

ОПТИКА КЛАСТЕРОВ, АЭРОЗОЛЕЙ И ГИДРОЗОЛЕЙ

УДК 543.51/504.3.054

Изотопный состав углерода в атмосферном аэрозоле г. Томска (зимне-весенний период 2020–2021 гг.)

Г.В. Симонова¹, Д.А. Калашникова¹✉, С.Ю. Золотов¹,
А.Е. Давыдкина^{1,2}, А.С. Батухтина^{1,2*}

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

Поступила в редакцию 22.05.2024;
после доработки 03.09.2024;
принята к печати 04.09.2024

Загрязнение атмосферного воздуха представляет серьезную угрозу как здоровью населения, так и окружающей среде. Исследование изотопного состава углерода атмосферного аэрозоля в городах имеет большой потенциал для определения доминирующих источников возникновения аэрозольных частиц. В настоящей работе анализируются результаты непрерывного мониторинга изотопного состава общего углерода ($\delta^{13}\text{C}$) в атмосферном аэрозоле (с разрешением 3 сут), полученные в течение зимне-весеннего сезона (ноябрь 2020 г. – май 2021 г.) в Томске. Величина $\delta^{13}\text{C}$ изменялась в пределах от $-29,4$ до $-24,7\text{‰}$, процентное содержание углерода от 1,3 до 35%. Для 67 образцов углеродсодержащего атмосферного аэрозоля среднее значение $\delta^{13}\text{C} = -26,2 \pm 0,3\text{‰}$; среднее значение $\delta^{13}\text{C}$ аэрозоля составило $-25,9 \pm 0,5\text{‰}$ зимой и $-26,5 \pm 1\text{‰}$ весной. Наибольший разброс значений $\delta^{13}\text{C}$ зафиксирован в весенний период, что подтверждает наличие различных источников формирования углеродсодержащих частиц аэрозоля. Эти источники были выявлены благодаря совместному анализу данных Глобальной карты ветров (earth.nullschool.net), обратных траекторий движения воздушных масс (HYSPLIT), розы ветров и данных изменчивости значений $\delta^{13}\text{C}$. Зимой доминирующим источником углеродсодержащего аэрозоля была городская тепловая электростанция ГРЭС-2. Результаты данного исследования помогают раскрыть особенности происхождения и процессов трансформации атмосферных аэрозолей в Томске, а также могут служить входными параметрами моделирования переноса аэрозольных частиц на региональном уровне.

Ключевые слова: масс-спектрометрия изотопных отношений, атмосферный аэрозоль, отношения стабильных изотопов углерода; isotope ratio mass spectrometry, atmospheric aerosol, stable carbon isotope ratios.

Введение

Одной из актуальных проблем в современном мире является загрязнение атмосферы. Аэрозольные частицы, составляющие его значительную часть, имеют разнообразное происхождение и состав, в том числе содержат углерод. Углеродсодержащие аэрозоли активно изучаются из-за их радиационного воздействия и неблагоприятных последствий для здоровья человека [1]. Они включают в себя органический (ОС) и элементарный углерод (ЕС) и составляют основную массу $\text{PM}_{2,5}$ [2, 3]. ОС образуется в результате первичных выбросов, вызванных сжиганием ископаемого топлива, биомассы,

а также путем вторичного формирования в результате фотохимических реакций. ЕС образуется из первичных источников выбросов в основном по причине неполного сгорания ископаемого топлива и биомассы и считается химически устойчивым в атмосфере [4]. Полициклические ароматические углеводороды, являющиеся фракцией ОС, обладают канцерогенными, тератогенными и мутагенными свойствами, а ЕС может поглощать солнечную радиацию, нагревать атмосферу и оказывать положительное радиационное воздействие [4]. Поэтому для эффективного мониторинга загрязнения воздуха необходимо уметь идентифицировать источники выбросов.

Изотопный состав углерода — один из важных инструментов для изучения химических процессов, происходящих с углеродсодержащим аэрозолем в атмосфере [5]. Известно, что такие аэрозоли сохраняют изотопную «подпись» своих первичных источников (например, биогенные углеводороды

* Галина Владимировна Симонова (galina_simonova@inbox.ru); Дарья Андреевна Калашникова (terrezapr@mail.ru); Сергей Юрьевич Золотов (zolotov@imces.ru); Анна Евгеньевна Давыдкина (meartelbeck@mail.ru); Анна Сергеевна Батухтина (bonann4@yandex.ru).

и углеводороды ископаемого топлива) и могут быть использованы как индикатор антропогенного воздействия [6–8]. Также измерение изотопного состава углерода аэрозоля позволяет оценить процессы переноса в атмосфере [9], исследовать влияние атмосферного аэрозоля на климатические условия и качество воздуха [10, 11]. Особое внимание уделяется изучению сезонных вариаций изотопного состава углерода аэрозолей [4, 7, 12–15].

Обычно атмосферные аэрозоли, образовавшиеся из различных источников, имеют уникальные (специфические) значения $\delta^{13}\text{C}$ [16, 17]. Несмотря на многочисленные исследования соотношений стабильных изотопов углерода ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) в атмосферном аэрозоле [18–20], бывает трудно провести различие между выбросами от сжигания ископаемых, биогенных веществ и биомассы. Диапазон значений $\delta^{13}\text{C}$ атмосферных аэрозолей достаточно широк [6, 21, 22] и обусловлен влиянием множества процессов, изменяющих соотношения изотопов (в основном вторичные процессы образования). Еще одна сложность состоит в том, что в разных регионах Земли прослеживаются различные значения изотопного состава исходного сырья, особенно ископаемых видов топлива и древесины. Сложно сделать общие выводы о распределении источников происхождения углеродсодержащих частиц аэрозоля, основанные на предоставленных в литературе данных, и поэтому крайне востребованы региональные исследования.

Цель работы — анализ и обсуждение результатов непрерывного мониторинга изотопного состава общего углерода атмосферного аэрозоля (с разрешением 3 сут), полученных в течение зимне-весеннего сезона (ноябрь 2020 г. — май 2021 г.) в Академгородке г. Томска, с привлечением данных о динамике атмосферы, розы ветров, а также анализа переноса воздушных масс и аэрозолей по Глобальной карте ветров.

1. Материалы и методы

С 05.11.2020 г. по 31.05.2021 г. в Геофизической обсерватории (ГО) ИМКЭС СО РАН (56,476° с.ш., 85,055° в.д., г. Томск) было отобрано 67 проб атмосферного аэрозоля. Воздухозаборное устройство устанавливалось на высоте примерно 20 м над землей. Отбор аэрозоля осуществлялся на стекловолоконные фильтры MGF (Munktell, Швеция) ($\varnothing = 70$ мм, пористость 0,7 мкм) путем прокачки атмосферного воздуха в течение трех суток с помощью воздухозаборного устройства. Для удаления органических примесей фильтры прокачивали в муфельной печи в течение 5 ч ($T = 500$ °C).

В лаборатории биоинформационных технологий ИМКЭС СО РАН пробы атмосферного аэрозоля были проанализированы на содержание общего углерода и определен его изотопный состав методом масс-спектрометрии изотопных отношений. Анализ проводился изотопным масс-спектрометром DELTA V

Advantage, соединенным с элементным анализатором Flash 2000 (Thermo Fisher Scientific, Германия). Приборы были предоставлены Центром коллективного пользования ТомЦКП СО РАН.

Изотопный состав углерода определяется по формуле

$$\delta^{13}\text{C} = \left[\frac{R_{\text{sample}} - R_{\text{standard}}}{R_{\text{standard}}} \right] \times 1000\text{‰}, \quad (1)$$

где R_{sample} и R_{standard} — отношение тяжелого изотопа ^{13}C и легкого изотопа ^{12}C в исследуемой пробе и в эталонном образце соответственно. В качестве эталонного образца использовали международный стандарт МАГАТЭ — IAEA-600 Caffeine ($\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}} = -27,771 \pm 0,043\text{‰}$). Стандартное отклонение трех последовательных измерений величины $\delta^{13}\text{C}$ не превышало $\pm 0,1\text{‰}$.

Направление прихода воздушных масс к точке отбора проб аэрозоля определялось с помощью модели HYSPLIT [23]. Анализ частоты поступления воздушных масс проведен для каждого месяца исследуемого периода на высоте 50 м, использован метеорологический архив GDAS1 с разрешением частотной сетки 1°, продолжительность траекторий составила 120 ч, периодичность построения траекторий — каждые 6 ч.

Перенос воздушных масс и аэрозолей анализировался с помощью данных Глобальной карты ветров (earth.nullschool.net), учитывающей средний размер взвешенных частиц в атмосфере от 2,5 до 10 мкм. Роза ветров была предоставлена ГО ИМКЭС СО РАН (высота 30 м над поверхностью земли).

2. Результаты и обсуждение

2.1. Динамика атмосферы по данным траекторного анализа и Глобальной карты ветров

С целью определения доминирующих направлений переноса воздушных масс проведен анализ обратных траекторий их движения за зимне-весенний период. Результаты анализа частоты поступления атмосферных потоков в пункт наблюдения представлены на рис. 1 (цв. вкладка). Выявлено, что в холодную часть года (ноябрь 2020 г. — март 2021 г.) воздушные массы поступали в пункт наблюдений преимущественно с юго-западного направления (72%). Однако весной условия циркуляции атмосферы менялись, в апреле и мае только в 22% случаев воздушные массы поступали с юго-запада.

Для выявления потенциально возможных источников углеродсодержащих аэрозолей исследован перенос воздушных масс. Зимой значимого переноса не установлено, но в конце марта — апреле выявлен значимый перенос с территорий Урала и Казахстана (рис. 2, цв. вкладка).

2.2. Изотопный состав углерода в атмосферном аэрозоле

На рис. 3 представлены графики вариаций $\delta^{13}\text{C}$ и процентного содержания углерода в отобранных пробах аэрозоля за весь период исследования.

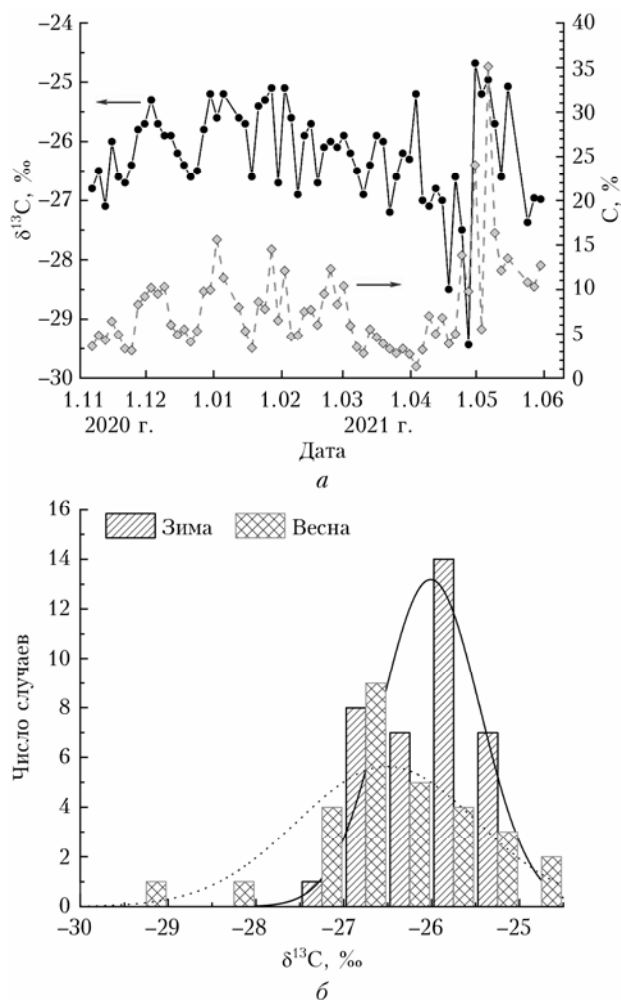


Рис. 3. Вариации $\delta^{13}\text{C}$ (сплошная кривая) и процентного содержания углерода (пунктирная кривая) в атмосферном аэрозоле в зимне-весенний период 2020–2021 гг. (а); частотное распределение $\delta^{13}\text{C}$ (черная сплошная кривая – кривая нормального распределения для зимнего периода, пунктирная кривая – для весеннего периода) (б)

Величина $\delta^{13}\text{C}$ за весь период исследования изменялась в пределах от $-29,4$ до $-24,7\text{‰}$, а среднее значение составило $-26,2 \pm 0,3\text{‰}$. Зимой среднее значение $\delta^{13}\text{C}$ составило $-26,0 \pm 0,6\text{‰}$, а весной $-26,5 \pm 1,1\text{‰}$. Для сравнения приведем значения $\delta^{13}\text{C}$ атмосферного аэрозоля, которые были зарегистрированы на пригородном участке в Праге: $-25,5 \pm 0,8\text{‰}$ зимой и $-26,6 \pm 0,4\text{‰}$ весной [24]. В нашем исследовании наибольший диапазон значений $\delta^{13}\text{C}$ наблюдается в весенний период (рис. 4),

что сигнализирует о наличии различных источников углеродсодержащих частиц.

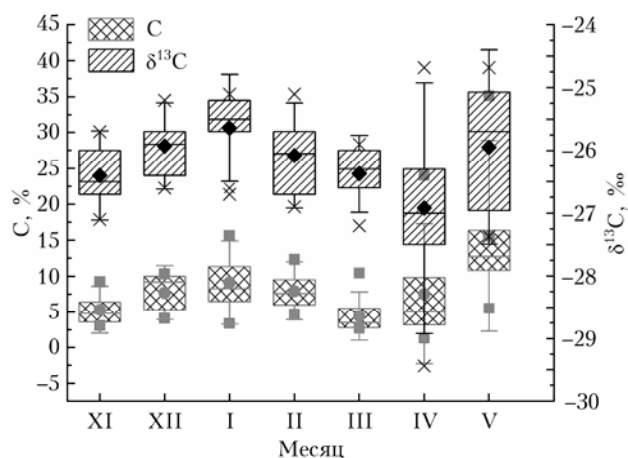


Рис. 4. Статистические месячные характеристики процентного содержания С и изотопного состава углерода $\delta^{13}\text{C}$ аэрозолей: круги/ромбы – средние значения; вертикальные отрезки (усы) – СКО; средние горизонтальные линии – второй квартиль (медиана); верхние и нижние горизонтальные линии – первый и третий квартили (25 и 75% данных), крестики – максимальные/минимальные значения $\delta^{13}\text{C}$, квадраты – максимальные/минимальные значения процентного содержания С

Максимальные значения процентного содержания углерода (28 и 35%) соответствовали образцам, отобранным в мае с высокими значениями $\delta^{13}\text{C}$ ($-24,7$ и $-24,9\text{‰}$). Такие значения характерны для углеродсодержащих частиц аэрозоля, образовавшегося при сжигании угля и биомассы (древесины). Величина $\delta^{13}\text{C}$ колеблется от $-25,5$ до $-23,4\text{‰}$ для угля [6, 25], а для угля и биомассы – от -28 до -22‰ [26]. Согласно данным Глобальной карты ветров в эти дни не отмечен перенос воздушных масс и аэрозолей с других территорий, значит, в формировании углеродсодержащего аэрозоля участвовали локальные (местные) источники. Наибольший диапазон значений зафиксирован в апреле. Одно из высоких значений $\delta^{13}\text{C} = -25,2\text{‰}$ (02–05.04.2021 г.) соответствует периоду трансграничного переноса воздушных масс и аэрозолей с территории Казахстана (см. рис. 2) и, вероятно, обусловлено палом прошлогодней сухой травы. А наиболее низкие значения $\delta^{13}\text{C}$ ($-29,4$ и $-28,5\text{‰}$) зафиксированы во второй половине апреля для фильтров, имеющих визуальные признаки присутствия пыльцы растений. Дополнительно проведенный изотопный анализ пыльцевых зерен березы повислой (*Betula pendula*) и ивы остролистной (*Salix acutifolia*), цветущих весной, показал низкие значения $\delta^{13}\text{C}$: $-28,9\text{‰}$ для березы и $-30,5\text{‰}$ для ивы.

Зимой относительное отклонение $\delta^{13}\text{C}$ от средней величины составило всего $0,6\text{‰}$. Небольшой

разброс значений сигнализирует о постоянном локальном источнике углеродсодержащих аэрозольных частиц. Согласно розе ветров (направления ветра были получены путем усреднения доминирующих среднесуточных направлений ветра в период отбора пробы аэрозоля) зимой преобладал юго-западный ветер (рис. 5). В данном направлении расположена тепловая электростанция ГРЭС-2, основным источником топлива которого является уголь, дополнительным — газ, а растопочным — мазут.

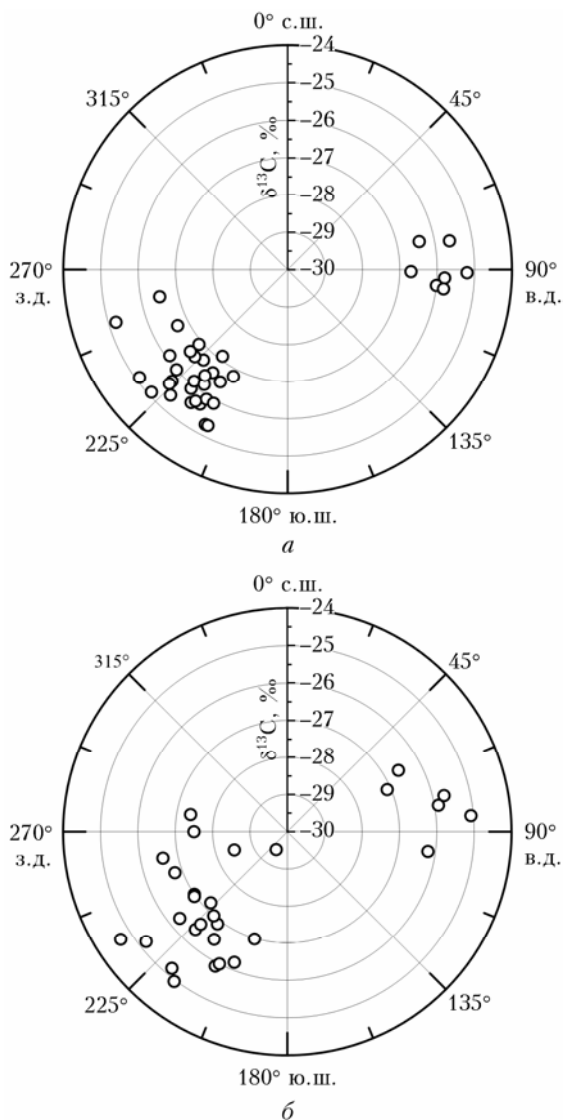


Рис. 5. Диаграмма распределения значений $\delta^{13}\text{C}$ и доминирующие среднесуточные направления ветра в выбранные периоды отбора проб: а — с 05.11.2020 г. по 28.02.2021 г.; б — с 01.03 по 31.05.2022 г.

Согласно данным ГО ИМКЭС СО РАН в зимний период в 18 случаях был зафиксирован перенос дыма с ГРЭС-2, при этом среднее значение $\delta^{13}\text{C} = -25,9 \pm 0,5\text{‰}$, что попадает в диапазон значений, характерных для сажевых частиц, обра-

зующихся при сжигании угля. Ранее нами были проведены экспериментальные исследования изотопного состава углерода различных видов топлив и сажи, образованной в результате их сжигания [27, 28]. В экспериментах анализировали нефтепродукты, торф, древесину различных пород, а также каменный уголь Кузнецкого угольного бассейна (заметим, что на Томской ГРЭС-2 используют именно кузбасский уголь). Результаты показали, что для каменного угля характерны высокие значения $\delta^{13}\text{C}$ ($-24,1\text{‰}$ – $-23,2\text{‰}$), так же как и для полученной в результате его сжигания саже ($-25,6\text{‰}$ – $-24,2\text{‰}$).

Заключение

Величина изотопного состава общего углерода $\delta^{13}\text{C}$ атмосферного аэрозоля в зимне-весенний период 2020–2021 гг. изменялась в диапазоне от $-29,4$ до $-24,7\text{‰}$, а среднее ее значение составило $-26,2 \pm 0,3\text{‰}$, что характерно для сажевых частиц смешанного типа, образующихся при сжигании как биомассы, так и угля. Результаты исследования показали сезонную изменчивость $\delta^{13}\text{C}$. Весной зафиксированы экстремально низкие и высокие значения, что подтверждает наличие различных источников формирования углеродсодержащих частиц аэрозоля. Согласно анализу данных Глобальной карты ветров значимый перенос воздушных масс и аэрозолей зафиксирован в весенние месяцы с западного (Урал) и юго-западного (Алтай и Казахстан) направлений. Основным источником образования углеродсодержащих частиц зимой является городская тепловая электростанция ГРЭС-2.

Благодарности. Авторы благодарят сотрудников геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН за отбор образцов атмосферного аэрозоля.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках госзадания ИМКЭС СО РАН, номер бюджетного проекта FWRG-2021-0001 (регистрационный номер проекта 121031300154-1).

Список литературы

1. Shiraiwa M., Li Y., Tsimpidi A.P., Karydis V.A., Berkemeier T., Pandis S.N., Lelieveld J., Koop T., Pöschl U. Global distribution of particle phase state in atmospheric secondary organic aerosols // Nat. Commun. 2017. V. 8. P. 1–7. DOI: 10.1038/ncomms15002.
2. Li S.W., Chang M., Li H., Cui X.Y., Ma L.Q. Chemical compositions and source apportionment of $\text{PM}_{2.5}$ during clear and hazy days: Seasonal changes and impacts of Youth Summer Olympic Games // Chemosphere. 2020. V. 256. 127163. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.127163.
3. Liu X., Li X., Bai H., Mu L., Li Y., Zhang D. Stable carbon isotopic compositions and source apportionment of the carbonaceous components in $\text{PM}_{2.5}$ in Taiyuan, China // Atmos. Environ. 2021. V. 261. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2021.118601.

4. Bai H., Liu X., Liu X., Zhang C., Mu L., Peng M. Carbon isotope seasonal characteristics of fine carbonaceous aerosol in Jinzhong City, Shanxi Province, China // *Atmos. Environ.* 2021. V. 246. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2020.118164.
5. Gensch I., Kiendler-Scharr A., Rudolph J. Isotope ratio studies of atmospheric organic compounds: Principles, methods, applications and potential // *Int. J. Mass Spectrom.* 2014. V. 365. P. 206–221. DOI: 10.1016/J.IJMS.2014.02.004.
6. Widory D. Combustibles, fuels and their combustion products: A view through carbon isotopes // *Combust. Theor. Model.* 2006. V. 10. P. 831–841. DOI: 10.1080/13647830600720264.
7. Gyrka M., Kosztowniak E., Lewandowska A., Widory D. Carbon isotope compositions and TC/OC/EC levels in atmospheric PM₁₀ from Lower Silesia (SW Poland): Spatial variations, seasonality, sources and implications // *Atmos. Pollut. Res.* 2020. V. 11. P. 1099–1114. DOI: 10.1016/j.apr.2020.04.003.
8. Major I., Furu E., Varga T., Horváth A., Futy I., Gyökös B., Somodi G., Lisztes-Szaby Z., Jull A.J.T., Kertész Z., Molnár M. Source identification of PM_{2.5} carbonaceous aerosol using combined carbon fraction, radiocarbon and stable carbon isotope analyses in Debrecen, Hungary // *Sci. Total Environ.* 2021. V. 782. Article ID: 146520. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146520.
9. Ren L., Hu W., Hou J., Li L., Yue S., Sun Y., Wang Z., Li X., Pavuluri C.M., Hou S., Liu C., Kawamura K., Ellam R.M., Fu P. Compound-specific stable carbon isotope ratios of terrestrial biomarkers in urban aerosols from Beijing, China // *ACS Earth Space Chem.* 2019. V. 3. P. 1896–1904. DOI: 10.1021/acsearthspacechem.9b00113.
10. Kozáková J., Pokorná P., Vodička P., Ondráčková L., Ondráček J., Křámal K., Mikuška P., Hovorka J., Moravec P., Schwarz J. The influence of local emissions and regional air pollution transport on a European air pollution hot spot // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2019. V. 26. P. 1675–1692. DOI: 10.1007/s11356-018-3670-y.
11. Lin Y.C., Zhang Y.L., Xie F., Zhang W.Q., Fan M.Y., Lin Z., Rella C.W., Hoffnagle J.A. Development of a monitoring system for semicontinuous measurements of stable carbon isotope ratios in atmospheric carbonaceous aerosols: Optimized methods and application to field measurements // *Anal. Chem.* 2020. V. 92. P. 14373–14382. DOI: 10.1021/acs.analchem.0c02063.
12. Zimnoch M., Morawski F., Kuc T., Samek L., Bartyl J., Gorczyca Z., Skiba A., Rozanski K. Summer–winter contrast in carbon isotope and elemental composition of total suspended particulate matter in the urban atmosphere of Krakow, Southern Poland // *Nukleonika.* 2020. V. 65. P. 181–191. DOI: 10.2478/nuka-2020-0029.
13. Masalaite A., Remeikis V., Zenker K., Westra I., Meijer H.A.J., Dusek U. Seasonal changes of sources and volatility of carbonaceous aerosol at urban, coastal and forest sites in Eastern Europe (Lithuania) // *Atmos. Environ.* 2020. V. 225. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2020.117374.
14. Vodička P., Kawamura K., Schwarz J., Kunwar B., Ždimal V. Seasonal study of stable carbon and nitrogen isotopic composition in fine aerosols at a Central European rural background station // *Atmos. Chem. Phys.* 2019. V. 19. P. 3463–3479. DOI: 10.5194/acp-19-3463-2019.
15. Qi W., Wang G., Dai W., Liu S., Zhang T., Wu C., Li J., Shen M., Guo X., Meng J., Li J. Molecular characteristics and stable carbon isotope compositions of dicarboxylic acids and related compounds in winter-time aerosols of Northwest China // *Sci Rep.* 2022. V. 12. Article ID: 11266. DOI: 10.1038/s41598-022-15222-6.
16. Ke L., Ding X., Tanner R.L., Schauer J.J., Zheng M. Source contributions to carbonaceous aerosols in the Tennessee Valley region // *Atmos. Environ.* 2007. V. 41. P. 8898–8923. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2007.08.024.
17. Aguilera J., Whigham L.D. Using the ¹³C/¹²C Carbon isotope ratio to characterise the emission sources of airborne particulate matter: A review of literature // *Isotopes Environ Health Stud.* 2018. V. 54. P. 573–587. DOI: 10.1080/10256016.2018.1531854.
18. Garbaras A., Andriejauskienė J., Barisevičiūtė R., Remeikis V. Tracing of Atmospheric aerosol sources using stable carbon isotopes // *Lith. J. Phys.* 2008. V. 48, N 3. P. 259–264. DOI: 10.3952/lithjphys.48309.
19. Kawashima H., Haneishi Y. Effects of combustion emissions from the Eurasian continent in winter on seasonal $\delta^{13}\text{C}$ of elemental carbon in aerosols in Japan // *Atmos. Environ.* 2012. V. 46. P. 568–579. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2011.05.015.
20. Widory D., Roy S., Le Moullec Y., Goupil G., Cocherie A., Guerrot C. The origin of atmospheric particles in Paris: A view through carbon and lead isotopes // *Atmos. Environ.* 2004. V. 38. P. 953–961. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2003.11.001.
21. Cao J., Chow J.C., Tao J., Lee S., Watson J.G., Ho K., Wang G., Zhu C., Han Y. Stable carbon isotopes in aerosols from Chinese cities: Influence of fossil fuels // *Atmos. Environ.* 2011. V. 45. P. 1359–1363. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2010.10.056.
22. Kundu S., Kawamura K. Seasonal variations of stable carbon isotopic composition of bulk aerosol carbon from Gosan site, Jeju Island in the East China Sea // *Atmos. Environ.* 2014. V. 94. P. 316–322. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2014.05.045.
23. Stein A.F., Draxler R.R., Rolph G.D., Stunder B.J.B., Cohen M.D., Ngan F. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2015. V. 96. P. 2059–2077. DOI: 10.1175/BAMS-D-14-00110.1.
24. Vodička P., Kawamura K., Schwarz J., Ždimal V. Seasonal changes in stable carbon isotopic composition in the bulk aerosol and gas phases at a suburban site in Prague // *Sci. Total Environ.* 2022. V. 803. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.149767.
25. Gorka M., Jędrysek M.-O. $\delta^{13}\text{C}$ of organic atmospheric dust deposited in Wrocław (SW Poland): Critical remarks on the passive method // *Geol. Q.* 2008. V. 52. P. 115–126.
26. Agnihotri R., Mandal T.K., Karapurkar S.G., Naja M., Gadi R., Ahammed Y.N., Kumar A., Saud T., Saxena M. Stable carbon and nitrogen isotopic composition of bulk aerosols over India and northern Indian Ocean // *Atmos. Environ.* 2011. V. 45. P. 2828–2835. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2011.03.003.
27. Kalashnikova D.A., Markelova A.N., Melkov V.N., Simonova G.V. Isotope composition of the pyrogenic carbon of various origins // *Химия в интересах устойчивого развития.* 2016. Т. 24, № 4. С. 467–471.

28. *Simonova G., Volkov Y., Kozlov V., Shmargunov V., Kalashnikova D.* Atmospheric air pollution studies using the isotope mass-spectrometry // Proc. of the 8th

International Multidisciplinary Scientific Conference, Albena, Bulgaria, July 2–8, 2018. SCEN, 2018. P. 343–348.

G.V. Simonova, D.A. Kalashnikova, S.Yu. Zolotov, A.E. Davydina, A.S. Batukhtina. **Carbon isotope composition of atmospheric aerosol in Tomsk (winter–spring 2020–2021).**

Air pollution is a serious danger not only to human health, but also to the environment. The study of the carbon isotope composition of atmospheric aerosol in cities is of particular interest and has great potential for determining the dominant sources of aerosol particles. The results of continuous monitoring of the isotopic composition of total carbon ($\delta^{13}\text{C}$) in atmospheric aerosol (with a resolution of 3 days) during the winter-spring season (November 2020 – May 2021) in Tomsk are presented. The $\delta^{13}\text{C}$ value ranged from -29.4 to -24.7‰ , with the carbon percentage ranging from 1.3 to 35%. For 67 samples of carbonaceous atmospheric aerosol, the mean $\delta^{13}\text{C}$ value was $-26.2 \pm 0.3\text{‰}$. The average $\delta^{13}\text{C}$ values of aerosol were $-25.9 \pm 0.5\text{‰}$ in winter and $-26.5 \pm 1\text{‰}$ in spring. The widest scatter of $\delta^{13}\text{C}$ values was observed during the spring, which indicates the presence of various sources of origin of carbonaceous aerosol particles. The main sources of carbonaceous aerosol particles were identified through the combined analysis of global map of wind (earth.nullschool.net), air masses backward trajectories (by NOAA HYSPLIT model), wind rose, and data on the variability of $\delta^{13}\text{C}$ values. In winter, the dominant source of carbonaceous aerosol was the city thermal power plant GRES-2. The study results not only contribute to understanding the sources of origin and transformation processes of atmospheric aerosols in Tomsk, but also can be input parameters for modeling the transport of aerosol particles on the regional scale.

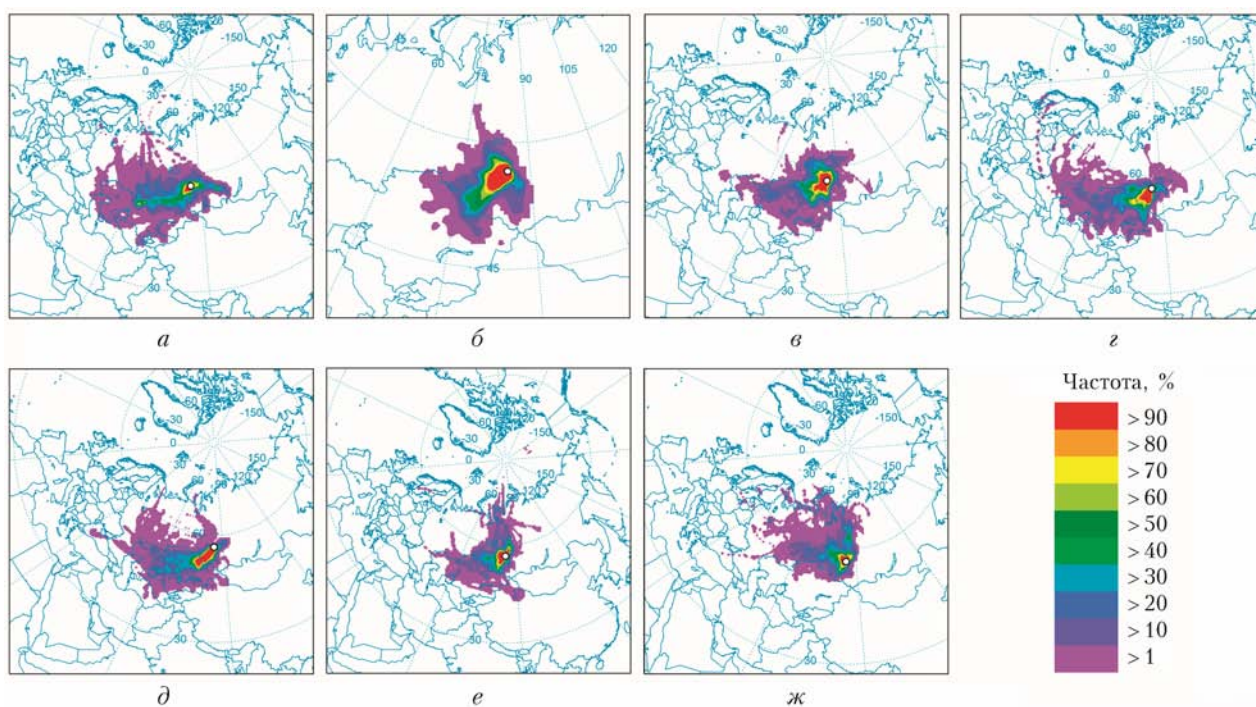


Рис. 1. Частота поступления воздушных масс в пункт наблюдения по данным HYSPLIT: а — январь 2020 г.; б — декабрь 2020 г.; в — январь 2021 г.; г — февраль 2021 г.; д — март 2021 г.; е — апрель 2021 г.; ж — май 2021 г.

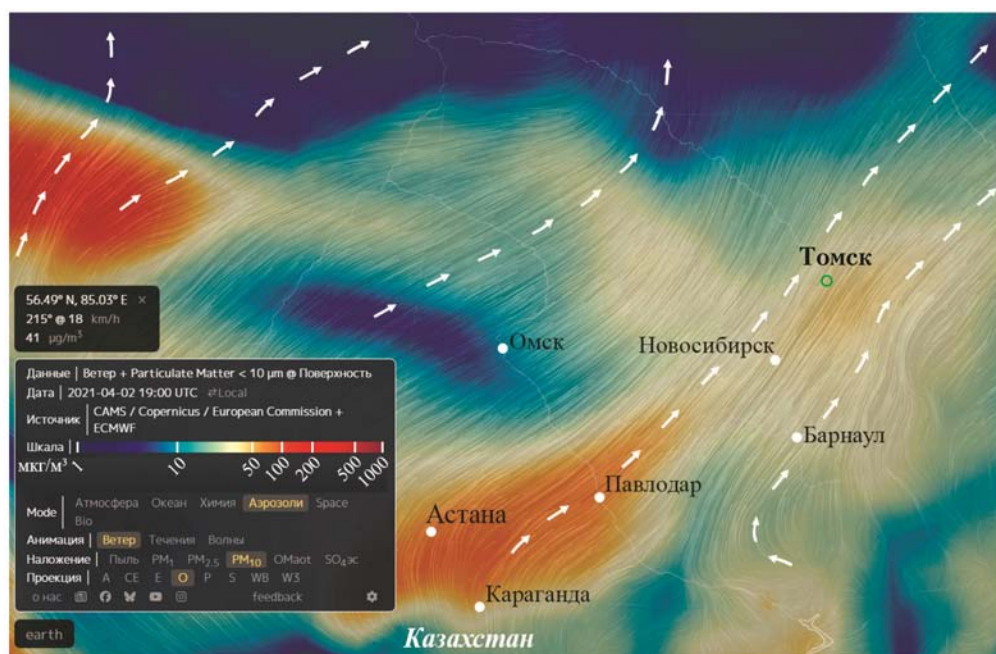


Рис. 2. Перенос воздушных масс и аэрозолей 02.04.2021 г. согласно Глобальной карте ветров