого и правого берегов ха-

рактеризуются коэффициентами 0,84–0,86 и 0,77–0,90 соответственно. Это может свидетельствовать о практически одинаковом влиянии на воздушную среду над р. Енисей источников выбросов $PM_{2.5}$, которые расположены по обе стороны реки. На основании этого для дальнейшего анализа среднюю концентрацию $PM_{2.5}$ в приземной атмосфере над территорией города рассчитывали по данным шести постов: L1–L4 и R1, R2.

Оценки среднечасовых концентраций $PM_{2.5}$ над Енисеем и на прилегающих к нему с обеих сторон территориях были выполнены следующим образом. Двадцатиминутные концентрации $PM_{2.5}$, которые получены в определенный (задачей анализа) период со всех станций мониторинга, разбивались на две группы, условно названные «р. Енисей»

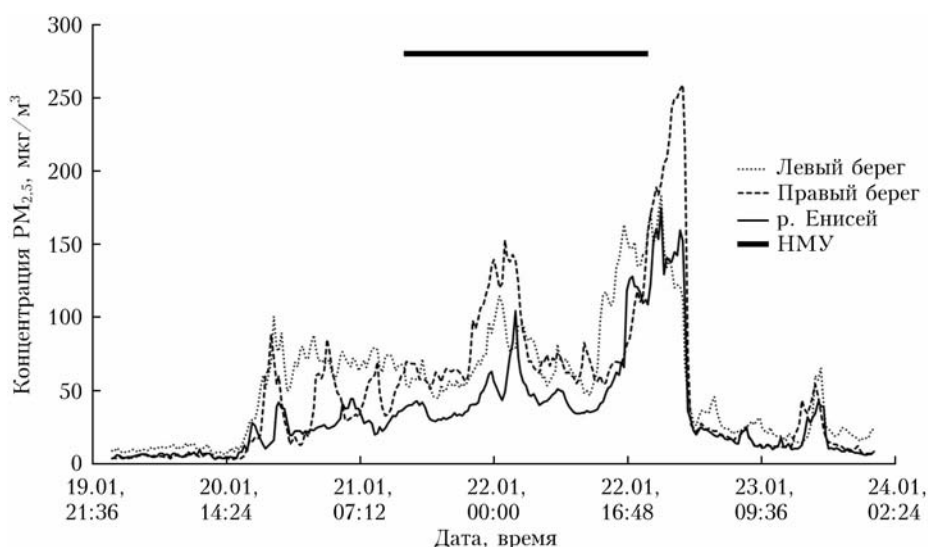


Рис. 2. Изменение усредненных двадцатиминутных концентраций $PM_{2.5}$ в воздушной среде над акваторией р. Енисей, на левом и правом берегах 19–24 января 2021 г.

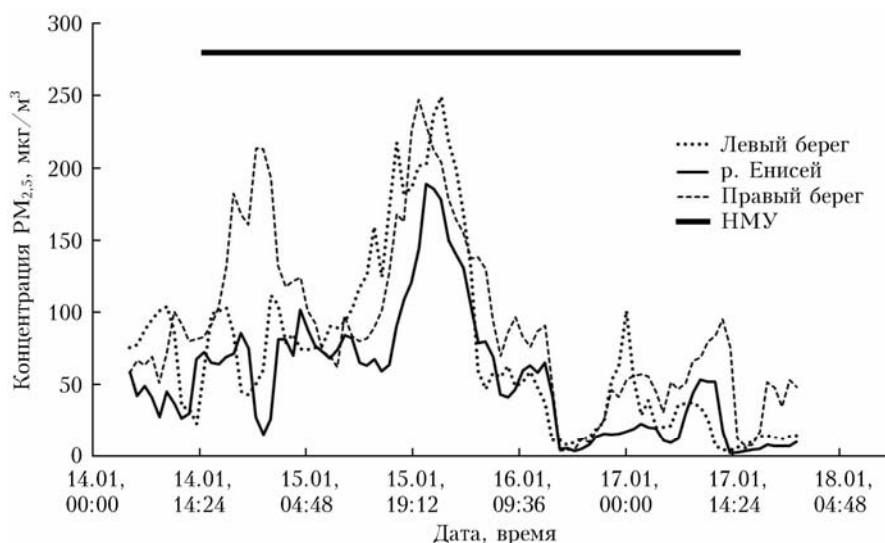


Рис. 3. Изменение усредненных часовых концентраций $PM_{2.5}$ в воздушной среде над акваторией р. Енисей, на левом и правом берегах 14–18 января 2022 г.

Корреляция концентраций $PM_{2,5}$ в приземной атмосфере над акваторией р. Енисей, левом и правом берегах для временных рядов, которые включали в себя периоды январских НМУ 2021 и 2022 гг. Коэффициенты за 2022 г. представлены в скобках

Место измерения	Левый берег	Правый берег	р. Енисей
Левый берег	1,00 (1,00)		
Правый берег	0,79 (0,73)	1,00 (1,00)	
р. Енисей	0,86 (0,84)	0,90 (0,77)	1,00 (1,00)

и «город». Для каждой группы рассчитывали средние концентрации $PM_{2,5}$ и доверительные погрешности ($P = 0,95$). Аналогично рассчитывали средне-

суточные и среднemesячные концентрации $PM_{2,5}$, используя для этого, соответственно, среднечасовые и среднесуточные значения.

Средние двухчасовые концентрации $PM_{2,5}$ в воздушной среде над акваторией р. Енисей и над территорией города в период 21–23 января 2021 г. показаны на рис. 4. Видно, что загрязнение атмосферы над руслом реки меньше, чем над городом, и для подавляющего числа измерений эти различия статистически достоверно различаются.

Согласно официальным сообщениям Среднесибирского УГМС в январе 2021 г. на территории г. Красноярска пять раз формировались метеорологические условия, неблагоприятные для рассеивания

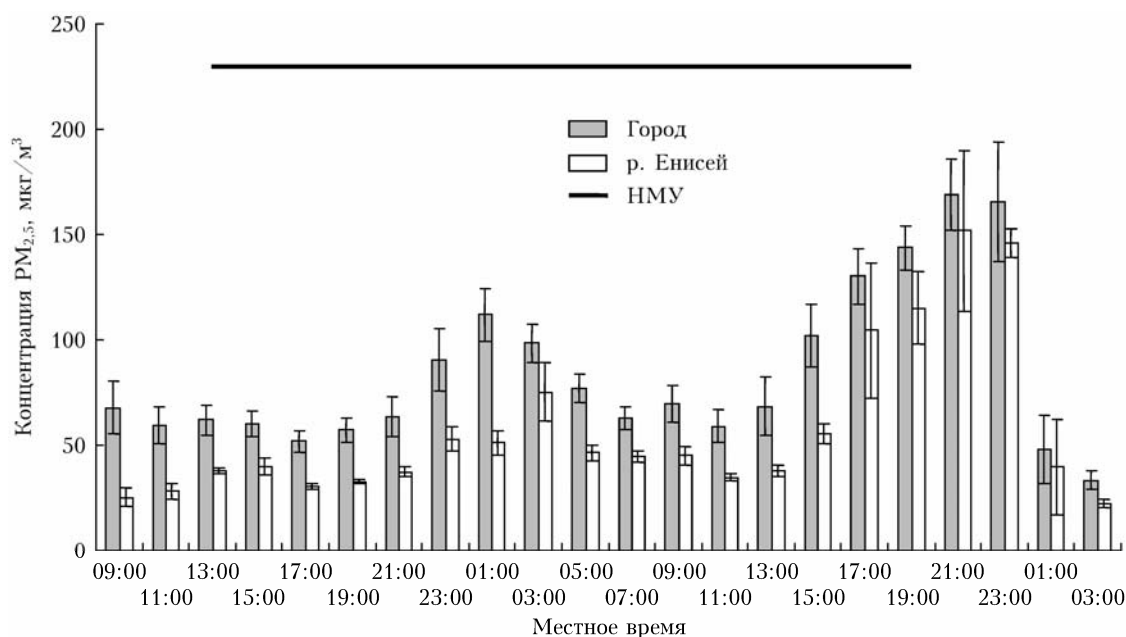


Рис. 4. Изменение двухчасовых концентраций $PM_{2,5}$ в воздушной среде над акваторией р. Енисей и территорией города 21–23 января 2021 г.

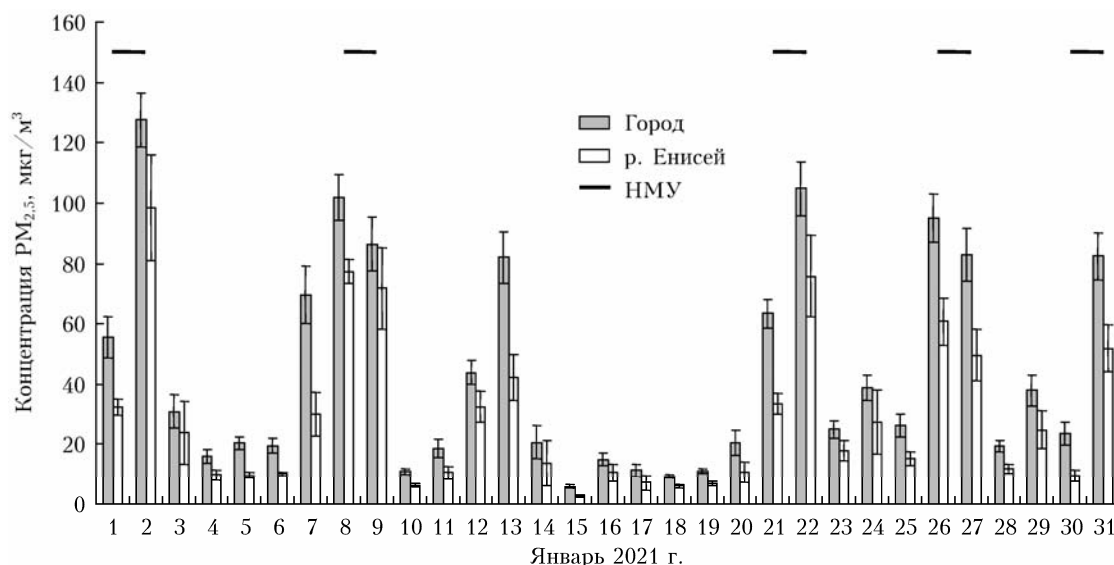


Рис. 5. Среднесуточные концентрации $PM_{2,5}$ в приземной атмосфере над р. Енисей и прилегающей к ней территорией г. Красноярска

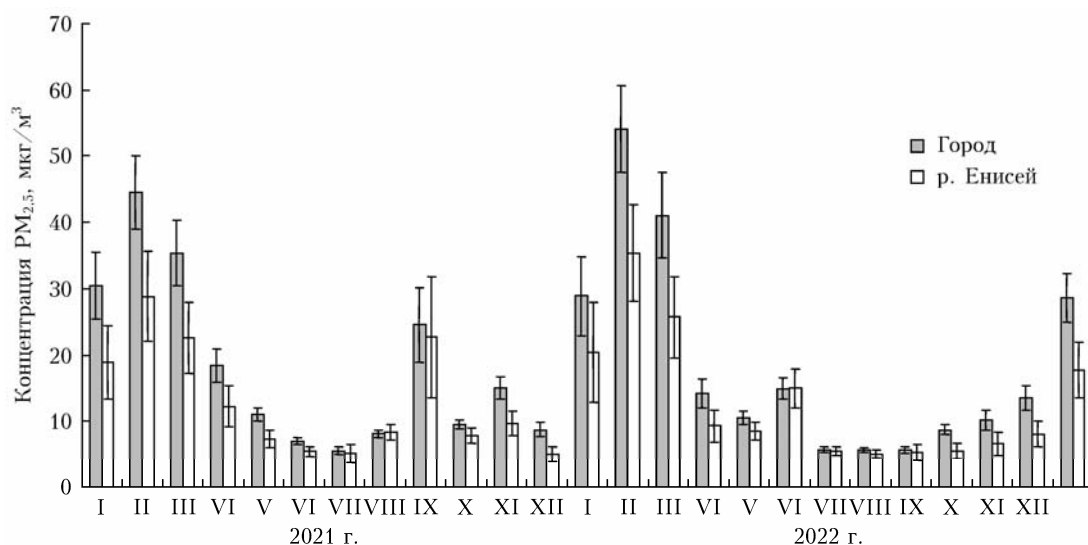


Рис. 6. Среднемесячные концентрации $PM_{2.5}$ в приземной атмосфере над акваторией р. Енисей и прилегающей к ней территории г. Красноярск в период 1.01.2020–31.12.2022 гг.

вредных примесей в атмосферном воздухе. Для этого зимнего месяца были рассчитаны среднесуточные концентрации $PM_{2.5}$ в приземной атмосфере города и русла реки (рис. 5). Во все дни НМУ, кроме 9 января, загрязнение атмосферы над рекой было достоверно ниже, чем над городом. Впрочем, такая же закономерность наблюдалась в дни отсутствия НМУ, за исключением 14 и 24 января.

В период НМУ максимальная среднесуточная концентрация $PM_{2.5}$ над городом равнялась $127,6 \pm 9,0$ мкг/м³, а над р. Енисей – $98,5 \pm 17,5$ мкг/м³. В целом если не рассматривать статистическую достоверность сравниваемых концентраций, то можно утверждать, что в январе 2021 г. среднесуточные концентрации $PM_{2.5}$ в воздухе над рекой всегда были ниже, чем над городом.

Кроме того, оценка загрязнения атмосферы в период 21–23 января 2021 г. по среднесуточным концентрациям $PM_{2.5}$ однозначно свидетельствует о достоверном различии этих величин над Енисеем и над городом (см. рис. 5). При использовании двухчасовых концентраций $PM_{2.5}$ (см. рис. 4) это различие не так однозначно. Следовательно, среднесуточное усреднение сглаживает двухчасовые флуктуации концентраций $PM_{2.5}$. Таким образом, период усреднения (от часа до месяца) двадцатиминутных концентраций $PM_{2.5}$ важен для сравнительной оценки двух массивов данных. Сглаживающий эффект флуктуаций концентраций $PM_{2.5}$ показан в работе [25].

Двухлетняя динамика среднемесячных концентраций $PM_{2.5}$ представлена на рис. 6. Анализ данных показывает, что концентрации $PM_{2.5}$ над Енисеем и над прилегающей к реке территории города синхронно изменяются (коэффициент корреляции 0,98), однако над руслом реки они меньше, чем над сушей. Статистически значимые различия концентраций $PM_{2.5}$ зафиксированы с января по март и с сентября по декабрь.

Самые высокие среднемесячные концентрации $PM_{2.5}$ в приземной атмосфере наблюдаются в январе: над городом – $44,5 \pm 5,5$ мкг/м³ в 2021 г. и $54,1 \pm 6,6$ мкг/м³ в 2022 г.; над р. Енисей – $28,9 \pm 6,8$ мкг/м³ в 2021 г. и $35,4 \pm 7,3$ мкг/м³ в 2022 г. В летний период, за исключением августа 2021 г., среднемесячные концентрации $PM_{2.5}$ в городской атмосфере изменялись в диапазоне $5,6 \pm 0,5 \div 8,1 \pm 0,6$ мкг/м³, а над рекой – $5,1 \pm 1,4 \div 8,4 \pm 1,4$ мкг/м³.

Высокие концентрации взвешенных частиц в приземном слое атмосферы г. Красноярск и над р. Енисей в августе 2021 г. обусловлены дымом лесных пожаров. Исходя из величин летних среднемесячных концентраций $PM_{2.5}$ ($5,6 \div 8,1$ мкг/м³) можно утверждать, что задымление городской воздушной среды наблюдалось с 7 по 13 августа (рис. 7).

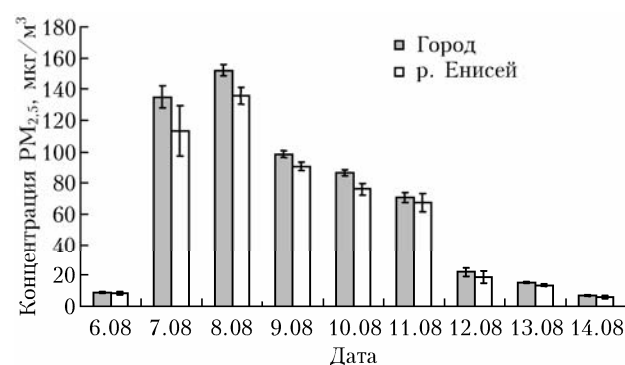


Рис. 7. Среднесуточные концентрации $PM_{2.5}$ в приземной атмосфере над р. Енисей и прилегающей к ней территории г. Красноярск с 6 по 14 августа 2021 г.

На рис. 7 видно, что летом, когда выбросы $PM_{2.5}$ от городских источников минимальные, а загрязнение атмосферы обусловлено глобальным переносом воздушных масс из районов лесных пожаров, рас-

положенных на расстоянии нескольких сотен километров от г. Красноярска, среднесуточные концентрации $PM_{2.5}$ в воздухе над р. Енисей всегда были ниже или не выше, чем над городом.

Заключение

Результаты исследования свидетельствуют о том, что в приземной атмосфере над акваторией р. Енисей наблюдаются более низкие концентрации $PM_{2.5}$, чем над земной поверхностью Красноярска. Это может быть обусловлено способностью водных объектов эффективно осажждать РМ [26]. Кроме того, на открытом пространстве, коим является русло одной из крупнейших рек России, может происходить смешивание воздушных масс, формирующихся над городом (с высоким содержанием $PM_{2.5}$) и его окрестностями (с низким содержанием $PM_{2.5}$) и, следовательно, снижение концентрации $PM_{2.5}$ над акваторией реки в границах города [27]. Это может быть обусловлено разной скоростью ветра над урбанизированной территорией и речной поверхностью [28]. Следует отметить, что в Красноярске доминирующее направление ветра практически совпадает с направлением течения р. Енисей. Такой ветер приносит в город воздушные массы с горно-таежной зоны, где произрастают смешанные леса.

Результаты исследования позволяют повысить точность моделирования распределения $PM_{2.5}$ в приземном слое атмосферы, что будет способствовать разработке и внедрению эффективных мероприятий по борьбе с загрязнением воздуха в г. Красноярске.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Института вычислительного моделирования СО РАН.

Список литературы

1. *Космаков И.В.* Термический и ледовый режим в верхнем и нижнем бьефах высоконапорных гидроэлектростанций на Енисее. Красноярск: КЛАРЕТИАНУМ, 2001. 144 с.
2. *Антоненко О.В., Безруких В.А., Авдеева Е.В., Назарова Э.И., Кисленко А.М.* Особенности ландшафтов г. Красноярска как геолого-геоморфологическая основа для градостроительства // Хвойные бореальной зоны. 2017. Т. 35, № 1–2. С. 15–20.
3. *Romanov A.A., Gusev B.A., Leonenko E.V., Tamarovskaya A.N., Vasiliev A.S., Zaytsev N.E., Philippov I.K.* Graz Lagrangian Model (GRAL) for pollutants tracking and estimating sources partial contributions to atmospheric pollution in highly urbanized areas // Atmosphere. 2020. V. 11, N 12. P. 1375. DOI: 10.3390/atmos11121375.
4. *Михайлюта С.В., Кучеренко А.В., Леженин А.А.* Проблемы оценки структуры выбросов в системе промышленные предприятия – автотранспорт // Экология и промышленность России. 2017. Т. 21, № 4. С. 54–58.
5. *Litovchenko V.I., Misuna I.I., Shumakova N.A.* Contemporary analysis of Krasnoyarsk environmental problems // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2020. V. 822. P. 12013. DOI: 10.1088/1757-899X/822/1/012013.
6. *Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае в 2021 г.»* Красноярск, 2022. 317 с. URL: http://www.mpr.krskstate.ru/dat/bin/art_attach/20000_gosdoklad_2021.pdf.
7. *Пыжев А.И., Шарафутдинов Р.А., Зандер Е.В.* Экологические последствия развития крупных промышленных городов в ресурсных регионах (на примере Красноярска) // Всерос. экономич. журн. «ЭКО». 2021. № 7. С. 40–55.
8. *Hrebtov M., Hanjalic K.* Numerical Study of winter diurnal convection over the city of krasnoyarsk: effects of non-freezing river, undulating fog and steam devils // Bound.-Layer Meteorol. 2017. V. 163, N 3. P. 469–495. DOI: 10.1007/s10546-016-0231-0.
9. *Meshkova V.D., Dekterev A.A., Gavrilov A.A., Filimonov S., Litvintsev K.Y.* Modeling the influence of the river on the wind pattern of Krasnoyarsk // J. Phys. Conf. Ser. 2020. V 1565. P. 12023. DOI: 10.1088/1742-6596/1565/1/012023.
10. *Емиленко А.С., Копейкин В.М.* Сравнение синхронных измерений концентрации сажи и субмикронного аэрозоля в регионах с различной степенью антропогенной нагрузки // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 6. С. 535–540; *Emilenko A.S., Kopeikin V.M.* Comparison of synchronous measurements of soot and submicron aerosol concentrations in regions with different anthropogenic loadings // Atmos. Ocean. Opt. 2009. V. 22, N 4. P. 421–427.
11. *Андропова А., Иорданский М.А., Трефилова А.В., Лебедев В.А., Минашкин В.М., Обвинцев Ю.И., Артамонова М.С., Гранберг И.* Сравнительный анализ загрязнения приземного слоя атмосферы мегаполисов на примере Москвы и Пекина // Геофизические процессы и биосфера. 2010. Т. 9, № 3. С. 42–54.
12. *Таловская А.В., Симоненков Д.В., Филимонов Е.А., Белан Б.Д., Язиков Е.Г., Рычкова Д.А., Ильенок С.С.* Исследование состава пылевого аэрозоля на фоновой и городской станциях наблюдения в Томском регионе зимой 2012/13 г. // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 11. С. 999–1005.
13. *Трефилова А.В., Артамонова М.С., Кудерина Т.М., Губанова Д.П., Давыдов К.А., Иорданский М.А., Греčko Е.И., Минашкин В.М.* Химический состав и микрофизические характеристики аэрозоля г. Москвы и Подмосковья в июне 2009 г. и на пике пожаров 2010 г. // Геофизические процессы и биосфера. 2012. Т. 11, № 4. С. 65–82.
14. *Яушева Е.П., Панченко М.В., Козлов В.С., Терпугова С.А., Чернов Д.Г.* Влияние города на аэрозольные характеристики атмосферы Академгородка г. Томска в переходные сезоны // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 11. С. 981–988.
15. *Поддубный В.А., Полькин В.В., Сакерин С.М., Голобокова Л.П., Лужецкая А.П., Маркелов Ю.И., Дубинкина Е.С., Хуриганова О.И.* Комплексный аэрозольный эксперимент на Среднем Урале. Часть 1. Условия проведения и результаты фотометрических измерений // Оптика атмосф. и океана. 2016. Т. 29, № 12. С. 1003–1010. DOI: 10.15372/AOO20161201.
16. *Chen J., Hoek G.* Long-term exposure to PM and all-cause and cause-specific mortality: A systematic review and meta-analysis // Environ. Intern. 2020. V. 143. P. 105974. DOI: 10.1016/j.envint.2020.105974.
17. *Фатхутдинова Л.М., Тафеева Е.А., Тимербулатова Г.А., Залялов Р.Р.* Риски здоровью населения от загрязнения атмосферного воздуха мелкодисперсными взвешенными частицами // Казан. мед. журн. 2021. № 102. С. 862–876. DOI: 10.17816/KMJ2021-862.
18. *Thangavel P., Park D., Lee Y.C.* Recent insights into particulate matter ($PM_{2.5}$)-mediated toxicity in humans:

- An overview // *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2022. V. 19. P. 7511. DOI: 10.3390/ijerph19127511.
19. Кузнецова И.Н., Глазкова А.А., Шалыгина И.Ю., Нахаев М.И., Архангельская А.А., Звягинцев А.М., Семутникова Е.Г., Захарова П.В., Лезина Е.А. Сезонная и суточная изменчивость концентраций взвешенных частиц в приземном воздухе жилых районов Москвы // *Оптика атмосфер. и океана*. 2014. Т. 27, № 6. С. 473–482.
 20. Губанова Д.П., Беликов И.Б., Еланский Н.Ф., Скороход А.И., Чубарова Н.Е. Изменчивость приземной концентрации аэрозолей $PM_{2.5}$ в г. Москве по наблюдениям в Метеорологической обсерватории МГУ // *Оптика атмосфер. и океана*. 2017. Т. 30, № 12. С. 1033–1042; Gubanova D.P., Belikov I.B., Elansky N.F., Skorokhod A.I., Chubarova N.E. Variations in $PM_{2.5}$ surface concentration in Moscow according to observations at MSU Meteorological observatory // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 3. P. 290–299.
 21. Zavorueva E.N., Zavoruev V.V. Inhomogeneous pollution by particulate matter of the atmospheric surface layer of the Oktyabrsky district of the city of Krasnoyarsk in 2019 // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2020. N 862. P. 062097. DOI: 10.1088/1757-899X/862/6/062097.
 22. Xu X., Zhang T. Spatial-temporal variability of $PM_{2.5}$ air quality in Beijing, China during 2013–2018 // *J. Environ. Manag.* 2020. V. 262. P. 110263. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110263.
 23. Виноградова А.А., Губанова Д.П., Иорданский М.А., Скороход А.И. Влияние метеорологических условий и дальнего переноса воздушных масс на состав приземного аэрозоля в Москве в зимние сезоны // *Оптика атмосфер. и океана*. 2022. Т. 35, № 6. С. 436–446; Vinogradova A.A., Gubanova D.P., Iordanskii M.A., Skorokhod A.I. Effect of meteorological conditions and long-range air mass transport on surface aerosol composition in winter Moscow // *Atmos. Ocean. Opt.* 2022. V. 35, N 6. P. 758–768.
 24. Zavoruev V.V., Zavorueva E.N., Kadochnikov A.A., Tokarev A.V., Yakubailik O.E. Assessment of the possibility of using CityAir air monitoring station in environmental engineering // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2019. N. 537. P. 062053. DOI: 10.1088/1757-899X/537/6/062053.
 25. Che W., Zhang Y., Lin C., Fung Y.H., Fung J., Lau A. Impacts of pollution heterogeneity on population exposure in dense urban areas using ultra-fine resolution air quality data // *J. Environ. Sci.* 2023. V. 125. P. 513–523. DOI: 10.1016/j.jes.2022.02.041.
 26. Liu J., Zhu L., Wang H., Yang Y., Liu J., Qiu D., Ma W., Zhang Z., Liu J. Dry deposition of particulate matter at an urban forest, wetland and lake surface in Beijing // *Atmos. Environ.* 2016. V. 125. P. 178–187. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2015.11.023.
 27. Wood C.M. Air pollution control by land use planning techniques: A British-American review // *Int. J. Environ. Stud.* 1990. V. 35, N 4. P. 233–243. DOI: 10.1080/00207239008710571.
 28. Xia D., Nie H., Sun L., Wang J., Chow K.C., Chan K.L., Wang D. Urbanization effects on surface wind in the Guangdong–Hong Kong–Macao Greater Bay area using a fan-sector method // *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2022. V. 19, N 6. P. 3194. DOI: 10.3390/ijerph19063194.

V.V. Zavoruev, O.V. Sokolova, E.N. Zavorueva, O.E. Yakubailik. Concentration of $PM_{2.5}$ in the surface atmosphere over the territory of Krasnoyarsk and the water area of the non-freezing Yenisei River.

A comparative assessment of the concentrations of $PM_{2.5}$ in the surface atmosphere over the territory of the city and over the water area of the Yenisei River was carried out. It is shown for time periods from several days to two years that, with rare exceptions, pollution over the river is lower than over the territory of the city. This pattern persists during periods of unfavorable meteorological conditions and during pollution of the urban atmosphere by the smoke of forest fires.