

М.Ю. Аршинов, Б.Д. Белан, Д.К. Давыдов, Г.А. Ивлев, Д.А. Пестунов,
Т.М. Рассказчикова, Д.В. Симоненков, Г.Н. Толмачев, А.В. Фофонов

Комплексная оценка состояния воздушного бассейна Норильского промышленного района.

Ч. 2. Баланс примесей в зоне Норильска

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 23.01.2006 г.

Проанализирован для теплого и холодного сезонов состав газовых и аэрозольных компонентов, поступающих в воздушный бассейн Норильского промышленного региона и выходящих из него. Выявлены основные компоненты, которыми обогащается городская колонка примесей. Проведены оценки рассеивающих свойств атмосферы. Показано, что в зависимости от сезона года кардинально изменяется состав воздуха, как входящего на территорию района, так и выходящего из него.

Введение

Количество выбрасываемых предприятиями и автотранспортом загрязняющих веществ достаточно точно рассчитывается по топливному и материальному балансу. Однако помимо крупных предприятий, на которых учет налажен хорошо, имеется много мелких предприятий и неорганизованных источников, вносящих иногда заметный вклад в загрязнение атмосферы города и окружающего его пространства. Кроме того, выбрасываемые в воздух соединения в ходе химических и фотохимических реакций, конденсационных, коагуляционных и седиментационных процессов могут трансформироваться в другие, более токсичные. Например, озон не выбрасывается в воздух ни одним предприятием, а образуется в атмосфере из газов-предшественников. Параллельно с ним образуются формальдегид и другие альдегиды, микродисперсная фракция аэрозоля, включающая пероксиацетилнитраты и т.п. Поэтому целесообразно иметь независимую оценку баланса загрязняющих веществ в районе города или территории.

В зарубежной практике для этого используется метод построения вертикальных разрезов атмосферы с наветренной и подветренной сторон [1, 2]. По полученным данным затем ведется расчет. Наш опыт работы в разных регионах показал, что вертикальных разрезов не всегда хватает. Поскольку наличие локальной циркуляции может отклонять траектории воздушных частиц от основного потока, то мы, как правило, пользовались схемой «квадрат» [3], позволяющей учесть и такие отклонения.

Расположение Норильска, а точнее орографические препятствия вокруг него, не позволили реализовать в этих экспериментах схему «квадрат». Пришлось воспользоваться вариантом, применяемым зарубежными учеными: построение вертикаль-

ных разрезов с наветренной и подветренной сторон города. Плоскости разрезов выбирались перпендикулярно основному потоку по данным авиаметеостанции и картам барической топографии. Схема эксперимента приведена на рис. 1.

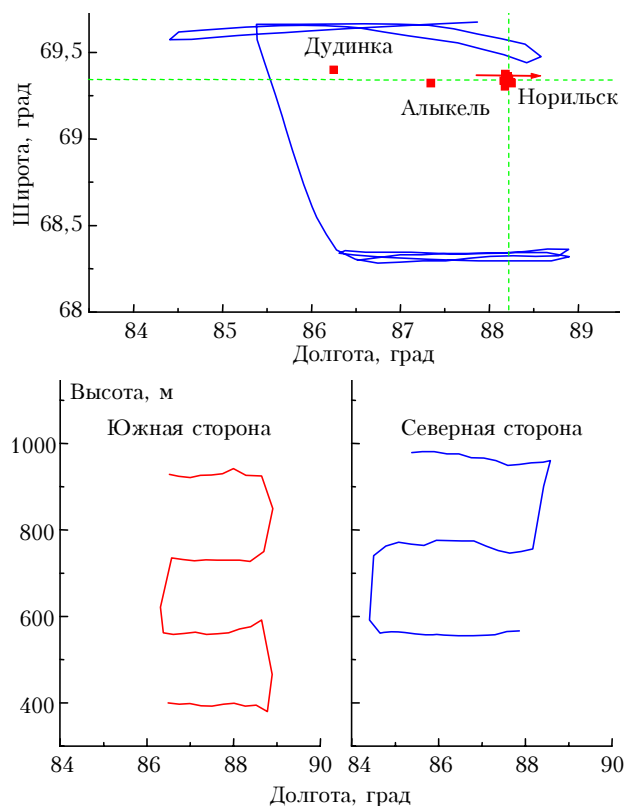


Рис. 1. Схема выполнения эксперимента

С наветренной и подветренной сторон от города были выполнены в одной вертикальной плоскости маршруты на высотах 400, 600, 800 и 1000 м

относительно уровня моря. Понятно, что с учетом особенностей рельефа уровень полета, оставаясь постоянным, был переменным относительно поверхности земли.

Результаты измерений

Рассмотрение начнем с наветренной стороны города, по данным для холодного периода (рис. 2–6). Эти данные должны отражать те фоновые концентрации примесей, которые содержатся в поступающем в город воздухе.

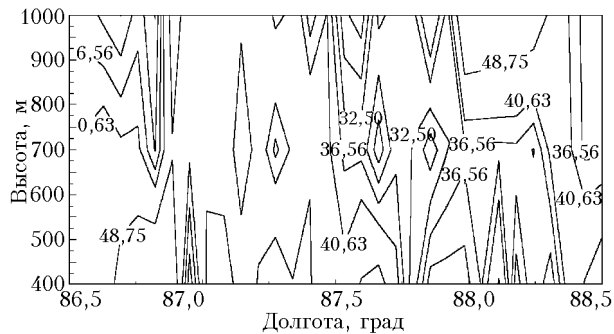


Рис. 2. Распределение на наветренной стороне концентрации сернистого ангидрида, $\text{мг}/\text{м}^3$

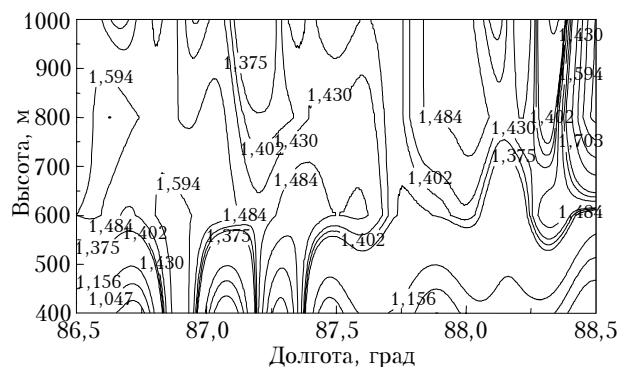


Рис. 3. Распределение на наветренной стороне счетной концентрации субмикронной фракции аэрозоля ($d \geq 0,4 \text{ мкм}$), см^{-3}

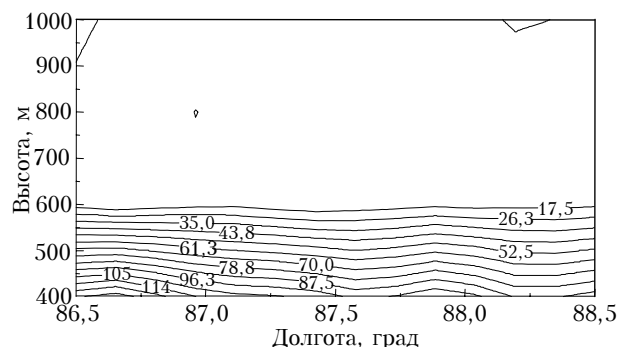


Рис. 4. Распределение на наветренной стороне счетной концентрации аккумуляционной моды микродисперсной фракции аэрозоля ($d > 70 \text{ нм}$), см^{-3}

Рис. 2 показывает, что на всей площади вертикального разреза наблюдаются значения концентрации сернистого ангидрида, которые характерны

для фоновых условий этого региона, — $30\text{--}40 \text{ мкг}/\text{м}^3$. Отклонения укладываются в стандартные ошибки измерений. Следовательно, извне сернистый ангидрид в город не поступает.

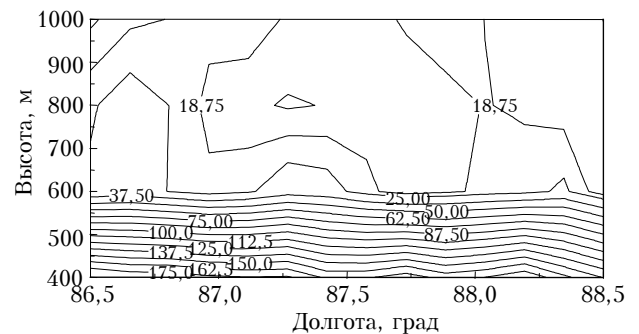


Рис. 5. Распределение на наветренной стороне счетной концентрации нуклеационной моды микродисперсной фракции аэрозоля ($d = 3\text{--}70 \text{ нм}$), см^{-3}

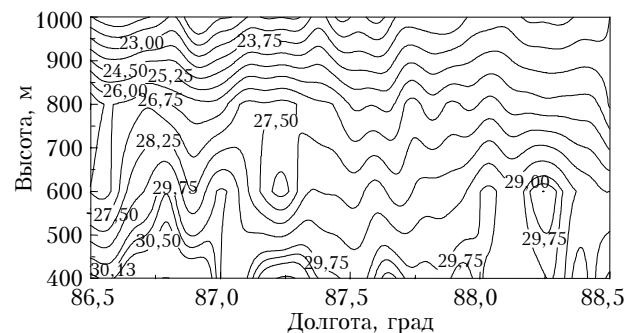


Рис. 6. Распределение на наветренной стороне концентрации озона, $\text{мг}/\text{м}^3$

Близкой к фоновой оказалась величина счетной концентрации субмикронной фракции аэрозоля $1\text{--}1,5 \text{ см}^{-3}$ (см. рис. 3).

Микродисперсную фракцию при анализе разделим на две моды, какие обычно и наблюдаются в атмосфере [4, 5]: на аккумуляционную и нуклеационную. Первая характерна тем, что это уже готовые частицы, образовавшиеся из газовой фазы, которые участвуют только в процессе коагуляции и вырастают затем в субмикронную фракцию [6]. Нуклеационная мода включает те частицы, которые непосредственно (минуты или часы тому назад) образовались из газовой фазы.

Вначале рассмотрим распределение аккумуляционной моды (см. рис. 4). Видно, что в подынверсионном слое до высоты 600 м имеется небольшое количество частиц — $17\text{--}100 \text{ см}^{-3}$, которые не смогут эффективно коагулировать из-за малой вероятности столкновений [6].

Распределение нуклеационной моды показывает (см. рис. 5), что в поступающем воздухе, особенно в подынверсионном слое, имеет место генерация частиц из газовой фазы, хотя и не очень интенсивная. Здесь концентрация составляет $25\text{--}175 \text{ см}^{-3}$. При интенсивной генерации она имеет величину $2000\text{--}10000 \text{ см}^{-3}$ [13].

И наконец, приведем данные по озону, который, как уже говорилось, образуется непосредственно

в атмосфере (см. рис. 6). Видно, что его распределение по плоскости разреза достаточно равномерно и изменяется от 30 мкг/м³ в подынверсионном слое, куда поступает озonoобразующие газы с подстилающей поверхности, до 23 мкг/м³ в надынверсионном слое.

Таким образом, зондирование с наветренной стороны города в зимний период показало, что в город поступает воздух, в котором концентрация примесей близка к фоновым значениям.

Проанализируем, какие соединения из города выносятся (рис. 7–11).

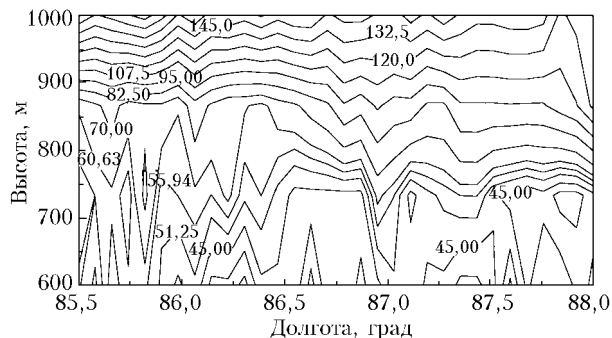


Рис. 7. Распределение на подветренной стороне концентрации сернистого ангидрида, мкг/м³

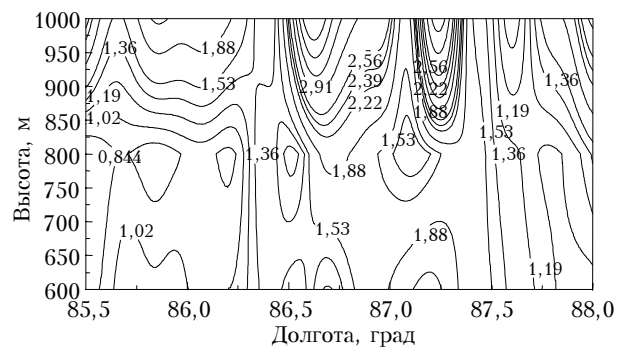


Рис. 8. Распределение на подветренной стороне счетной концентрации субмикронной фракции аэрозоля, см⁻³

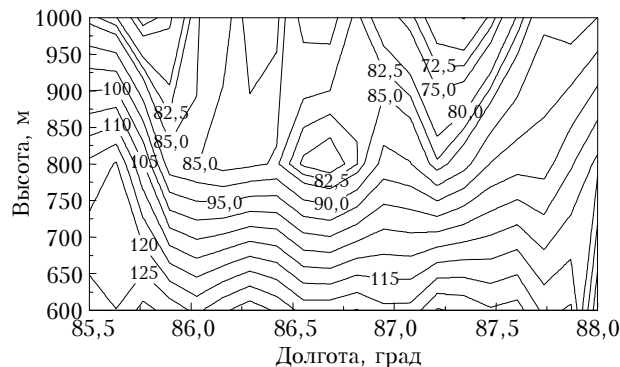


Рис. 9. Распределение на подветренной стороне счетной концентрации аккумуляционной моды аэрозоля, см⁻³

Из рис. 7 видно, что концентрация сернистого ангидрида заметно увеличилась в верхней части разреза, т.е. над устойчивым слоем. Наиболее вероятно, что это произошло за счет рассеивания примесей на границе вовлечения в городскую ко-

лонку. Если фоновые значения при входе в город составляли 30–40 мкг/м³, то здесь они увеличились до 160 мкг/м³.

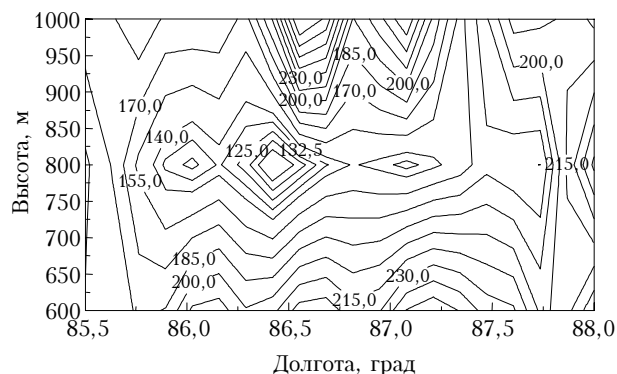


Рис. 10. Распределение на подветренной стороне счетной концентрации нуклеационной моды аэрозоля, см⁻³

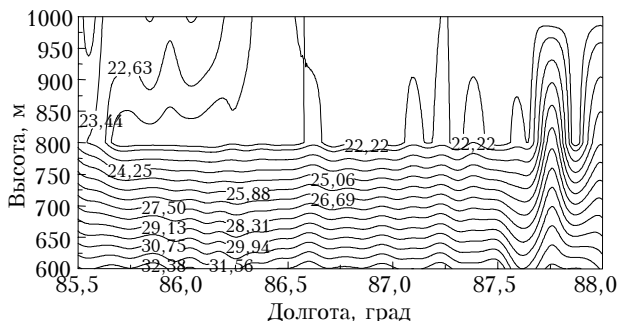


Рис. 11. Распределение на подветренной стороне концентрации озона, мкг/м³

Субмикронная фракция ($d=0,4-2,0$ мкм) в нижней части разреза сохранила почти фоновые значения (см. рис. 8). В верхней части можно выделить две зоны повышенных концентраций. Но по величине своих значений они не соответствуют шлейфовым. Скорее всего, это рассеянные частицы от городской колонки.

Сопоставляя рис. 7 и 8, видим еще одну характерную особенность: зоны повышенных концентраций сернистого ангидрида и аэрозоля не совпадают, что впервые встречается в нашей практике. По-видимому, источники этих ингредиентов различны.

Кардинально меняется поведение микродисперсной фракции на подветренной стороне. Ее генерация наблюдается и в верхней и нижней частях разреза, в то время как с наветренной стороны она в основном образовывалась в подынверсионном слое.

При рассмотрении аккумуляционной моды (см. рис. 9) видно, что она почти не изменилась в нижней части разреза и стала появляться в верхней. Концентрация ее по-прежнему недостаточна для интенсивных коагуляционных процессов.

Нуклеационная мода (см. рис. 10) стала появляться во всем зондируемом диапазоне высот, еще раз подтверждая гипотезу о возможности фотохимических процессов в атмосфере Норильска. В пользу этой гипотезы говорит и сравнение концентраций на рис. 9 и 10. Поскольку значения аккумуляционной моды значительно меньше значений

нуклеационной, то можно полагать, что частицы в нуклеационной моде «свежие», образовавшиеся менее 1 ч назад [5, 6].

Несколько увеличилась концентрация озона в нижней части разреза и уменьшилась в верхней (см. рис. 11). Это может отражать наличие двух противоположных процессов в атмосфере Норильска. Суть первого заключается в том, что, являясь индикатором фотохимических процессов, увеличение концентрации озона внизу говорит об их наличии [7]. Второй процесс состоит в том, что, будучи активным окислителем, озон начинает взаимодействовать с аэрозолем, концентрация которого выше в верхней части разреза, где и происходит его деструкция [8, 9].

Кроме газовых компонентов и дисперсного состава аэрозоля, на каждой высоте отбирались пробы для анализа химического состава аэрозоля. Сам анализ проводился в аттестованной Госстандартом аналитической лаборатории Томского государственного университета. На рис. 12 представлен средний относительный состав аэрозоля ($d \geq 0,1$ мкм) на наветренной и подветренной сторонах Норильска.

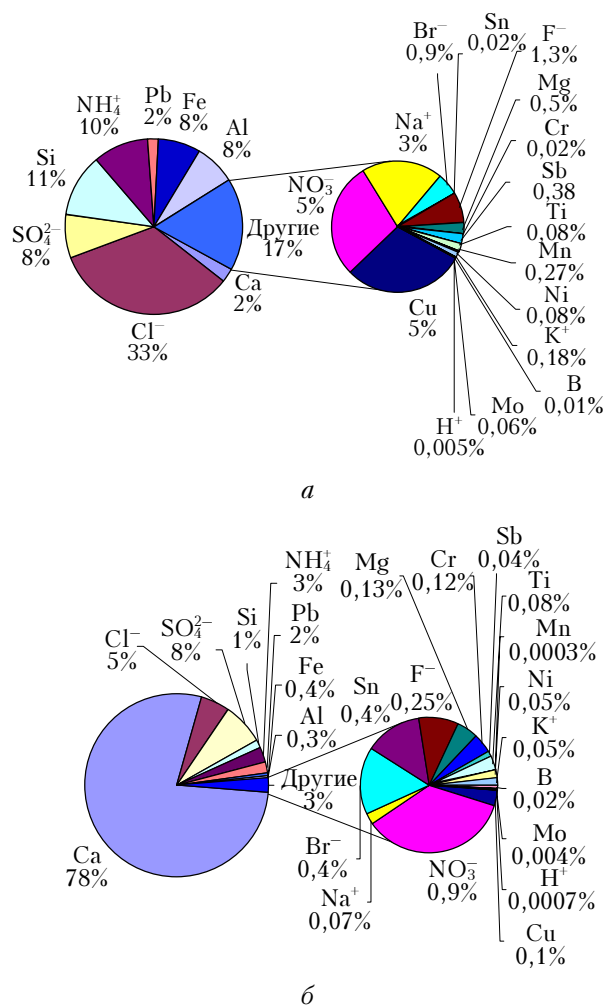


Рис. 12. Относительный ионно-элементный состав атмосферного аэрозоля на наветренной (а) и подветренной (б) сторонах, мас. %

Данные для каждого графика получены комбинацией аппаратного и арифметического осреднений. Аппаратное осреднение выполнялось при отборе пробы вдоль всего маршрута на каждой высоте, арифметическое — путем нахождения среднего по всем высотам.

Из рис. 12,а следует, что в город поступал аэрозоль, имеющий химический состав, характерный для фоновых условий [10].

На выходе из города (рис. 12,б) картина значительно изменялась. В составе аэрозоля доминирующим элементом становится кальций, вклад которого превышает 75%. Следует отметить, что за 20-летний период исследования атмосферного аэрозоля нами подобных ситуаций не зафиксировано ни в фоновых [11], ни в городских [12–14] условиях, хотя в [14] мы отмечали, что в каждом регионе доминирует какой-то один элемент. Возможно, уголь, используемый в Норильске, обогащен известняком, что при сгорании и дает такое высокое содержание кальция в аэрозоле. На входе, как следует из рис. 12,а, содержание кальция не превышало нескольких процентов.

В [15] сообщалось о высоких концентрациях оксида азота в атмосфере Норильска. Нами в эксперименте они зафиксированы не были. Судя по рис. 12, нитрат-анион также присутствует в аэрозоле в фоновых количествах.

По данным измерений на вертикальных плоскостях наветренной и подветренной сторон Норильска составлена табл. 1, в которой представлены средние концентрации и их разности.

Перенос рассчитан исходя из скорости движения воздушной массы, определенной по карте АТ-850, а не ветра. Перенос за год — величина условная, так как опирается только на данные, полученные в ходе одного полета. Она приводится для оценки масштаба явления. Значения разности концентраций, отмеченные знаком «—», соответствуют осаждению перечисленных компонентов на территории города. Положительные разности указывают на вынос этих компонентов за пределы города.

Из табл. 1 видно, что в период измерений из города в основном выносились кальций и сернистый ангидрид, 42,5 и 51,4 кг·с⁻¹ соответственно.

Видно также, что на территорию поступали алюминий, железо, кремний и аммоний, концентрация которых была с наветренной стороны выше, чем с подветренной. Обычно эти элементы входят в состав грубодисперсных частиц [16, 17], которые имеют высокую скорость седиментации. Поэтому они вполне могли осесть на поверхность земли.

Из табл. 1 также следует, что соотношение переносимой массы иона SO₄²⁻ и газообразного SO₂ равно примерно 1:16. По-видимому, выбрасываемый предприятиями SO₂ не успевает конденсироваться или вступать в реакции непосредственно в атмосфере города и выносится в окружающую среду в первоначальном, т.е. газообразном, виде.

Условная оценка годового переноса по всем измеренным параметрам дает для Норильска величину

Таблица 1

Концентрация загрязняющих веществ с наветренной и подветренной сторон Норильска и их перенос через вертикальные плоскости

Химический компонент	Концентрация			Перенос, г·с ⁻¹	Перенос, т/год
	Наветренная сторона	Подветренная сторона	Разность		
	нг/м ³				
Mo	6,9	7,6	0,7	0,84	26
B	1,3	10,3	9,1	10,90	344
K ⁺	20,3	21,0	0,7	0,90	28
Ni	8,8	23,3	14,5	1750	552
Mn	30,2	32,1	1,9	2,34	74
Ti	8,8	37,3	28,5	34,30	1082
Sb	42,5	46,7	4,2	5,04	159
Cr	2,4	55,6	53,2	63,91	2015
Mg	52,1	56,9	4,8	5,83	184
Sn	2,0	160,0	158,0	189,60	5979
Br ⁻	97,5	191,7	94,2	113	3564
	мкг/м ³				
F ⁻	0,143	0,165	0,022	26,1	823
Na ⁺	0,381	0,389	0,008	9,3	293
NO ₃ ⁻	0,553	0,567	0,015	17,4	549
Cu	0,558	0,560	0,003	3,0	95
Al	0,868	0,156	-0,711	-639,9	-20180
Fe	0,878	0,175	-0,703	-632,7	-19953
Pb	0,234	0,938	0,704	844,4	26629
NH ₄ ⁺	1,185	1,159	-0,026	-23,4	-738
Si	1,293	0,515	-0,778	-700,2	-22082
SO ₄ ²⁻	0,910	3,520	2,610	3132,0	98771
Cl ⁻	3,763	4,150	0,388	465,0	14664
Ca	0,273	35,653	35,381	42457,0	1338924
Аэрозоль			39,404	47398,4	1494754
SO ₂ , мкг/м ³	38,4	81,2	42,80	51360	1619689
				<i>Итого</i>	3114443

более 3 млн т. При этом следует подчеркнуть, что в вертикальных разрезах отсутствует городской шлейф.

В день проведения такого же эксперимента в летний период ветер имел северо-восточное направление и изменял свою скорость от 3–4 м/с в нижних слоях до 5–7 м/с на вышележащих уровнях. Поэтому вертикальные плоскости для зондирования строились с северо-восточной стороны (наветренная сторона) и юго-западной (подветренная).

Из рис. 13 видно, что в город поступал воздух с концентрацией SO₂ 70–80 мкг/м³. Распределение примеси по плоскости разреза достаточно однородно с некоторым повышением в верхней части разреза. Такая фоновая концентрация несколько выше зафиксированной в зимний период. Анализ обратных траекторий показал, что воздушная масса поступила с Ледовитого океана. В подобном случае источником повышенного содержания диоксида серы может стать выделяемый морской водой диметилсульфид, который затем в атмосфере переходит в диоксид серы, как показано в [18]. Именно таким механизмом авторы [19, 20] объясняют повышенный фон SO₂ над Тихим океаном, обнаруженный в ходе самолетных экспериментов.

В пользу такого механизма говорят и данные о распределении микродисперсной фракции аэрозоля, приведенные на рис. 14.

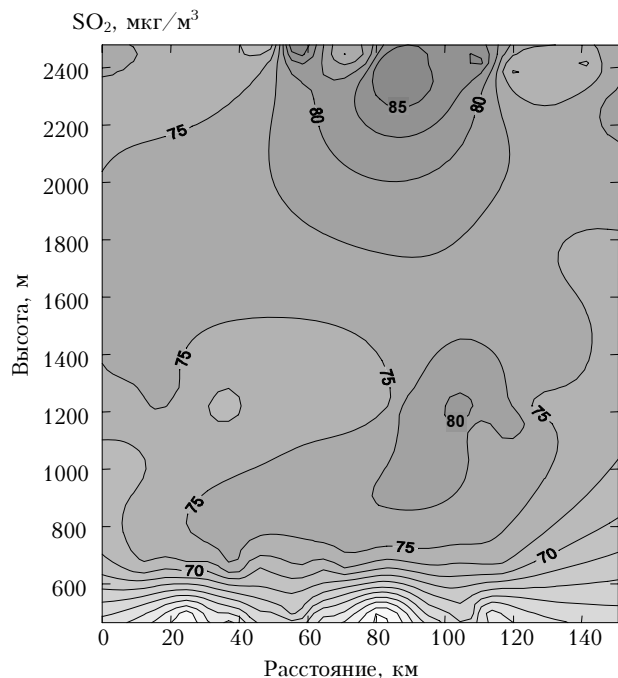


Рис. 13. Распределение сернистого ангидрида с наветренной стороны Норильска в летний период

В зимний период ее генерация на фоновой стороне происходила только в пограничном слое. Вы-

ше погранслоя содержание наночастиц уменьшалось почти до нуля. В летний период концентрация микродисперсной фракции росла с высотой.

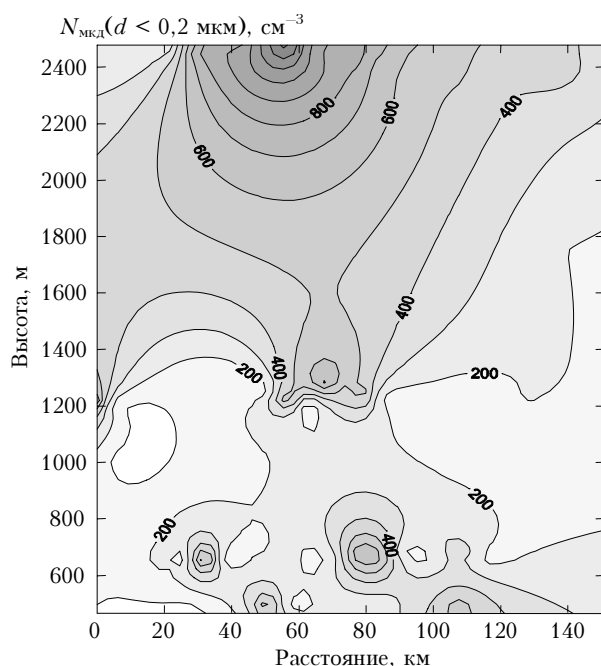


Рис. 14. Распределение микродисперсной фракции аэрозоля с наветренной стороны Норильска в летний период

Американские ученые, исследовавшие образование микродисперсной фракции в атмосфере над океанами, обнаружили [21–23], что она образуется из SO_2 и ее концентрация в свободной атмосфере может превышать содержание таких частиц в пограничном слое. Очевидно, подобную картину мы наблюдаем на рис. 14.

В отличие от концентраций диоксида серы и микродисперсной фракции аэрозоля фоновые концентрации озона оказались почти идентичными зимним измерениям. Поэтому вертикальные разрезы приводить не будем.

Перейдем к рассмотрению вертикального разреза, проходящего через городскую атмосферу.

Поскольку этот разрез проходил над сопкой, то нижняя высота, на которой производилось зондирование, равнялась 1200 м. Чтобы захват территории был больше, маршрут удлинялся, и выполнялось несколько проходов на высотах до 4 км с шагом 500 м.

Из рис. 15 видно, что в основном ядре распространяющейся городской колонки концентрация сернистого ангидрида достигает 500 мкг/м^3 . На высоте 2500 м обнаруживается вторичное ядро с концентрацией 100 мкг/м^3 . По-видимому, какая-то часть шлейфа, будучи перегретой, преодолевает слой устойчивой стратификации. Если ширину городской колонки определять по изолинии 50 мкг/м^3 , то она окажется более 175 км. То есть масштабы горизонтальной диффузии значительно больше вертикальной. Концентрация фоновое SO_2 (за пределами городской колонки) существенно падает по сравне-

нию с ее значением на наветренной стороне. Возможно, появление дополнительных ядер конденсации в атмосфере города ускорило процессы конденсации оксида серы и переход газа в аэрозоль.

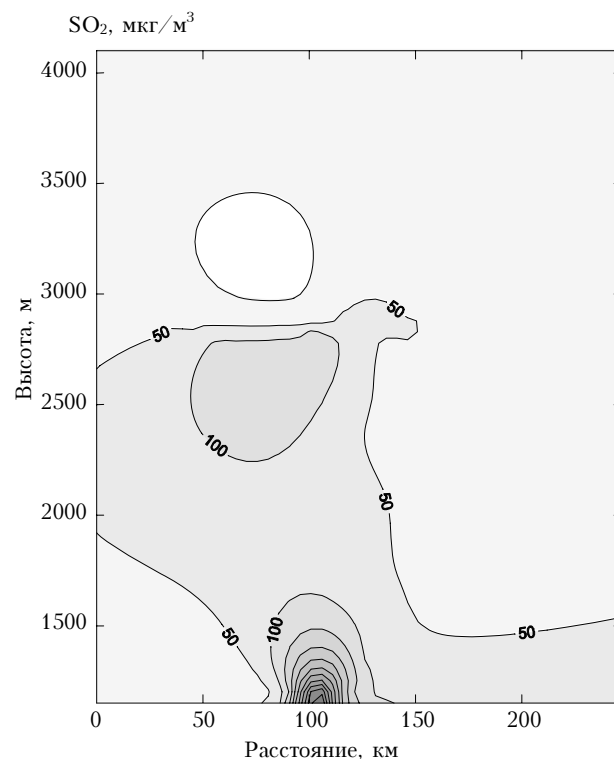


Рис. 15. Распределение диоксида серы с подветренной стороны Норильска в летний период

В пользу такого предположения говорят данные рис. 16, на котором показано распределение микродисперсной фракции аэрозоля. На вертикальном разрезе видны два ядра с повышенным содержанием наночастиц. Вверху, на высоте 4500 м, их счетная концентрация достигает 10000 см^{-3} , и можно полагать, что в эту область собрались частицы, образовавшиеся из фоновое SO_2 . Внизу, вблизи 1200 м, проходит городская колонка, в которой интенсивно идут нуклеационные процессы. Концентрация микродисперсных частиц в колонке достигает 40000 см^{-3} .

Такое высокое содержание частиц в единице объема должно приводить к интенсивным коагуляционным процессам и ускорять рост частиц до субмикронной фракции [24]. Следовательно, это будет проявляться в распределении субмикронной фракции.

Из рис. 17 видно, что субмикронная фракция аэрозоля, в отличие от его микродисперсной фракции и диоксида серы, на вертикальном разрезе занимает места, свободные от упомянутых компонентов. Такое поведение субмикронной фракции говорит о том, что она формируется на периферии зон повышенного содержания озона и микродисперсной фракции. В шлейфе, возможно, она быстро превышает 1-мкм размер и оседает на поверхность земли.

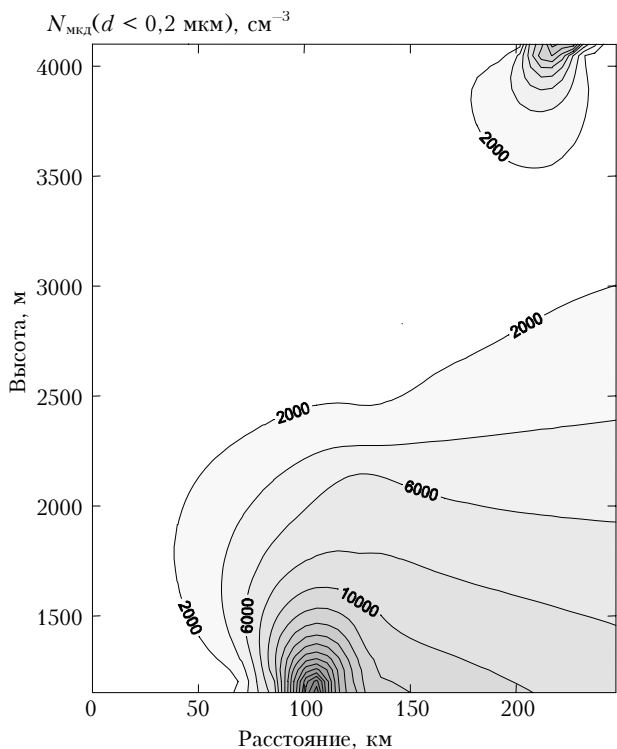


Рис. 16. Распределение микродисперсной фракции аэрозоля с подветренной стороны Норильска в летний период

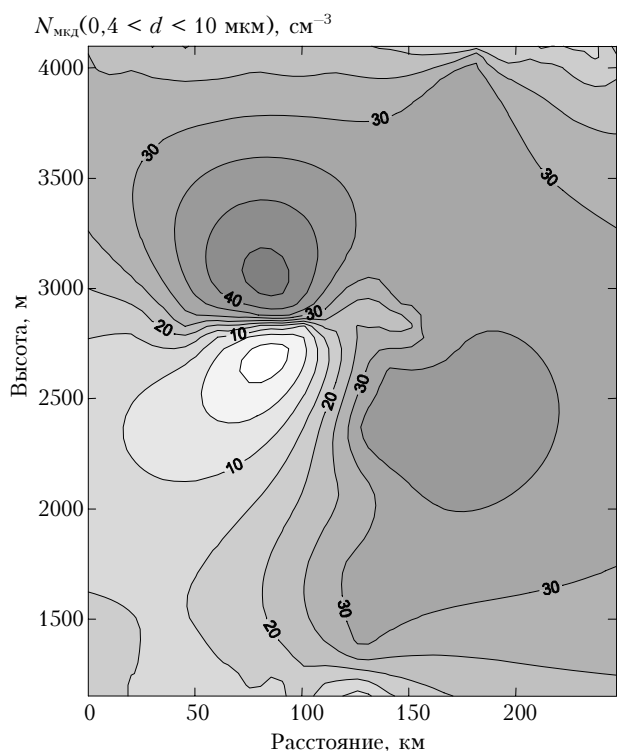


Рис. 17. Распределение субмикронной фракции аэрозоля с подветренной стороны Норильска в летний период

Озон, являясь одной из самых активных примесей, ведет себя подобно субмикронной фракции аэрозоля. Он закономерно убывает внутри шлейфов там, где высокая концентрация частиц, и гене-

рируется на их периферии [8]. Вместе с тем измерения показали, что концентрация озона на подветренной стороне увеличилась почти в два раза по сравнению с его концентрацией на наветренной стороне. Следовательно, в шлейфах выбросов содержится значительное количество озonoобразующих соединений [26, 27].

Подводя промежуточный итог, отметим, что выбросы промпредприятий Норильска имеют не только значительные величины, но и качественно модифицируют процессы, происходящие в атмосфере.

Проанализируем состав аэрозоля, который поступает в атмосферу Норильска и выбрасывается предприятиями города в летний период.

Если сопоставлять химический состав аэрозоля на наветренной и подветренной сторонах города (рис. 18), то особенно больших различий не увидим. Как и в зимний период, увеличивается содержание в аэрозоле кальция. Входящий аэрозоль близок по составу к морскому [10].

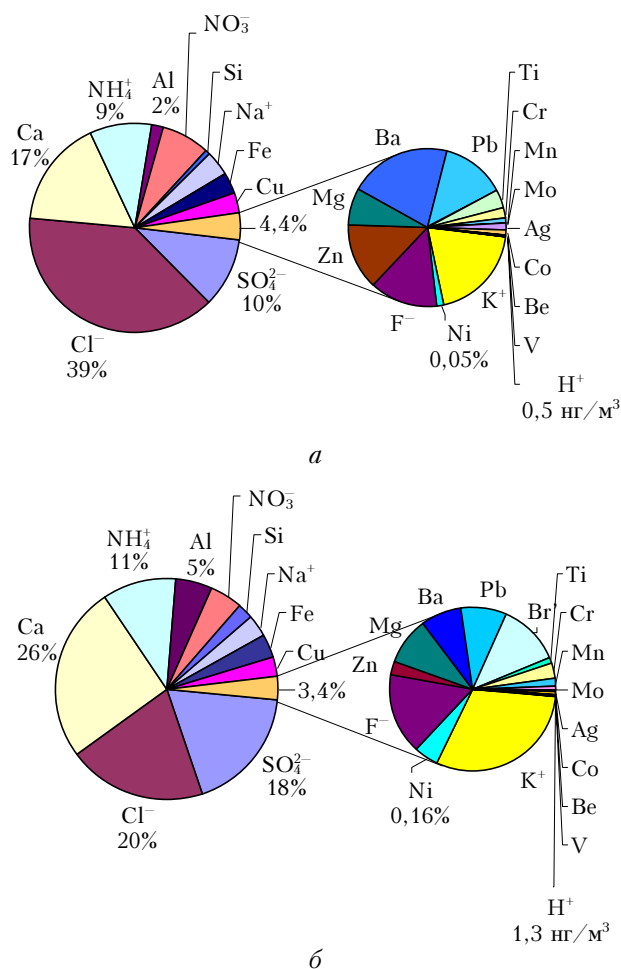


Рис. 18. Состав аэрозоля в Норильске в летний период: а – наветренная сторона, б – подветренная

Сопоставление химического состава выходящего аэрозоля для летнего и зимнего периодов показывает существенное изменение ситуации (рис. 19),

которое сложно объяснить действием лишь сезонного фактора. Возможной дополнительной причиной может быть изменение технологий на предприятиях Норильска. По крайней мере, авторам известно о проведении реконструкции на медном заводе комбината летом 2004 г.

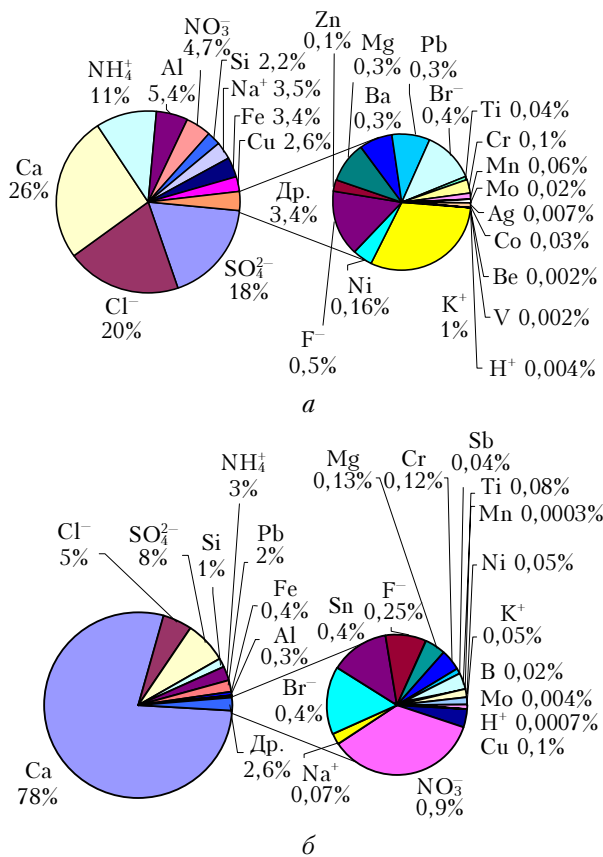


Рис. 19. Состав аэрозоля с подветренной стороны Норильска: а – летний период, б – зимний период

Для выявления в составе аэрозоля изменений неприродного характера часто используется метод оценки обогащения компонентов по отношению к опорному компоненту (который в аэрозоле сохраняет преимущественно природное происхождение) в сравнении с тем же соотношением для земной коры или солевого остатка морской воды [28–30]. Однако выбрать такой опорный компонент, который был бы универсален для обоих сезонов и всех компонентов и не искажал бы реальную оценку их происхождения, в нашем случае весьма затруднительно, поэтому остановимся в данном случае на упрощенной оценке обогащения по соотношению компонентов в аэрозолях на подветренной и наветренной сторонах в дни работы по «квадрату» в каждом сезоне (8 ноября 2002 г. и 10 августа 2004 г.).

Из рис. 20 следует, что в зимний период, когда подстилающая поверхность на значительных расстояниях от города покрыта снегом, имеется разбавление терригенных элементов Si, Al, Fe. Значительно обогащены в холодный период Ca, Cr, Sn, Ba и Ti. Сумма всех соединений (Sum), сумма элементов (Els) и сульфат-ион (Ions) не изменяют фактор обогащения от сезона к сезону. В летний период обогащаются все терригенные элементы и ионы, а также ионы и элементы, входящие в состав морской воды. И пока не понятно, почему подвергаются разбавлению в летний период ион фтора и титан. Таким образом, в летний период заметный вклад в состав аэрозоля вносит подстилающая поверхность.

Для летнего периода средние концентрации на вертикальных плоскостях наветренной и подветренной сторон Норильска, их разности и расчет переноса представлены в табл. 2, из которой видно, что в период измерений из города в основном выносились кальций, хлор, сульфаты и сернистый ангидрид. Заметным стало поступление алюминия, меди, железа, натрия, аммиака, нитратов, кремния.

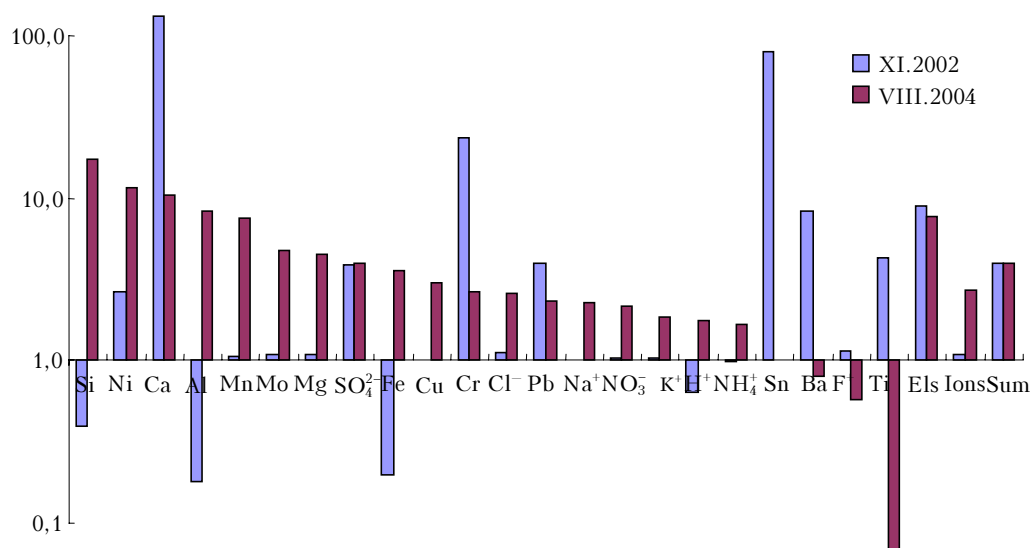


Рис. 20. Обогащение ионов, элементов и их сумм (Ions, Els, Sum) в атмосфере Норильска

4. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. М.: АН СССР, 1955. 351 с.
5. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д. Суточный ход микродисперсной фракции аэрозоля // Оптика атмосфер. и океана. 2000. Т. 13. № 11. С. 983–990.
6. Lee S.D., Schneider T., Grant L.D., Verkerk P.J. Aerosols: Research, Risk Assessment and Control Strategies. Michigan: Lewis Publishers, Inc., 1986. 1221 p.
7. Перов С.П., Хргиан А.Х. Современные проблемы атмосферного озона. Л.: Гидрометеоздат, 1980. 288 с.
8. Панченко М.В., Терпугова С.А., Белан Б.Д., Толмачев Г.Н. Оценка стока озона на аэрозольные частицы // Оптика атмосфер. и океана. 1992. Т. 5 № 6. С. 647–651.
9. Белан Б.Д., Микушев М.К., Панченко М.В., Покровский Е.В., Семьянова О.И., Толмачев Г.Н., Щербатов А.И. Особенности прохождения фотохимических процессов в воздухе промышленных центров // Оптика атмосфер. 1991. Т. 4 № 9. С. 995–1005.
10. Ивлев Л.С. Химический состав и структура атмосферных аэрозолей. Л.: ЛГУ, 1982. 368 с.
11. Белан Б.Д., Зуев В.Е., Панченко М.В. Основные результаты самолетного зондирования аэрозоля в ИОА СО РАН (1981–1991 гг.) // Оптика атмосфер. и океана. 1995. Т. 8. № 1–2. С. 131–156.
12. Белан Б.Д., Симоненков Д.В., Толмачев Г.Н. Химический состав аэрозоля в выбросах предприятий некоторых регионов // Оптика атмосфер. и океана. 1996. Т. 9. № 4. С. 453–459.
13. Белан Б.Д. К вопросу о формировании «шапки» загрязнений над промышленными центрами // Оптика атмосфер. и океана. 1996. Т. 9. № 4. С. 460–463.
14. Белан Б.Д., Ковалевский В.К., Симоненков Д.В., Толмачев Г.Н., Рассказчикова Т.М. Структура аэрозольных «шапок» над промышленными центрами // Оптика атмосфер. и океана. 1996. Т. 9. № 6. С. 755–765.
15. Безуглая Э.Ю., Расторгуева Г.П., Смирнова И.В. Чем дышит промышленный город. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 256 с.
16. Milford J.B., Davidson C.I. The sizes of particulate trace elements in the atmosphere – a review // J. Air Pollut. Contr. Assoc. 1985. V. 35. N 12. P. 1249–1260.
17. Hoff R.M., Leitch W.R., Fellin P., Barrie L.A. Mass-size distributions of chemical constituents of the winter Arctic aerosol // J. Geophys. Res. 1983. V. 88. N 8. P. 10947–10956.
18. Bardouki H., Berresheim H., Vrekoussis M., Sciare J., Kouvarakis G., Oikonomou K., Schneider J., Mihailopoulos N. Gaseous (DMS, MSA, SO₂, H₂SO₄ and DMSO) and particulate (sulfate and methanesulfonate) sulfur species over the northeastern coast of Crete // Atmos. Chem. Phys. 2003. V. 3. N 4. P. 3869–3906.
19. Tu F.H., Thornton D.C., Bandy A.R., Kim M.-S., Carmichael G., Tang Y., Thornhill L., Sachse G. Dynamics and transport of sulfur dioxide over the Yellow Sea during TRACE-P // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 106. N 20. D003227.
20. Tu F.H., Thornton D.C., Bandy A.R., Carmichael G.R., Tang Y., Thornhill K.L., Sachse G.W., Blake D.R. Long-range transport of sulfur dioxide in the central Pacific // J. Geophys. Res. D. 2004. V. 109. N 15. D004309.
21. Clarke A.D., Li Z., Litchy M. Aerosol dynamics in the equatorial Pacific Marine Boundary layer: Microphysics, diurnal cycles and entrainment // Geophys. Res. Lett. 1996. V. 23. N 7. P. 733–736.
22. Clarke A.D., Eisele F.L., Kapustin V.N., Moore K., Tanner D., Mauldin L., Litchy M., Lienert B., Carroll M.A., Albercook G. Nucleation in the equatorial free troposphere: Favorable environments during PEM-Tropics // J. Geophys. Res. D. 1999. V. 104. N 5. P. 5735–5744.
23. Clarke A.D., Varner J.L., Eisele F.L., Mauldin R.L., Tanner D., and Litchy M. Particle production in the remote marine atmosphere: Cloud outflow and subsidence during ACE1 // J. Geophys. Res. D. 1998. V. 103. N 13. P. 16397–16409.
24. Seinfeld J.H., Pandis S.N. Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. New York: Wiley & Sons., 1998. 1326 p.
25. Савченко В.А., Новицкий М.А. Современный климат Норильска. М.: ИПФ «Гарт», 2003. 168 с.
26. Crutzen P.J. Global Changes in Tropospheric Chemistry // Proc. of Summer School on Remote Sensing and the Earth's Environment, Alpbach, Austria, 26 July – 4 August 1989. 1990. P. 105–113.
27. Enhalt D.H. On the photochemical oxidation of natural trace gases and man made pollutants in the troposphere // Sci. Total Environ. 1994. V. 143. N 1. P. 1–15.
28. Ковальский В.В., Андрианова Г.А. Микроэлементы в почвах СССР. М.: Наука, 1970. 280 с.
29. Добровольский В.В. География микроэлементов: Глобальное рассеяние. М.: Мысль, 1983. 272 с.
30. Перельман А.Я. Геохимия. М.: Высш. шк., 1989. 528 с.

M.Vu. Arshinov, B.D. Belan, D.K. Davydov, G.A. Ivlev, D.A. Pestunov, T.M. Rasskazchikova, D.V. Simonenkov, G.N. Tolmachev, A.V. Fofonov. **Complex estimate of the air basin state in the Norilsk industrial region. Part 2. Balance of contaminants.**

Composition of gas and aerosol components entering and leaving the air basin of the Norilsk industrial region in cold and warm seasons has been analyzed. Main components replenishing the urban column are revealed. Scattering properties of the atmosphere are estimated. Strong seasonal variability of the air composition is recorded.