

УДК 551.510

Исследование состава воздуха в различных воздушных массах

О.Ю. Антохина, П.Н. Антохин, В.Г. Аршинова, М.Ю. Аршинов,
Б.Д. Белан, С.Б. Белан, Д.К. Давыдов, Н.В. Дудорова, Г.А. Ивлев,
А.В. Козлов, Т.М. Рассказчикова, Д.Е. Савкин, Д.В. Симоненков,
Т.К. Скляднева, Г.Н. Толмачев, А.В. Фофонов*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 21.05.2018 г.

По данным многолетнего мониторинга на TOR-станции рассчитаны средние значения концентрации газовых и аэрозольных компонент в разных воздушных массах в районе г. Томска. Показано, что для CO_2 и CH_4 характерно уменьшение концентрации от арктической до тропической воздушной массы. Для озона наблюдается обратная картина: наибольшие значения фиксируются в тропической воздушной массе, наименьшие — в арктической. У таких газов, как CO и SO_2 , характер распределения более сложный.

Ключевые слова: атмосфера, аэрозоль, воздушная масса, газ, концентрация, содержание, состав; atmosphere, aerosol, air mass, gas, concentration, contents, structure.

Введение

Одним из первых, кто обратил внимание на оптическую однородность воздушной массы, был С.П. Хромов. В своей работе [1] он показал, что интегральный (по спектру и толще атмосферы) фактор мутности почти одинаков внутри одной и той же массы и резко изменяется при переходе из одной в другую либо при смене их типа в пункте измерений. Выполненный в [2–4] анализ выявил, что величина фактора мутности определяется составом воздуха, который, в свою очередь, зависит от характера синоптических процессов. Это было отмечено и в публикациях других авторов [5–9]. При этом на составе воздуха сказываются направление переноса и предыстория воздушных масс [10–13].

Элементы общей циркуляции атмосферы оказывают влияние как на общий уровень концентра-

ции примесей в воздухе [14, 15], так и на содержание отдельных газов: озона [16–18], диоксида углерода [6, 7], оксидов азота [8] и аэрозольных частиц разных размеров [19–21]. Однако при всей значительности воздействия синоптических процессов состав воздуха определяется районом, в котором формируется воздушная масса, наличием источников и стоков той или иной примеси [22–25]. В результате воздушная масса в целом оказывается однородной не только оптически, но и по составу [26]. Естественно, что это выполняется при условии отсутствия крупномасштабных источников примесей, например лесных пожаров [27–31].

Имеются свои особенности в изменении состава воздуха в районе проведения наблюдений и при смене воздушных масс. Изменение происходит не просто скачкообразно, а по достаточно сложному механизму, который определяется динамическими процессами в зоне фронтальных разделов, растворимостью газов в атмосферных осадках, гидрофильностью или гидрофобностью аэрозольных частиц [32–37].

Из вышеперечисленных особенностей распределения состава воздуха внутри воздушных масс и перехода из одного типа в другой следует, что эти различия могут быть весьма значительны. Поэтому в настоящей работе ставится задача определения значения концентрации газовых и аэрозольных компонент в разных воздушных массах в районе г. Томска, где продолжительное время проводится мониторинг состава воздуха, а также особенностей его изменения при переходе из одного типа воздушной массы в другой.

* Ольга Юрьевна Антохина (antokhina@iao.ru); Павел Николаевич Антохин (arp@iao.ru); Виктория Геннадьевна Аршинова (arvi@iao.ru); Михаил Юрьевич Аршинов (michael@iao.ru); Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru); Сергей Борисович Белан (bsb@iao.ru); Денис Константинович Давыдов (denis@iao.ru); Нина Викторовна Дудорова (ninosh@mail.ru); Георгий Алексеевич Ивлев (ivlev@iao.ru); Артем Владимирович Козлов (artem@iao.ru); Татьяна Михайловна Рассказчикова (rtm@iao.ru); Денис Евгеньевич Савкин (sde@iao.ru); Денис Валентинович Симоненков (simon@iao.ru); Татьяна Константиновна Скляднева (tatyana@iao.ru); Геннадий Николаевич Толмачев (tgn@ipc.tsc.ru); Александр Владиславович Фофонов (alenfo@iao.ru).

Район исследований и методы анализа

Исследования проводились на основании данных TOR-станции, которая введена в эксплуатацию в декабре 1992 г. [38] и функционирует по настоящее время. В данной работе проанализированы изменения концентраций малых газовых составляющих атмосферы (МГС) CO_2 , CH_4 , CO , SO_2 , O_3 и химический состав аэрозоля. Для измерения МГС использовались следующие приборы: газоанализатор Picarro G2301-m для измерения диоксида углерода (диапазон $0 \dots 1000 \text{ млн}^{-1}$, погрешность $< 0,2 \text{ млн}^{-1}$) и метана (диапазон $0 \dots 20 \text{ млн}^{-1}$, погрешность $< 0,0015 \text{ млн}^{-1}$); электрохимический газоанализатор «ОПТЭК К-100» для измерения оксида углерода (диапазон $0 \dots 50 \text{ мг/м}^3$, погрешность $\pm 20\%$); флуоресцентный ультрафиолетовый газоанализатор Teledyne API 100E для измерения диоксида серы (диапазон $0 \dots 20 \text{ млн}^{-1}$, погрешность $\pm 0,5\%$); хемиллюминесцентный газоанализатор «ОПТЭК 3.02-П» для измерения озона (диапазон $0 \dots 500 \text{ мкг/м}^3$, погрешность $\pm 20\%$).

Изменения концентраций CO_2 , CH_4 , CO , SO_2 , O_3 в различных воздушных массах и при прохождении фронтов проанализированы за 2015 и 2016 гг. Тип воздушной массы устанавливался по приземным синоптическим картам.

Химический состав аэрозоля анализировался по данным самолетного зондирования, которое выполняется с июля 1997 г. по настоящее время над Караканским бором юго-западнее Новосибирска. Отбор проб осуществлялся на фильтры типа АФА-ХА и АФА-ХП. Химический анализ проб атмосферного аэрозоля проводился на кафедре аналитической химии Томского государственного университета. Пределы обнаружения составляли для ионов $0,1\text{--}0,6 \text{ мкг/фильтр}$, для элементов — $0,01\text{--}0,02 \text{ мкг/фильтр}$.

Состав воздуха в различных воздушных массах

Результаты определения средних значений концентрации газовых компонентов воздуха в основных типах воздушных масс и соответствующие средние отклонения приведены в табл. 1.

Из данных табл. 1 следует, что концентрация CO_2 наибольшая в арктической воздушной массе и уменьшается в более теплых массах. Наименьшая она в субтропической массе. Различия средних концентраций между арктической и умеренной воздушными массами достоверны по уровню $0,001$. Между умеренной, субтропической и тропической массами достоверность различия средних значений не достигает даже минимального уровня значимости $0,05$. Такая картина отражает распределение источников и стоков углекислого газа по регионам формирования воздушных масс [39].

Такой же градиент, направленный из холодного воздуха в теплый, наблюдается и для метана (табл. 1). Наибольшая концентрация CH_4 фиксируется в арктической воздушной массе (2069 млрд^{-1}), наименьшая — в тропической (2003 млрд^{-1}). Различия в средних значениях между арктической и умеренной массами достоверны по уровню $0,001$, между умеренной и субтропической — по уровню $0,01$. Различия в концентрациях между субтропической и тропической массами недостоверны. Возможно, сказывается, так же как и для CO_2 , небольшая повторяемость тропических масс, всего 85 случаев. Такое распределение CH_4 , скорее всего, складывается из-за наличия источников, расположенных в Северном Ледовитом океане [40–42] и Васюганских болотах, мощность эмиссии с поверхности которых превышает даже арктический источник [43].

Несмотря на то что среднеглобальная концентрация оксида углерода снижается [44, 45], в районе исследований во всех воздушных массах зафиксированы высокие концентрации CO (табл. 1). Наибольшая она в умеренной воздушной массе и составляет 361 млрд^{-1} . Немного меньшее значение 355 млрд^{-1} фиксируется в тропической воздушной массе. Наименьшее значение 327 млрд^{-1} наблюдается в арктической массе, где отсутствуют как природные, так и антропогенные источники [26]. Такое распределение CO , по-видимому, отражает наличие мощного промышленного источника в Западной Европе, из которого, по данным [46], осуществляется перенос в умеренных широтах на территорию Сибири. Рост концентрации в тропической массе является отражением действия мощного источника, который находится в этих широтах [47, 48]. При этом различия между средними концентрациями в арктической и умеренной массах, между умеренной

Таблица 1

Средние концентрации и среднеквадратические отклонения газовых компонент
в различных воздушных массах в районе г. Томска

Тип воздушной массы	CO_2 , млн^{-1}	<i>N</i>	CH_4 , млрд^{-1}	<i>N</i>	CO , млрд^{-1}	<i>N</i>	SO_2 , млрд^{-1}	<i>N</i>	O_3 , мкг/м^3	<i>N</i>
Арктическая	428 ± 26	1647	2069 ± 153	1647	327 ± 267	4424	$11,4 \pm 5,2$	4424	27 ± 16	4424
Умеренная	418 ± 25	1126	2022 ± 114	1126	361 ± 278	7038	$10,6 \pm 5,5$	7045	40 ± 24	7046
Субтропическая	417 ± 20	675	2011 ± 2	675	330 ± 171	5196	$11,9 \pm 5,8$	5241	50 ± 23	5243
Тропическая	418 ± 10	85	2003 ± 52	85	355 ± 295	671	$12,5 \pm 4,8$	687	55 ± 20	687

Примечание. *N* — число случаев.

и субтропической достоверны по уровню 0,001. Между концентрациями в субтропической и тропической массах достоверность находится на уровне 0,01.

Усилия мирового сообщества по уменьшению антропогенных выбросов диоксида серы привели к значительному уменьшению фоновой концентрации SO_2 во многих регионах земного шара [49–51]. Это также видно из данных табл. 1, где концентрация изменяется от $10,6 \text{ млрд}^{-1}$ в умеренной воздушной массе до $12,5 \text{ млрд}^{-1}$ в тропической. При этом различия между средними концентрациями во всех воздушных массах достоверны по уровню 0,001. Тем не менее небольшие абсолютные различия между содержанием SO_2 в воздушных массах затрудняют их интерпретацию.

Для озона характерен обратный по отношению к CO_2 и CH_4 градиент (см. табл. 1). Его наименьшая средняя концентрация наблюдается в арктической воздушной массе – 27 мкг/м^3 , наибольшая – в тропической – 55 мкг/м^3 . Так же, как и для SO_2 , различия между средними концентрациями во всех воздушных массах достоверны по уровню 0,001. Это, с одной стороны, отражает поступление газопредшественников и УФ-Б-радиации, определяющих концентрацию тропосферного озона [52]. С другой стороны, должна сказаться и недавно установленная нелинейная зависимость скорости генерации O_3 с увеличением температуры воздуха [53].

Ввиду того, что распределение концентраций химических компонентов подчиняется логнормальному закону, средние значения и среднеквадратичные отклонения рассчитывались для логарифмов концентраций, для которых потом считался доверительный интервал при уровне $P = 0,95$. То есть средние (а точнее, среднегеометрические) значения и границы доверительных интервалов (рис. 1–2) являются антилогарифмами полученных значений. Количество использованных проб приведено в табл. 2.

Анализ химического состава аэрозоля по типам воздушных масс позволяет сделать предварительные выводы по широтным закономерностям происхождения отдельных элементов и неорганических ионов, объединив их по этому признаку в соответствующие группы (рис. 1 и 2).

Явное «южное» происхождение имеют кремний, хром, марганец, серебро (рис. 1) и гидрокарбонат-анион (рис. 2). Вывод о последнем компоненте, однако, имеет низкую статистическую обеспеченность, хотя он и дает самый резко выраженный пик концентрации для HCO_3^- . К этой же группе тяготеют ионы хлора и натрия, вероятно, привносимые дальним переносом с морским аэрозолем (рис. 2).

Прямую корреляцию с арктическими воздушными массами имеют микроэлементы медь, бор, кадмий, никель (рис. 1) и сульфат-анион (рис. 2). Очевидно, все они имеют антропогенное происхождение, подтверждая высокую аккумуляционную способность арктического воздуха.

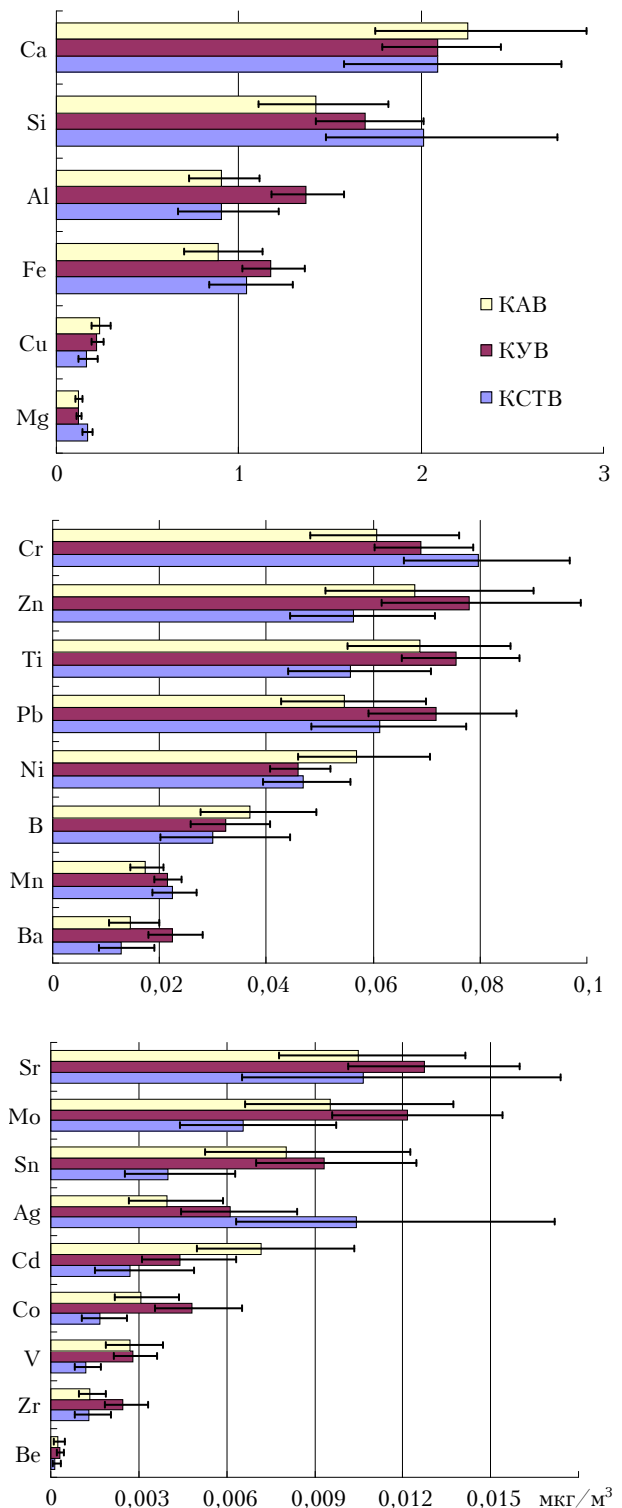


Рис. 1. Среднегеометрические значения концентраций элементов в районе Караканского бора в различных типах воздушных масс (КАВ – континентальный арктический, КУВ – умеренный, КСТВ – субтропический и тропический воздух); указаны доверительные интервалы по уровню $P = 0,95$, рассчитанные из среднеквадратичных отклонений, также вычисленных для логарифмов концентраций

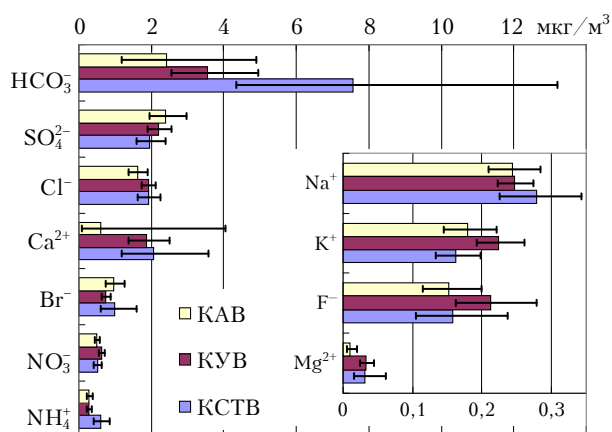


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, только для концентраций ионов

Таблица 2

Количество проб для каждой воздушной массы и химического компонента, использованных для расчета средних значений и доверительного интервала

Химический элемент	Тип воздушной массы		
	Субтропическая	Умеренная	Арктическая
Mg	154	511	238
Cu	170	495	231
Fe	158	488	235
Al	170	551	266
Si	162	518	237
Ca	158	527	250
Ba	125	306	150
Mn	151	467	207
B	35	149	81
Ni	143	426	198
Pb	136	403	185
Ti	138	449	202
Zn	91	159	94
Cr	159	426	204
Be	46	131	53
Zr	58	140	68
V	91	232	127
Co	91	202	109
Cd	42	114	45
Ag	24	81	49
Sn	103	245	115
Mo	111	268	141
Sr	24	98	50
Sb	0	2	8
NH ₄ ⁺	67	161	88
NO ₃ ⁻	135	433	215
Br ⁻	28	164	54
Ca ²⁺	8	32	8
Cl ⁻	157	516	253
SO ₄ ²⁻	117	370	207
HCO ₃ ⁻	7	43	13
Mg ²⁺	6	30	9
F ⁻	13	46	11
K ⁺	127	415	217
Na ⁺	139	435	228

Умеренный воздух формирует в тропосферном аэрозоле юга Западной Сибири самую многочисленную группу элементов и ионов: алюминий, железо, цинк, титан, свинец, барий, стронций, молибден, олово, кобальт, ванадий, цирконий, из ионов – калий, фторид и нитрат (рис. 1). Очевидно, что умеренная масса имеет местное или зональное происхождение, поэтому, учитывая доминирующие потоки, можно прогнозировать основной вклад западных районов – Урала и Северного Казахстана, а также Кузбасса и в ряде случаев центральных районов Восточно-Сибирского плоскогорья.

Особенности изменения состава воздуха при смене воздушных масс

В связи с тем что фронтальные разделы представляют собой сложные образования, сопровождающиеся изменением облачности и выпадением осадков в предфронтальной и зафронтальной областях и резким изменением температуры, усилением и конвергенцией ветра (измерения проводились в одной точке с интервалом в час), для каждого случая использовались данные ежечасных измерений за 5 ч до и 5 ч после прохождения фронта. В течение исследуемого периода (2015–2016 гг.) в районе г. Томска наблюдалось прохождение 167 холодных, 145 теплых фронтов и 128 фронтов окклюзии.

При исследовании концентрации O₃ для сокращения влияния сезонной и суточной изменчивости концентрации газов было проведено нормирование данных о концентрации газов на их значения во время прохождения фронта [35]. Поэтому значения, представленные на рис. 3, являются относительными.

При прохождении теплого фронта наблюдается уменьшение концентрации CO₂ с минимумом за линией фронта, затем происходит некоторое ее увеличение (рис. 3, а). Аналогичный ход изменения концентрации CO₂ выявлен при смещении холодного фронта (рис. 3, б), только минимальные значения наблюдаются за час до его прохождения.

При прохождении теплого фронта в изменении концентрации CH₄ имеется явно выраженное уменьшение при переходе из холодной воздушной массы в теплую (рис. 3, в). В холодном фронте кривая концентрации метана многомодальна, с двумя основными минимумами за 3 ч до прохождения фронта и 3 ч после (рис. 3, г).

Для изменения содержания SO характерен – при общем уменьшении концентрации при переходе из холодной воздушной массы в теплую (рис. 3, д) и росте при переходе из теплой в холодную (рис. 3, е) – более сложный ход, чем для CO₂ и CH₄.

Хотя амплитуды колебаний концентрации SO₂ в зоне фронтов, как теплого, так и холодного (рис. 3, ж и з), невелики, для этого газа наблюдаются наиболее сложные вариации в зоне фронтов.

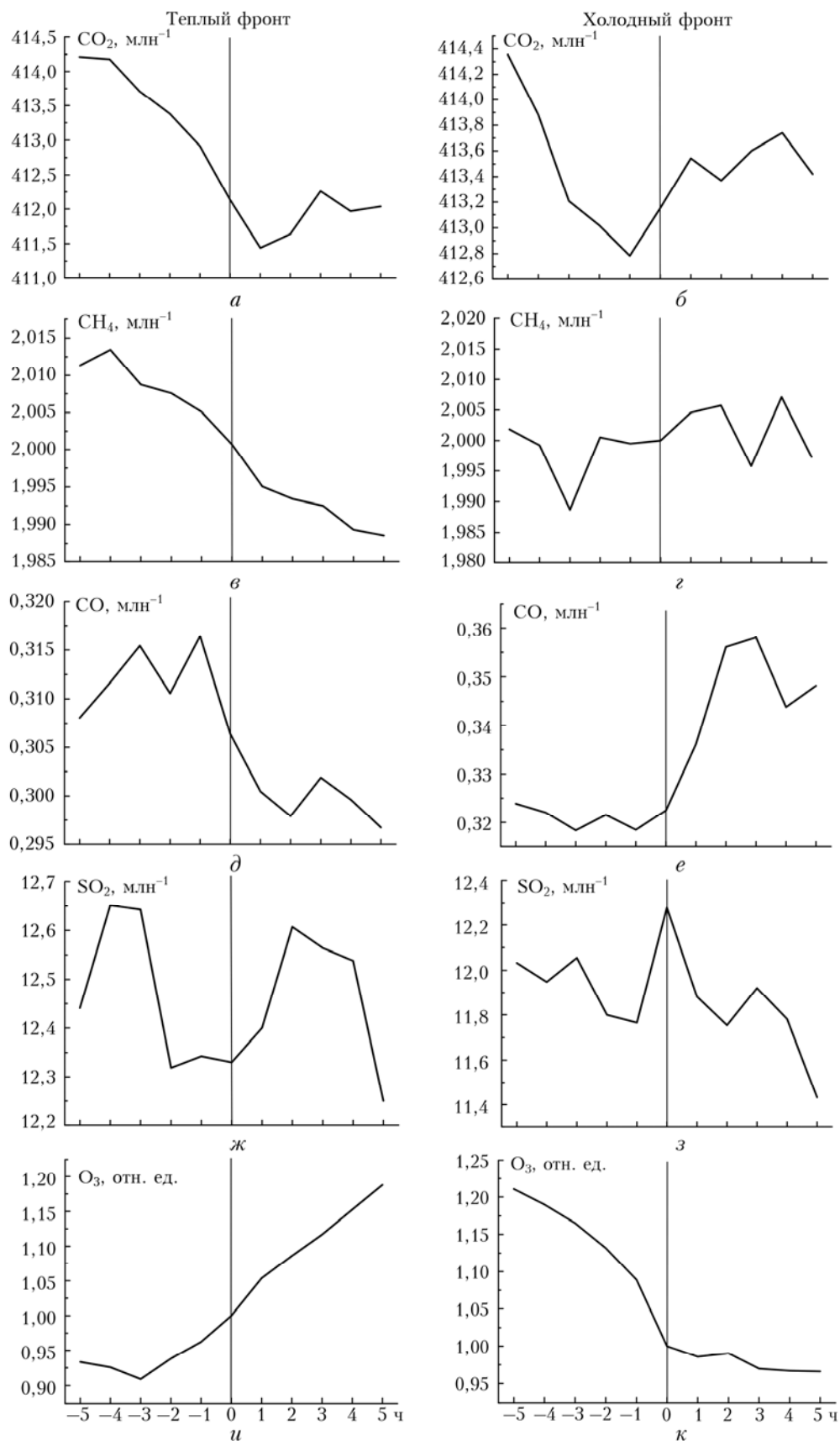


Рис. 3. Изменение концентрации МГС при прохождении теплого (а, в, д, ж, и) и холодного (б, г, е, з, к) фронтов через г. Томск. Отрицательные значения оси абсцисс соответствуют часам до прохождения фронта, положительные – после прохождения

При исследовании концентрации O_3 для сокращения влияния сезонной и суточной изменчивости концентрации газов было проведено нормирование данных о концентрации газов на их значения во время прохождения фронта [35]. Поэтому значения, представленные на рис. 3, являются относительными.

При прохождении теплого фронта наблюдается уменьшение концентрации CO_2 с минимумом за линией фронта, затем происходит некоторое ее увеличение (рис. 3, а). Аналогичный ход изменения концентрации CO_2 выявлен при смещении холодного фронта (рис. 3, б), только минимальные значения наблюдаются за час до его прохождения.

При прохождении теплого фронта характерно увеличение концентрации O_3 при переходе из холодной воздушной массы в теплую (рис. 3, в). В зоне фронта рост составляет приблизительно 30%. Из рис. 3, г видно, что при прохождении холодного фронта концентрация O_3 резко уменьшается при переходе от холодной к теплой воздушной массе. Изменение концентрации составляет ~25%. За фронтом концентрация O_3 стабилизируется и остается практически неизменной.

Не будем давать интерпретацию приведенным данным, так как каждый фронт представляет собой сложное образование с большим количеством особенностей. Это было установлено достаточно давно [1]. Нашей целью была оценка общей тенденции изменения и проверка выполненных оценок значений концентрации газов в разных воздушных массах.

Заключение

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что каждая воздушная масса имеет свой состав воздуха, который в ряде случаев достоверно различается. Это относится как к газовым примесям воздуха, так и к химическому составу аэрозольных частиц.

При переходе из одной воздушной массы в другую концентрации примесей изменяются нелинейно. При этом направление градиента зависит от состава воздуха в холодной и теплой воздушных массах.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-17-01095).

1. Хромов С.П. Основы синоптической метеорологии. Л.: Гидрометиздат, 1948. 700 с.
2. Зуев В.Е., Белан Б.Д., Задде Г.О. Оптическая погода. Новосибирск: Наука, 1990. 192 с.
3. Белан Б.Д., Задде Г.О., Кусков А.И., Рассказчикова Т.М. Спектральная прозрачность атмосферы в основных синоптических объектах // Оптика атмосф. и океана. 1994. Т. 7, № 9. С. 1187–1197.
4. Белан Б.Д., Задде Г.О., Кусков А.И. Пространственная изменчивость спектральной прозрачности атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 1994. Т. 7, № 10. С. 1420–1422.
5. Law R.M., Steele L.P., Krummel P.B., Zahorowski W. Synoptic variations in atmospheric CO_2 at Cape Grim: A model intercomparison // Tellus B. 2010. V. 62, N 5. P. 810–820.

6. Klavins M., Rodinov V. Influence of large-scale atmospheric circulation on climate in Latvia // Boreal Environ. Res. 2010. V. 15, N 6. P. 533–543.
7. Zhang J., Wu L., Huang G., Notaro M. Relationships between large-scale circulation patterns and carbon dioxide exchange by a deciduous forest // J. Geophys. Res. 2011. V. 116, N D4. P. 1–13.
8. Pope R.J., Savage N.H., Chipperfield M.P., Arnold S.R., Osborn T.J. The influence of synoptic weather regimes on UK air quality: Analysis of satellite column NO_2 // Atmos. Sci. Lett. 2014. V. 15, N 3. P. 211–217.
9. Pace L., Boccacci L., Casilli M., Di Carlo P., Fattorini S. Correlations between weather conditions and airborne pollen concentration and diversity in a Mediterranean high-altitude site disclose unexpected temporal patterns // Aerobiology. 2018. V. 34, N 1. P. 75–87.
10. Звягинцев А.М., Какаджанова Г., Тарасова О.А. Влияние направлений переноса воздушных масс на сезонный ход концентраций малых газовых составляющих атмосферы в Европе // Метеорол. и гидрол. 2010. № 7. С. 18–28.
11. Coutou D., Lehmann J., Beckmann J. The weakening summer circulation in the Northern Hemisphere mid-latitudes // Science. 2015. V. 348, N 6232. P. 324–327.
12. Perez I.A., Sanchez M.L., Garcia M.A., Pardo N. An experimental relationship between airflow and carbon dioxide concentrations at a rural site // Sci. Total Environ. 2015. V. 533. P. 432–438.
13. Fu J., Wang B., Chen Y., Ma Q. The influence of continental air masses on the aerosols and nutrients deposition over the western North Pacific // Atmos. Environ. 2018. V. 172. P. 1–11.
14. Flocas H., Kelessis A., Helmis C., Petrakakis M., Zoumakis M., Pappas K. Synoptic and local scale atmospheric circulation associated with air pollution episodes in an urban Mediterranean area // Theor. Appl. Climatol. 2009. V. 95, N 3–4. P. 265–277.
15. Ситнов С.А., Мохов И.И., Горчаков Г.И., Джолла А.В. Дымная мгла на европейской части России летом 2016 г.: связь с лесными пожарами в Сибири и аномалиями атмосферной циркуляции // Метеорол. и гидрол. 2017, № 8, С. 50–63.
16. Dayan U., Levy I. Relationship between synoptic-scale atmospheric circulation and ozone concentrations over Israel // J. Geophys. Res. 2002. V. 107, N D24. P. 1–12.
17. Diem J.E., Hursey M.A., Morris I.R., Murray A.C., Rodriguez R.A. Upper-level atmospheric circulation Patterns and ground-level ozone in the Atlanta Metropolitan area // J. Appl. Meteorol. Climatol. 2010. V. 49, N 11. P. 2185–2196.
18. Zhang Y., Mao H., Ding A., Zhou D., Fu C. Impact of synoptic weather patterns on spatio-temporal variation in surface O_3 levels in Hong Kong during 1999–2011 // Atmos. Environ. 2013. V. 73. P. 41–50.
19. Demuzere M., Trigo R.M., Vila-Guerau de Arellano J., Lipzig N.P.M. The impact of weather and atmospheric circulation on O_3 and PM_{10} levels at a rural mid-latitude site // Atmos. Chem. Phys. 2009. V. 9, N 8. P. 2695–2714.
20. Dharshana K.G.T., Kravtsov S., Kahl J.D.W. Relationship between synoptic weather disturbances and particulate matter air pollution over the United States // J. Geophys. Res. 2010. V. 115, N D24. P. 1–16.
21. Flaounas E., Kotroni V., Lagouvardos K., Kazadzis S., Gkikas A., Hatzianastassiou N. Cyclone contribution to dust transport over the Mediterranean region // Atmos. Sci. Lett. 2015. V. 16, N 4. P. 473–478.
22. McGregor G.R., Bamzels D. Synoptic typing and its application to the investigation of weather air pollution

- relationships, Birmingham, United Kingdom // *Theor. Appl. Climatol.* 1995. V. 51, N 4. P. 223–236.
23. Fleming Z.L., Monks P.S., Manning A.J. Review: Untangling the influence of air-mass history in interpreting observed atmospheric composition // *Atmos. Res.* 2012. V. 104–105, N 1. P. 1–39.
 24. Orbe C., Holzer M., Polvani L.M., Waugh D. Air-mass origin as a diagnostic of tropospheric transport // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2013. V. 118, N 3. P. 1459–1470.
 25. Freitag S., Clarke A.D., Howell S.G., Kapustin V.N., Campos T., Brekhovskikh V.L., Zhou J. Combining airborne gas and aerosol measurements with HYSPLIT: A visualization tool for simultaneous evaluation of air mass history and back trajectory consistency // *Atmos. Meas. Tech.* 2014. V. 7, N 1. P. 107–128.
 26. Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Недэлэк Ф., Paris J.-D., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В. Крупномасштабные исследования газового и аэрозольного состава воздуха над Сибирским регионом // *Оптика атмосфер. и океана.* 2014. Т. 27, № 3. С. 232–239.
 27. Еланский Н.Ф., Мохов И.И., Беликов И.Б., Березина Е.В., Елохов А.С., Иванов В.А., Панкратова Н.В., Постыляков О.В., Сафронов А.Н., Скороход А.И., Шумский Р.А. Газовые примеси в атмосфере над Москвой летом 2010 г. // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2011. Т. 472, № 6. С. 729–738.
 28. Звягинцев А.М., Блюм О.Б., Глазкова А.А., Котельников С.Н., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А., Лезина Е.А., Миллер Е.А., Миляев В.А., Попиков А.П., Семутникова Е.Г., Тарасова О.А., Шалыгина И.Ю. Загрязнение воздуха на европейской части России и Украине в условиях жаркого лета 2010 г. // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2011. Т. 472, № 6. С. 757–766.
 29. Фокеева Е.В., Сафронов А.Н., Ракитин В.С., Юрганов Л.Н., Гречко Е.И., Шумский Р.А. Исследование влияния пожаров в июле–августе 2010 г. на загрязнение окисью углерода атмосферы Москвы и окрестностей // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2011. Т. 47, № 6. С. 739–756.
 30. Кашин Ф.В., Арефьев В.Н., Сизов Н.И., Акименко Р.М., Упэнэк Л.Б. Фоновая составляющая окиси углерода в приземном воздухе (станция мониторинга «Обнинск») // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2016. Т. 52, № 3. С. 281–287.
 31. Antokhin P.N., Arshinova V.G., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Belan S.B., Davydov D.K., Ivlev G.A., Fofonov A.V., Kozlov A.V., Paris J.-D., Nedelec P., Rasskazchikova T.M., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Sklyadneva T.K., Tolmachev G.N. Distribution of trace gases and aerosols in the troposphere over Siberia during wildfires of summer 2012 // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2018. V. 123, N 4. P. 2285–2297.
 32. Lee T.R., De Wekker S.F.J., Andrews A.E., Kofler J., Williams J. Carbon dioxide variability during cold front passages and fair weather days at a forested mountaintop site // *Atmos. Environ.* 2012. V. 46, N 1. P. 405–416.
 33. Hu X.M., Klein P.M., Xue M., Shapiro A., Nallapareddy A. Enhanced vertical mixing associated with a nocturnal cold front passage and its impact on near-surface temperature and ozone concentration // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2013. V. 118, N 7. P. 2714–2728.
 34. Scott G.M., Diab R.D. Forecasting air pollution potential: A synoptic climatological approach // *J. Air Waste Manag. Assoc.* 2000. V. 50, N 10. P. 1831–1842.
 35. Аршинова В.Г., Белан Б.Д., Рассказчикова Т.М., Рогов А.Н., Толмачев Г.Н. Изменение концентрации озона в приземном слое воздуха при прохождении атмосферных фронтов // *Оптика атмосфер. и океана.* 1995. Т. 8, № 4. С. 625–631.
 36. Аршинова В.Г., Белан Б.Д., Воронцова Е.В., Задде Г.О., Рассказчикова Т.М., Семьянова О.И., Скляднева Т.К. Динамика аэрозоля при прохождении атмосферных фронтов // *Оптика атмосфер. и океана.* 1997. Т. 10, № 7. С. 813–819.
 37. Антохин П.Н., Аршинов М.Ю., Аршинова В.Г., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Рассказчикова Т.М., Фофонов А.В., Inoue G., Machida T., Shimoyama K., Maksutov Sh.Sh. Изменения концентрации CO₂ на территории Западной Сибири при прохождении атмосферных фронтов в разные сезоны года // *Оптика атмосфер. и океана.* 2013. Т. 26, № 1. С. 24–31
 38. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Зуев В.В., Зуев В.Е., Ковалевский В.К., Лиготский А.В., Мелешкин В.Е., Панченко М.В., Покровский Е.В., Рогов А.Н., Симоненков Д.В., Толмачев Г.Н. TOR-станция мониторинга атмосферных параметров // *Оптика атмосфер. и океана.* 1994. Т. 7, № 8. С. 1085–1092.
 39. Le Quére C., Andrew R.N., Friedlingstein P., Sitch S., Pongratz J., Manning A.C., Korsbakken J.I., Peters G.P., Canadell J.G., Jackson R.B., Boden T.A., Tans P.P., Andrews O.D., Arora V.K., Bakker D.C.E., Barbero L., Becker M., Betts R.A., Bopp L., Chevalier C., Chini L.P., Ciais P., Cosca C.E., Cross J., Currie K., Gasser T., Harris I., Hauck J., Haverd V., Houghton R.A., Hunt C.W., Hurtt G., Ilyina T., Jain A.K., Kato E., Kautz M., Keeling R.F., Goldewijk K.K., Körtzinger A., Landschützer P., Lefèvre N., Lenton A., Lienert S., Lima I., Lombardozzi D., Metz N., Millero F., Monteiro P.M.S., Munro D.R., Nabel J.E.M.S., Nakaoka S., Nojiri Y., Padin X.A., Peregón A., Pfeil B., Pierrot D., Poulter B., Rehder G., Reimer J., Rüdgenbeck C., Schwinger J., Séférian R., Skjelvan I., Stocker B.D., Tian H., Tilbrook B., Tubiello F.N., van der Laan-Luijkx I.T., van der Werf G.R., van Heuven S., Viovy N., Vuichard N., Walker A.P., Watson A.J., Wiltshire A.J., Zaehle S., Zhu D. Global carbon budget 2017 // *Earth Syst. Sci. Data.* 2018. V. 10, N 1. P. 405–448.
 40. Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., Yusupov V., Kosmach D., Gustafsson O. Extensive Methane Venting to the Atmosphere from Sediments of the East Siberian Arctic Shelf // *Science.* 2010. V. 327, N 5970. P. 1246–1250.
 41. Semiletov I.P., Shakhova N.E., Sergienko V.I., Pitko I.I., Dudarev O.V. On carbon transport and fate in the East Siberian Arctic land–shelf–atmosphere system // *Environ. Res. Lett.* 2012. V. 7, N 1. 13 p.
 42. Hartery S., Commane R., Lindaas J., Sweeney C., Henderson J., Mountain M., Steiner N., McDonald K., Dinardo S.J., Miller C.E., Wofsy S.C., Chang R.Y.-W. Estimating regional-scale methane flux and budgets using CARVE aircraft measurements over Alaska // *Atmos. Chem. Phys.* 2018. V. 18, N 1. P. 185–202.
 43. Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Nedelec Ph., Paris J.-D., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В. Вертикальное распределение газовых и аэрозольных примесей воздуха над российским сектором Арктики // *Оптика атмосфер. и океана.* 2017. Т. 30, № 12. С. 1043–1052; Antokhina O.Yu., Antokhin P.N., Arshino-

- va V.G., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Belan S.B., Davydov D.K., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Nédélec P., Paris J.-D., Rasskazchikova T.M., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Sklyadneva T.K., Tolmachev G.N., Fofonov A.V.* Vertical Distributions of Gaseous and Aerosol Admixtures in Air over the Russian Arctic // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 3. P. 300–310.
44. *Strode S.A., Pawson S.* Detection of carbon monoxide trends in the presence of interannual variability // *J. Geophys. Res.*: Atmos. 2013. V. 118, N 21. P. 12257–12273.
45. *Zhou Y., Mao H., Demerjian K., Hogrefe C., Liu J.* Regional and hemispheric influences on temporal variability in baseline carbon monoxide and ozone over the North-east US // *Atmos. Environ.* 2017. V. 164. P. 309–324.
46. *Штабкин Ю.А., Моисеенко К.Б., Скороход А.И., Васильева А.В., Хайманн М.* Источники и вариации тропосферного СО в Центральной Сибири: численные эксперименты и наблюдения на высотной мачте ЗОТТО // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2016. Т. 52, № 1. С. 51–63.
47. *El Amraoui L., Attié J.-L., Ricaud P., Lahoz W.A., Piacentini A., Peuch V.-H., Warner J.X., Abida R., Barrü J., Zbinden R.* Tropospheric CO vertical profiles deduced from total columns using data assimilation: Methodology and validation // *Atmos. Meas. Tech.* 2014. V. 7, N 9. P. 3035–3057.
48. *Park K., Emmons L.K., Wang Z., Mak J.E.* Joint application of concentration and $\delta^{18}\text{O}$ to investigate the global atmospheric CO budget // *Atmosphere.* 2015. V. 6, N 5. P. 547–578.
49. *Vestreng V., Myhre G., Fagerli H., Reis S., Tarra-son L.* Twenty-five years of continuous sulphur dioxide emission reduction in Europe // *Atmos. Chem. Phys.* 2007. V. 7, N 13. P. 3663–3681.
50. *Smith S.J., van Aardenne J., Klimont Z., Andres R.J., Volke A., Arias S.D.* Anthropogenic sulfur dioxide emissions: 1850–2005 // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11, N 3. P. 1101–1116.
51. *Henschel S., Querol X., Atkinson R., Pandolfi M., Zeka A., Le Tertre A., Analitis A., Katsouyanni K., Chanel O., Pascal M., Bouland C., Haluza D., Medina S., Goodman P.G.* Ambient air SO₂ patterns in 6 European cities // *Atmos. Environ.* 2013. V. 79. P. 236–247.
52. *Белан Б.Д.* Озон в тропосфере. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2010. 488 с.
53. *Белан Б.Д., Савкин Д.Е., Толмачев Г.Н.* Зависимость образования озона в приземном слое от температуры воздуха // *Оптика атмосфер. и океана.* 2017. Т. 30, № 11. С. 971–979; *Белан Б.Д., Савкин Д.Е., Толмачев Г.Н.* Air – Temperature Dependence of the Ozone Generation Rate in the Surface Air Layer // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 2. P. 187–196.

O.Yu. Antokhina, P.N. Antokhin, V.G. Arshinova, M.Yu. Arshinov, B.D. Belan, S.B. Belan, D.K. Davydov, N.V. Dudorova, G.A. Ivlev, A.V. Kozlov, T.M. Rasskazchikova, D.E. Savkin, D.V. Simonenkov, T.K. Sklyadneva, G.N. Tolmachev, A.V. Fofonov. **Study of the composition of air masses of different types.**

Mean concentrations of gas and aerosol components in different air masses near Tomsk are calculated from long-term TOR-station monitoring data. A decrease in the CO₂ and CH₄ concentrations from Arctic to tropical is shown to be characteristic. An inverse pattern is observed for ozone: maxima are recorded in tropical air masses, and minima, in Arctic. The distribution of such gases as CO and SO₂ is more complex.