

АТМОСФЕРНАЯ РАДИАЦИЯ, ОПТИЧЕСКАЯ ПОГОДА И КЛИМАТ

УДК 551.510.42

Б.Д. Белан, Г.О. Задде, Г.А. Ивлев, О.А. Краснов, В.А. Пирогов,
Д.В. Симоненков, Г.Н. Толмачев, А.В. Фофонов

Комплексная оценка состояния воздушного бассейна
Норильского промышленного района.

Ч. 5. Примеси в приземном слое воздуха.

Соответствие состава воздуха гигиеническим нормативам.
Рекомендации

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 23.01.2006 г.

Статья завершает цикл статей «Комплексная оценка состояния воздушного бассейна Норильского промышленного района». В ней рассмотрены результаты, полученные в ходе наземных измерений с помощью мобильного и стационарного комплексов, аналогичных установленному на самолете-лаборатории. Проведен анализ взаимосвязи между различными соединениями, обнаруженными в воздухе Норильска, и составлены кластеры их взаимосвязи. Выполнено сопоставление зафиксированных концентраций с гигиеническими нормативами. Выработаны рекомендации по улучшению качества воздуха в городе.

Введение

Помимо летного эксперимента в ходе обеих кампаний (2002 и 2004 гг.) проводились измерения и в приземном слое атмосферы г. Норильска. Они осуществлялись с помощью комплексов приборов, аналогичных установленному на самолете-лаборатории Ан-30 «Оптик-Э». Один комплекс был установлен

на автомобиле и перемещался по городу или выполнял подшлейфовые измерения, второй был стационарным (круглосуточным) и размещался на 5-м этаже гостиницы «Норильск».

В районе Большого Норильска, где проводились измерения (рис. 1), расположены три промышленных предприятия, дающих основной вклад в загрязнение атмосферы региона. В ходе наземных работ



Рис. 1. Карта района с отметками мест проведения измерений в 2004 г.: О — основной стационар в гостинице; выездные пункты: 1, 4, 8; Т — наветренные или фоновые точки; Н, М, НН — под трубами заводов (комбинат «Надежда», медный завод, никелевый завод); 2, 3, 5, 6, 7, 9 — подветренные (подшлейфовые) точки

предполагалось провести измерения газового и аэрозольного составов приземного слоя воздуха в районе каждого из предприятий в нескольких точках: наветренной и подветренной в черте предприятия и в одной или нескольких точках на удалении 1–5 км. Несмотря на то что в период измерений отмечались низкая облачность, скрывающая от наблюдателя шлейфы выбросов предприятий, неустойчивое направление ветра и периодические осадки (из-за них не во всех точках отбирались для анализа фильтры), а также сложный ландшафт местности, со слабой разветвленностью подъездных путей, оснащение комплекса аппаратуры автономным источником электропитания позволило практически полностью выполнить намеченный план работ.

В настоящей статье рассмотрим данные, полученные в жилой зоне или фоновых районах.

Состав приземного воздуха в Норильске

Основные измерения были проведены на стационарном посту. В результате обработки массива получено 208 значимых измерений, представляющих собой осредненные за 1 ч данные (рис. 2).

Учитывая расположение гостиницы и небольшие размеры жилого сектора г. Норильска, можно считать, что стационарный пост является репрезентативной точкой для жилого сектора города. Графики суточного хода измеряемых параметров представлены на рис. 2.

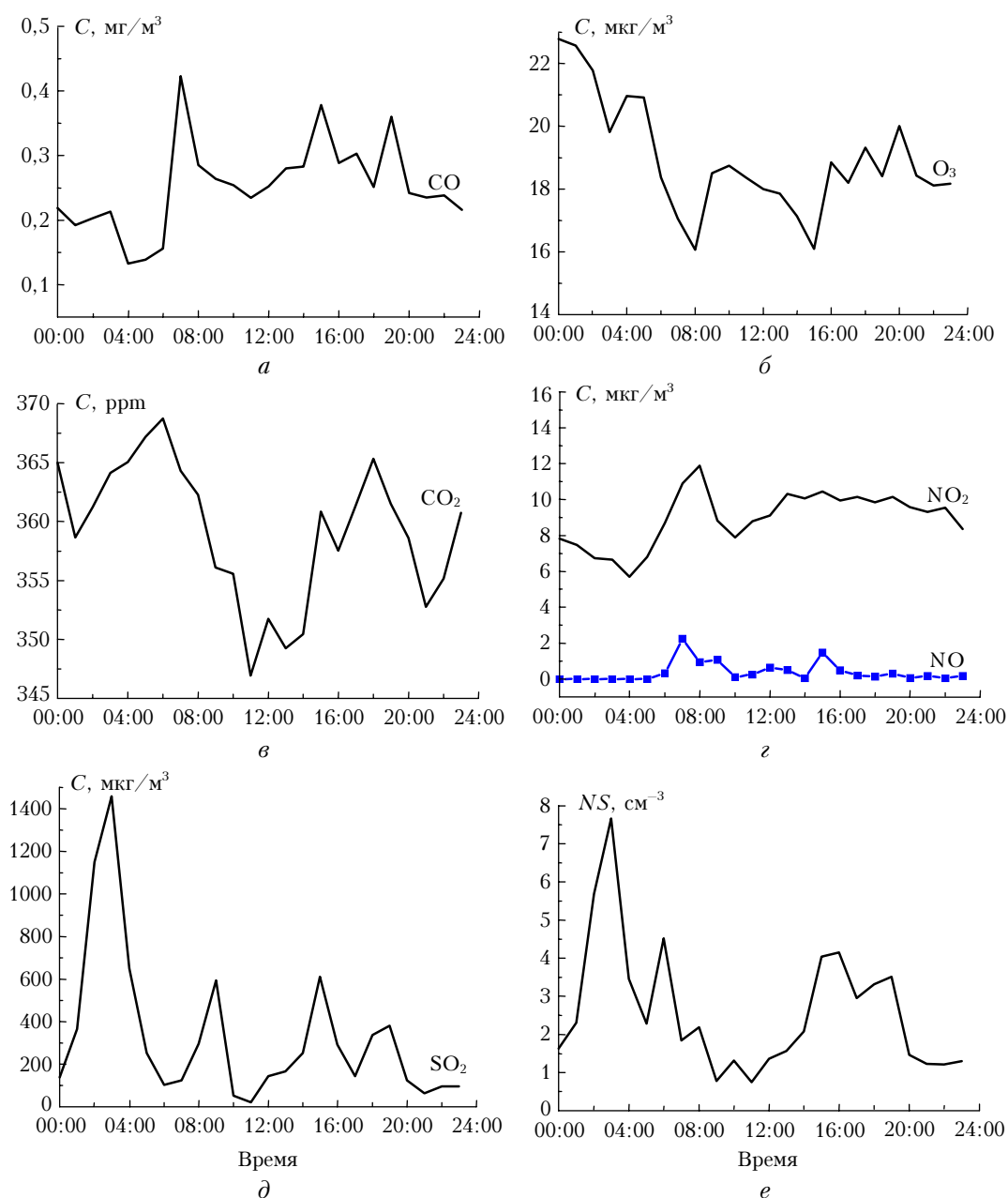


Рис. 2. Суточный ход параметров, измеряемых на стационарном посту: а–д – газы; е – счетная концентрация аэрозоля

Из рис. 2, *в*, *д*, *е* видно, что количество промышленных выбросов растет в вечерние и утренние часы. Возможно, это связано с технологическим режимом сброса загрязнений в атмосферу на предприятиях. Пики и общую приподнятость кривых для дневного времени на рис. 2, *а*, *г* можно связать с активностью автотранспорта. С повышением или понижением концентрации выбрасываемых примесей связаны спад и рост концентрации озона (рис. 2, *б*). В эти дни в районе Норильска отсутствовала приземная инверсия, атмосфера достаточно интенсивно очищалась и значения выбросов от автотранспорта в отличие от выбросов предприятиями SO_2 не пре-

вышали действующих на данный момент ПДК. Данная взаимосвязь обусловлена скорее всего плотностью городской застройки, приводящей к застаиванию атмосферного воздуха во дворах домов, что может рассматриваться как локальное явление.

На рис. 3 представлен временной ход параметров, измеряемых приборами, размещенными в гостинице «Норильск».

Визуально просматривается спад NO_x 7–8 августа (выходные дни), последующий его рост обусловлен не только началом трудовой недели, но и изменением направления основного переноса с северного на западное, что привело к значительному влиянию

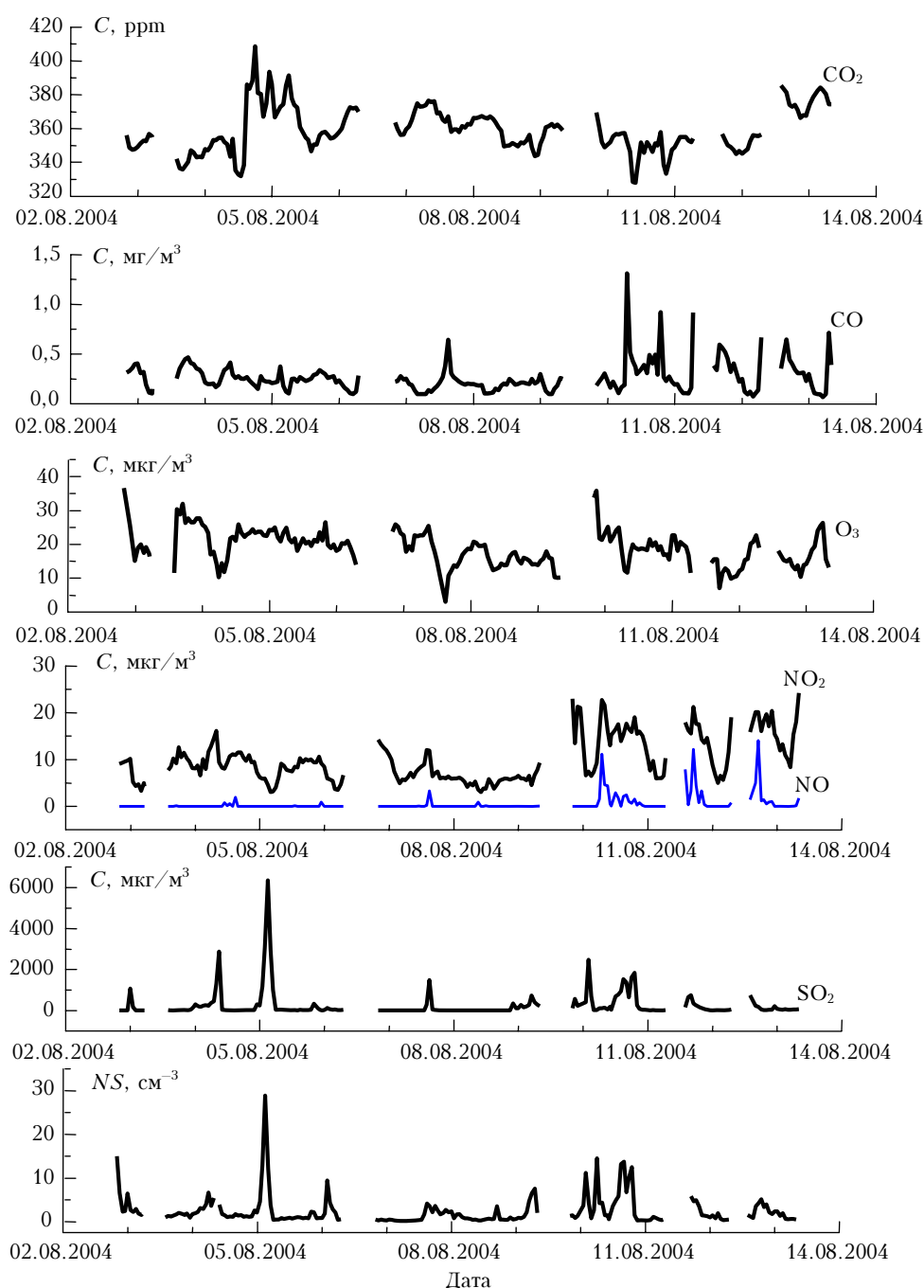


Рис. 3. Временной ход параметров, измеряемых на стационарном посту

автомобильных выбросов на загрязненность воздуха в этом участке города. Все это еще раз показывает локальность подобных загрязнений в пределах городской черты.

Рассматривая данные по химическому составу аэрозоля, для зимнего и летнего периодов в районе г. Норильска можно отметить значительные отличия по отдельным группам элементов и их процентному содержанию, однако можно выделить и группу элементов, наличие и содержание которых не сильно меняются при изменении сезона.

Из табл. 1 видно, что во всех пробах 2002 г. отмечается значительное содержание таких элементов, как Ca, Fe и Si, Na⁺ (за исключением фоновых проб). В точках измерений, подверженных воздействию оседания химических элементов из шлейфов предприятий, отмечаются дополнительно Al, SO₄²⁻, Cl⁻, NO₃⁻, K⁺.

Таблица 1

Химический состав аэрозоля (мкг/м³) в приземном слое в ноябре 2002 г.

Химический компонент	Место отбора пробы					
	ЦАТК*, фон	Дорога на горотвал, фон	Узел связи ж.д., шлейф	Диспетчерская **ЦЗ/часть шлейфа НН***	ЦАТК, фон	ЦАТК, шлейф
Ca	61,010	12,960	70,645	73,232	19,163	65,061
Fe	24,510	17,539	13,798	19,290	2,947	69,214
Al	0,900	1,744	7,200	2,010	3,998	69,214
Mg	0,000	0,000	0,230	0,176	0,254	69,214
SO ₄ ²⁻	0,660	0,443	38,670	3,179	10,028	46,603
Cl ⁻	0,940	0,273	6,894	20,616	1,554	47,985
Si	3,080	3,113	13,332	7,744	0,659	18,508
NO ₃ ⁻	0,180	0,420	0,582	1,365	1,130	4,773
Na ⁺	0,050	0,092	1,207	0,481	0,743	2,292
K ⁺	0,020	0,031	0,483	0,330	0,065	1,046
Ni	0,110	0,075	0,206	0,136	0,138	0,015
Cu	0,000	0,000	0,011	0,000	0,550	0,031
Ti	0,030	0,000	0,000	0,070	0,004	0,055
Mn	0,020	0,002	0,018	0,006	0,025	0,054
Cr	0,040	0,039	0,047	0,034	0,000	0,010
Pb	0,000	0,000	0,000	0,000	0,058	0,001
B	0,000	0,000	0,032	0,023	0,000	0,011

* ЦАТК – центральная автотранспортная колонна; ** ЦЗ – цементный завод; *** НН – никелевый завод.

Во всех пробах 2004 г. (табл. 2) отмечаются преимущественно такие элементы, как Ni, Pb, Na⁺ (за исключением фоновых проб). В точках измерений, подверженных оседанию примесей из шлейфов от предприятий, зафиксированы дополнительно NO₃⁻, NH₄⁺, SO₄²⁻, Fe, Si, K⁺.

Из полученных данных видно, что Na⁺ в оба сезона имеет достаточно широкий ареал распространения в районе исследования, однако при значительном удалении от источников выбросов его концентрация уменьшается на порядки. Подобным образом ведут себя NO₃⁻, SO₄²⁻, K⁺, с той лишь разни-

цей, что они имеют значительно меньший сектор распространения и их высокие значения отмечаются только в районе влияния шлейфов предприятий.

Таблица 2

Химический состав аэрозоля (мкг/м³) в приземном слое в августе 2004 г.

Химический компонент	Место отбора проб							
	Шлейф от никелевого завода (НН)	Шлейф на г. Губчиха (9)	Медный завод, наветр. (4)	Медный завод, подветр. (5)	Пл. Металлургов (6)	Талнах, фон (7)	Норильск, фон (8)	
SO ₄ ²⁻	87,200	20,580	9,910	36,130	4,200	2,310	2,950	
Cl ⁻	2,450	5,420	3,480	3,250	2,280	1,220	1,240	
Ca	2,594	2,607	0,253	0,368	0,633	0,124	0,125	
NH ₄ ⁺	7,230	9,340	8,100	6,790	6,200	3,820	5,030	
Al	3,896	0,161	0,046	0,018	0,273	0,088		
NO ₃ ⁻	1,950	3,600	2,770	2,830	3,680	1,470	1,620	
Si	33,282	0,163			0,084	0,009		
Na ⁺	5,998	2,697	2,795	2,933	0,626	0,259	0,384	
Fe	1,611	0,579	0,275	0,231	0,628	0,128	0,287	
Cu	0,911	0,212	0,051	0,505	0,079	0,014	0,005	
K ⁺	9,203	0,624	0,737	0,922	0,455	0,231	0,373	
Ni	1,788	0,048	0,016	0,016	0,038	0,012	0,008	
F ⁻	0,150	0,199	0,149	0,105				
Zn	0,125	0,048	0,007	0,015	0,030	0,002		
Mg	0,256	0,042	0,002	0,004	0,006	0,000		
Ba	0,010	0,023	0,006	0,020	0,012		0,009	
Pb	1,433	0,003	0,006	0,007	0,004	0,004	0,008	
Ti	0,026	0,011	0,002	0,002	0,006	0,000		
Cr	0,023	0,029	0,020	0,015	0,030	0,018	0,017	
Mn	0,043	0,004	0,001	0,001	0,002	0,000	0,001	
Mo	0,003	0,023	0,012	0,007	0,001	0,100	0,007	
Ag	0,000	0,003	0,001	0,001	0,003	0,001	0,000	
Co	0,035	0,004	0,004	0,003	0,002		0,014	
H ⁺	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	

Примечание. В скобках указана нумерация пунктов измерений (см. рис. 1).

Прослеживается от зимы 2002 к лету 2004 г. изменение в поведении Fe и Si: они также перестали накапливаться в городской атмосфере и отмечаются лишь в районе промышленных выбросов.

Все вышесказанное, а также падение удельного содержания аэрозоля к лету 2004 г. говорят о том, что в летний сезон в районе г. Норильска была более чистая атмосфера. Сложно объяснить тот факт, что в 2004 г. отмечалось практически полное отсутствие Ca.

Относительный химический состав Талнаха и периферии Норильска в фоновых условиях почти совпадает (рис. 4) как по общей суммарной массовой концентрации неорганических компонентов (различие лежит в пределах погрешности методов количественного анализа), так и по основной неорганической матрице. Различия касаются лишь микроэлементного состава: несколько разнятся их номенклатура, а также содержание в аэрозоле, что, по всей видимости, связано с особенностями производств в указанных пунктах.

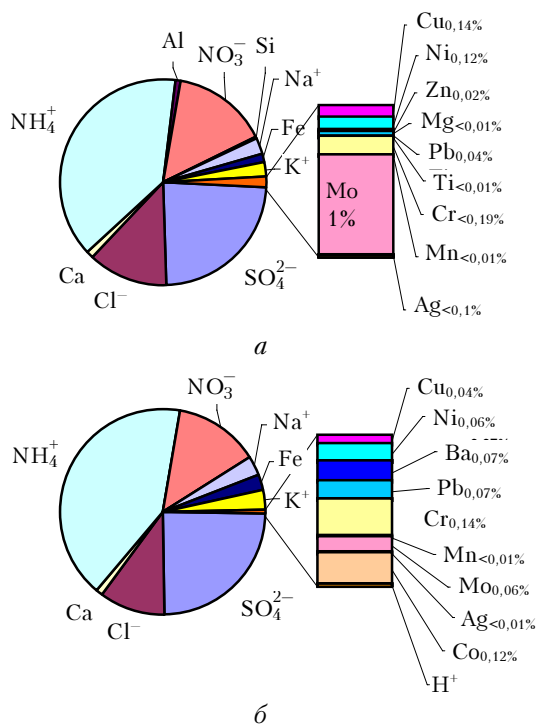


Рис. 4. Массовое распределение химических элементов и ионов в пробах фоновой аэрозоли: *a* – точка измерения в районе п. Талнах, содержание неорганической взвеси – 9,8 мкг/м³; *б* – точка измерения в пригороде г. Норильска, содержание неорганической взвеси – 12,1 мкг/м³

Соответствие состава воздуха гигиеническим нормативам

Среднесуточные и максимальные разовые значения газовых компонентов и соответствующие им гигиенические нормативы [1] собраны в табл. 3, из которой следует, что в рассматриваемый период превышения (до 20 раз) в основном наблюдались для диоксида серы, что и понятно при отсутствии ее утилизации в выбросах.

Таблица 3

Максимальные и среднесуточные значения измеряемых параметров в гостинице «Норильск»

Величина измерения	CO ₂ , мг/м ³	CO, мг/м ³	O ₃ , мкг/м ³	SO ₂ , мкг/м ³	NO ₂ , мкг/м ³	NO, мкг/м ³
Среднесуточные значения	408,5	1,3	36,6	635,7	24,3	14,1
Максимальные значения	457,0	6,6	127,0	>10000	47,0	112,0
ПДК _{с.с}		3	30	50	40	60
ПДК _{м.р}		5	160	500	85	400
Превышение ПДК _{с.с}		0,4	1,2	12,7	0,6	0,2
Превышение ПДК _{м.р}		1,3	0,8	20,0	0,6	0,3

Имелось небольшое превышение ПДК_{м.р} по оксиду углерода и ПДК_{с.с} по озону. Остальные ингредиенты в данный период были ниже ПДК.

Таким образом, на основании вышеприведенных результатов можно сделать следующее заключение. Качество воздуха в городе, при отсутствии шлейфов выбросов от предприятий, можно считать удовлетворительным. В отличие от многих городов, в Норильске заметно меньше нагрузка на атмосферу от выбросов автомобилей. Однако город и примыкающие к нему населенные пункты периодически оказываются под воздействием шлейфа от городских предприятий. С учетом особенностей аэрации региона это приводит к повышению концентрации примесей в городе и соседних населенных пунктах. Более того, данные подшлейфовых и самолетных измерений показывают, что и сам Норильск и окружающие его поселки в сложившейся ситуации оказываются в пределах первой зоны выпадения аэрозоля из шлейфов от предприятий. Следовательно, несмотря на то что восстановление очистных устройств для улучшения качества воздуха в городе для предприятий экономически нецелесообразно, иного пути нет.

Анализ поведения примесей в атмосфере района

Для более полного понимания взаимосвязей между измеряемыми параметрами в приземном слое атмосферы была исследована корреляционная связь восьми массивов данных: шести газов, счетной концентрации аэрозоля и времени суток (табл. 4).

Таблица 4

Коэффициенты корреляции между массивами данных

	Время	CO ₂	CO	O ₃	SO ₂	NO ₂	NO	NS
Время	1	-0,183	0,303	0,033	-0,096	0,384	0,114	-0,027
CO ₂		1	-0,234	0,056	0,041	-0,085	-0,009	0,004
CO			1	-0,204	0,190	0,609	0,540	0,248
O ₃				1	0,001	-0,113	-0,272	0,017
SO ₂					1	0,032	0,047	0,802
NO ₂						1	0,516	0,136
NO							1	0,163
NS								1

Для массивов данных, содержащих не менее 200 членов, значимыми являются коэффициенты корреляции, приведенные в табл. 5.

Таблица 5

Значимые коэффициенты корреляции для различных вероятностей ряда из 200 значений

q	0,95	0,975	0,995	0,9995
K	0,1161	0,1381	0,1809	0,2298

Из корреляционной матрицы видно, что имеют два связанных друг с другом группы массивов.

Во-первых, хорошо видна связь счетной концентрации аэрозоля и SO₂, а также их связь с CO. Этому есть простое объяснение: SO₂ является основным элементом, содержащимся в выбросах промышленных предприятий Норильского комбината. В свою очередь, при прохождении шлейфа в районе измерений резко возрастает счетная концентрация

аэрозоля. СО также образуется в процессе сгорания, и, учитывая близость к месту, где проводились измерения у медного и никелевого заводов, его присутствие в шлейфе неудивительно.

Во-вторых, хорошо видна связь NO₂, NO, СО с временным массивом. Достаточно четко прослеживается суточный ход для этих газов с максимумами днем и минимумами ночью. Можно с большой достоверностью предположить, что основным источником этих газовых составляющих являются выбросы от автотранспорта. Также из табл. 4 видно, что суточный ход отсутствует у O₃ и имеется отрицательная корреляция с СО и NO.

По массиву данных измерений концентраций ряда малых газовых составляющих, ионно-элемент-

ного и дисперсного составов аэрозоля, метеопараметров, полученных в период с 31.07 по 14.08.2004 г. с помощью как самолета-лаборатории Ан-30 «Оптик-Э», так и наземной мобильной станции в районе Большого Норильска и прилегающего региона в слое атмосферы от 0 до 5500 м построена корреляционная матрица (табл. 6). В матрицу вошло 50 параметров и до 48 не равных нулю интегральных измерений или групповых осреднений по каждому из параметров.

Корреляционный анализ взаимосвязи сернистого ангидрида, углекислого газа, озона, химических компонентов аэрозоля, их распределения по частицам разного размера и высотного хода позволил выявить следующие характерные группы газов, элементов и ионов в составе аэрозоля.

Таблица 6

	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Ca	NH ₄ ⁺	Al	NO ₃	Si	Na ⁺	Fe	Cu	K ⁺	Ni	
N _{>по} =	43	48	42	45	42	48	39	48	43	47	47	40	
SO ₄ ²⁻	1,0000	0,0168	-0,0411	0,5552	0,1137	0,2880	0,8262	0,8311	0,1245	0,0898	0,9310	0,7278	
Cl ⁻		1,0000	0,5261	-0,0885	0,3827	0,6362	-0,0169	0,3110	0,7368	0,6163	-0,0408	0,0208	
Ca			1,0000	-0,0972	0,3681	0,2762	0,0213	0,1462	0,5427	0,5809	-0,0328	0,0056	
NH ₄ ⁺				1,0000	-0,1614	0,4049	0,2493	0,6006	-0,1128	-0,2325	0,4429	0,2277	
Al					1,0000	0,1608	0,4078	0,1705	0,4024	0,6288	0,1652	0,1807	
NO ₃ ⁻						1,0000	0,0449	0,5172	0,4207	0,3802	0,1502	0,0865	
Si							1,0000	0,6340	0,2034	0,1720	0,9223	0,7753	
Na ⁺								1,0000	0,4251	0,2591	0,7485	0,5734	
Fe									1,0000	0,6595	0,0930	0,1381	
Cu										1,0000	0,0756	0,0993	
K ⁺											1,0000	0,8137	
	F ⁻	Zn	Mg	Ba	Pb	Br ⁻	Ti	Cr	Mn	Mo	Ag	Co	
N _{>по} =	22	39	41	42	33	9	40	35	35	30	32	34	
SO ₄ ²⁻	0,1746	-0,0625	0,2440	-0,1445	0,8539	-0,0133	-0,0680	0,0827	0,2638	-0,0435	-0,0626	0,2830	
Cl ⁻	0,4474	0,2267	0,5651	0,2608	0,0509	0,5576	0,2827	0,6921	0,5582	-0,0839	0,5008	-0,0505	
Ca	0,2333	-0,1733	0,4762	0,3308	0,1169	0,3123	0,3833	0,5625	0,5802	-0,0189	0,2360	0,0840	
NH ₄ ⁺	0,3467	-0,2305	-0,0526	-0,2496	0,2559	-0,0301	-0,2035	0,0591	-0,0993	0,1526	-0,1469	0,1856	
Al	0,1041	0,2173	0,3704	0,1968	0,3081	0,0310	0,5015	0,2409	0,7023	-0,0585	0,3033	-0,0430	
NO ₃ ⁻	0,2307	0,0503	0,2393	0,0962	0,1003	0,2755	-0,0424	0,5071	0,2240	0,1055	0,0865	-0,1027	
Si	0,0487	0,0242	0,3591	-0,1043	0,9372	-0,0406	0,1620	0,0443	0,4803	-0,0839	0,0282	0,3053	
Na ⁺	0,4792	-0,0391	0,4733	0,0983	0,6728	0,2257	0,0877	0,3774	0,3756	-0,0674	0,1329	0,1791	
Fe	0,4011	-0,0289	0,8504	0,3062	0,2308	0,4636	0,5823	0,8164	0,7554	-0,1838	0,4406	-0,0331	
Cu	0,2769	0,1212	0,4139	0,2639	0,2490	0,1199	0,4530	0,6003	0,6505	-0,0509	0,3000	-0,1406	
K ⁺	0,1256	-0,0287	0,2228	-0,1362	0,9367	-0,0466	-0,0111	0,0469	0,2645	-0,0393	-0,0877	0,3447	
Ni	0,0720	-0,0257	0,2253	-0,1194	0,7890	-0,0158	0,0188	0,0569	0,2688	-0,1125	-0,0631	0,2342	
F ⁻	1,0000	-0,0107	0,3680	0,1831	0,0582	0,4174	0,3144	0,3682	0,2292	-0,1391	0,5649	0,1608	
Zn		1,0000	0,0716	0,0790	-0,0169	0,0227	0,0003	-0,1908	0,0158	-0,0725	0,1215	-0,0370	
Mg			1,0000	0,3729	0,3751	0,4641	0,5286	0,5561	0,7565	-0,1934	0,4260	0,1728	
Ba				1,0000	-0,0517	0,0756	0,2650	0,2086	0,1770	-0,0678	0,1941	0,1816	
Pb					1,0000	-0,0156	0,0593	0,1388	0,4888	-0,0774	-0,0528	0,3032	
Br ⁻						1,0000	0,0772	0,4446	0,2425	-0,1605	0,3482	0,1532	
Ti							1,0000	0,4405	0,5227	-0,1130	0,3272	-0,0278	
Cr								1,0000	0,5784	-0,0614	0,1822	-0,1513	
Mn									1,0000	-0,1762	0,3596	-0,0346	
Mo										1,0000	-0,1078	0,1000	
Ag											1,0000	0,0199	
	Be	V	H ⁺	Sum	Ions	Els	C _v	H, м	t, °C	R, %	O ₃	SO ₂	aero 0,4–10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
N _{>по} =	32	27	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48
SO ₄ ²⁻	-0,0601	-0,0804	0,0490	0,8405	0,8972	0,4979	0,9268	-0,3063	0,2168	0,3450	-0,4657	0,9064	0,6098
Cl ⁻	0,6858	0,4265	0,5104	0,4894	0,4333	0,4695	-0,0765	-0,1463	0,2458	-0,0286	0,1380	-0,1062	-0,1561
Ca	0,5069	0,3402	0,6617	0,3786	0,1819	0,6721	-0,0639	-0,2817	0,3570	0,0121	0,1845	-0,1077	-0,1020

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
NH ₄ ⁺	-0,1423	-0,2068	0,1513	0,4258	0,5672	0,0253	0,3901	-0,5239	0,4077	0,6254	-0,5068	0,5932	0,0360
Al	0,3536	0,2700	0,1332	0,4311	0,2325	0,7140	0,1731	0,1489	-0,1326	-0,1392	-0,0149	0,0679	0,2546
NO ₃ ⁻	0,2399	0,2086	0,4118	0,5338	0,5908	0,2739	0,1012	-0,4577	0,4273	0,4630	-0,2245	0,2759	-0,2171
Si	-0,0171	0,0461	-0,0574	0,7696	0,6984	0,7038	0,9304	-0,0542	0,0044	0,0558	-0,3824	0,7492	0,7484
Na ⁺	0,2332	0,2234	0,2876	0,8672	0,9103	0,5446	0,7039	-0,4224	0,3854	0,3499	-0,3681	0,7059	0,3490
Fe	0,6999	0,6383	0,4682	0,5335	0,4084	0,6405	0,0671	-0,1766	0,3233	-0,1439	0,1375	0,0118	-0,0248
Cu	0,5304	0,2958	0,5616	0,4676	0,3083	0,6616	0,0662	-0,0180	0,1185	-0,1383	0,2087	-0,0067	0,0914
K ⁺	-0,0458	-0,0619	0,0350	0,7966	0,8050	0,5632	0,9910	-0,2173	0,1568	0,2399	-0,3934	0,8680	0,6973
Ni	0,0397	-0,0165	0,0158	0,6543	0,6337	0,5180	0,8079	-0,1900	0,1745	0,1610	-0,2376	0,6525	0,5444
F ⁻	0,5659	0,3017	0,5951	0,3729	0,3901	0,2370	0,0791	-0,2879	0,3802	0,0532	0,1843	0,0898	-0,0725
Zn	0,0588	0,0607	-0,1656	0,0094	0,0113	0,0030	-0,0102	0,4275	-0,4177	-0,3998	0,0429	-0,0778	0,1365
Mg	0,5924	0,6273	0,2593	0,5602	0,4352	0,6597	0,2185	-0,1328	0,2241	-0,1958	0,0002	0,1060	0,1767
Ba	0,3929	0,4934	0,2134	0,0547	-0,0301	0,2107	-0,1257	-0,1543	0,1922	-0,0488	0,1057	-0,1994	-0,1253
Pb	-0,0058	-0,0361	0,0147	0,8077	0,7505	0,7034	0,9465	-0,1609	0,1051	0,1286	-0,3709	0,7575	0,7543
Br ⁻	0,4023	0,2552	0,2891	0,2448	0,2311	0,2058	-0,0667	-0,1325	0,1658	0,0395	0,1542	-0,0793	-0,0883
Ti	0,6681	0,6639	0,2778	0,2056	0,0369	0,4896	-0,0188	0,1026	0,0506	-0,3552	0,1822	-0,0817	0,0205
Cr	0,5977	0,5271	0,5057	0,4609	0,3834	0,4917	-0,0018	-0,2654	0,4007	-0,0008	0,1309	0,0188	-0,1202
Mn	0,4329	0,4507	0,2061	0,6258	0,4342	0,8416	0,2704	-0,0292	0,1052	-0,2166	-0,0861	0,1437	0,3043
Mo	-0,1641	-0,1604	0,0343	-0,0695	-0,0445	-0,1008	-0,0518	-0,1344	0,1289	0,1088	-0,1224	-0,0668	-0,1453
Ag	0,5282	0,2871	0,3216	0,2012	0,1377	0,2745	-0,0883	0,0834	0,0600	-0,2728	0,1820	-0,1514	-0,0822
Co	0,1089	-0,0859	0,1578	0,2396	0,2299	0,1941	0,3578	-0,1878	0,1438	0,1309	-0,1503	0,2388	0,3002
Be	1,0000	0,5534	0,5703	0,3287	0,2272	0,4438	-0,0767	-0,1116	0,2912	-0,1741	0,2800	-0,1260	-0,1417
V		1,0000	0,2492	0,2056	0,1024	0,3576	-0,0907	-0,0522	0,1809	-0,2798	0,2027	-0,1344	-0,1077
H ⁺			1,0000	0,3629	0,2925	0,4060	-0,0265	-0,4545	0,5378	0,2109	0,3298	0,0048	-0,2510
Sum				1,0000	0,9575	0,8138	0,7706	-0,3514	0,3313	0,2626	-0,3248	0,7135	0,4684
Ions					1,0000	0,6116	0,7756	-0,4014	0,3548	0,3713	-0,3933	0,7782	0,4216
Els						1,0000	0,5510	-0,1549	0,1938	-0,0279	-0,0986	0,3892	0,4354
C _v							1,0000	-0,1748	0,1136	0,2097	-0,4125	0,8773	0,7429
H, м								1,0000	-0,9141	-0,7861	0,2162	-0,2983	0,3738
t, °C									1,0000	0,6001	0,0413	0,1992	-0,4302
R, %										1,0000	-0,3968	0,4222	-0,2130
O ₃											1,0000	-0,5392	-0,2880
SO ₂												1,0000	0,5589
	aero>0,4	aero>0,5	aero>0,6	aero>0,7	aero>0,8	aero>0,9	aero>1,0	aero>1,5	aero>2	aero>4	aero>7	aero>10	CO ₂
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
N _{>100}	48	48	48	48	46	42	45	34	36	27	7	8	48
SO ₄ ²⁻	0,4334	0,8760	0,8273	0,9408	0,9597	0,9479	0,8193	0,8014	0,7843	0,9051	0,8894	0,1579	0,3960
Cl ⁻	-0,1602	-0,1213	-0,1162	-0,0753	-0,0653	-0,0826	-0,0291	-0,0930	-0,0892	-0,0809	-0,0620	-0,0406	0,0355
Ca	-0,1011	-0,0794	-0,0335	-0,0492	-0,0726	-0,1121	-0,0665	-0,1552	-0,1371	-0,0421	-0,0456	-0,0199	0,1089
NH ₄ ⁺	-0,1147	0,3331	0,3166	0,4596	0,5205	0,5731	0,5801	0,6035	0,5728	0,3966	0,3310	0,0646	0,6988
Al	0,2661	0,1921	0,1781	0,1463	0,1224	0,0939	0,0414	0,0118	0,0090	0,1716	0,1876	0,0120	-0,1809
NO ₃ ⁻	-0,3139	0,0154	-0,0085	0,1311	0,1959	0,2515	0,2807	0,3231	0,2850	0,0803	0,0757	-0,0849	0,5168
Si	0,6287	0,8927	0,8311	0,8844	0,8626	0,8002	0,5938	0,5424	0,5064	0,9307	0,9393	0,1450	0,1048
Na ⁺	0,1943	0,6192	0,5597	0,7012	0,7353	0,7319	0,6279	0,6275	0,6178	0,6990	0,6774	0,0512	0,4656
Fe	-0,0417	0,0187	0,0105	0,0496	0,0564	0,0287	0,0519	-0,0204	-0,0189	0,0738	0,0799	0,0429	0,0626
Cu	0,0964	0,0673	0,0886	0,0600	0,0353	0,0015	0,0058	-0,0454	-0,0204	0,0693	0,0758	0,0357	-0,1012
K ⁺	0,5374	0,9327	0,8781	0,9698	0,9616	0,9115	0,7100	0,6679	0,6253	0,9899	0,9886	0,1251	0,2928
Ni	0,4191	0,7400	0,6892	0,7666	0,7525	0,6975	0,5048	0,4678	0,4310	0,8094	0,8238	0,0770	0,2018
F ⁻	-0,1121	0,0138	0,0088	0,0924	0,1140	0,0872	0,1767	0,0597	0,0979	0,1110	0,0682	0,0590	0,1921
Zn	0,1896	-0,0006	-0,0593	-0,0599	-0,0599	-0,0651	-0,1178	-0,0908	-0,1000	-0,0283	0,0101	-0,1083	-0,4035
Mg	0,1621	0,1834	0,1512	0,1775	0,1757	0,1374	0,1245	0,0444	0,0508	0,2203	0,2282	0,2032	0,0232
Ba	-0,0922	-0,1700	-0,1912	-0,1797	-0,1766	-0,1908	-0,1306	-0,1847	-0,1431	-0,1164	-0,1170	0,1641	-0,0093
Pb	0,6274	0,9151	0,8743	0,9098	0,8787	0,8109	0,6126	0,5454	0,5114	0,9472	0,9528	0,2450	0,1840
Br ⁻	-0,0853	-0,0858	-0,0643	-0,0464	-0,0392	-0,0698	-0,0054	-0,1031	-0,1029	-0,0446	-0,0585	0,0026	0,0419
Ti	0,0462	-0,0336	-0,0599	-0,0522	-0,0556	-0,0726	-0,0880	-0,0997	-0,0989	-0,0214	-0,0036	0,0492	-0,1732
Cr	-0,1516	-0,0302	0,0031	0,0295	0,0307	0,0154	0,0370	-0,0088	-0,0308	0,0139	0,0050	-0,0090	0,1910
Mn	0,2925	0,2851	0,2868	0,2512	0,2209	0,1794	0,1369	0,0725	0,0702	0,2691	0,2826	0,0947	-0,0515
Mo	-0,1612	-0,0698	-0,0681	-0,0605	-0,0578	-0,0488	-0,0767	-0,0409	-0,0362	-0,0409	-0,0466	-0,0251	0,2266
Ag	-0,0593	-0,1257	-0,1446	-0,1197	-0,1081	-0,1186	-0,0110	-0,0921	-0,0535	-0,1032	-0,0812	-0,0672	-0,1613
Co	0,2606	0,3508	0,3282	0,3253	0,3097	0,2704	0,1833	0,1431	0,1409	0,3754	0,3612	0,2600	0,1257
Be	-0,1359	-0,1222	-0,1318	-0,0951	-0,0915	-0,1102	-0,1060	-0,1284	-0,1309	-0,0841	-0,0549	-0,0009	-0,0152

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
V	-0,0817	-0,1368	-0,1795	-0,1303	-0,1201	-0,1378	-0,1636	-0,1690	-0,1735	-0,0755	-0,0621	-0,1548	-0,0650
H ⁺	-0,2956	-0,1189	-0,0903	0,0012	0,0178	-0,0213	0,0869	-0,0571	-0,0219	0,0191	-0,0224	-0,0300	0,2883
Sum	0,3205	0,7046	0,6670	0,7738	0,7852	0,7546	0,6538	0,5951	0,5766	0,7619	0,7550	0,1114	0,3591
Ions	0,2533	0,7021	0,6597	0,7949	0,8248	0,8161	0,7311	0,6961	0,6763	0,7585	0,7445	0,1090	0,4540
Els	0,3688	0,5182	0,5003	0,5211	0,4920	0,4254	0,3201	0,2297	0,2188	0,5618	0,5709	0,0861	0,0701
C _v	0,5883	0,9552	0,9027	0,9783	0,9682	0,9229	0,7335	0,6935	0,6573	0,9905	0,9906	0,1732	0,2521
H, м	0,5178	0,0099	0,0318	-0,1835	-0,2669	-0,2926	-0,3959	-0,3080	-0,3194	-0,2086	-0,1420	-0,2130	-0,9292
t, °C	-0,5645	-0,0736	-0,0795	0,1240	0,1957	0,2083	0,3300	0,2194	0,2382	0,1442	0,0934	0,1316	0,8191
R, %	-0,3541	0,1005	0,1019	0,2614	0,3395	0,3956	0,5049	0,4711	0,4737	0,2219	0,1475	0,2103	0,8430
O ₃	-0,1999	-0,4166	-0,3473	-0,4010	-0,4512	-0,5389	-0,4406	-0,6024	-0,5521	-0,3686	-0,3591	-0,1147	-0,4199
SO ₂	0,3766	0,8309	0,7821	0,9051	0,9459	0,9823	0,8768	0,9215	0,8705	0,8424	0,8203	0,0988	0,4677
aero 0,4–10	0,9758	0,8894	0,8988	0,7502	0,6634	0,5947	0,3978	0,3825	0,3608	0,7233	0,7418	0,1565	-0,3141
aero >0,4	1,0000	0,7699	0,7898	0,5897	0,4855	0,4088	0,2154	0,2053	0,1897	0,5715	0,5980	0,1350	-0,4830
aero >0,5		1,0000	0,9803	0,9625	0,9210	0,8733	0,6701	0,6552	0,6177	0,9364	0,9415	0,1576	0,0858
aero >0,6			1,0000	0,9417	0,8843	0,8245	0,6665	0,6066	0,5767	0,8896	0,8851	0,1932	0,0527
aero >0,7				1,0000	0,9875	0,9456	0,8021	0,7374	0,7034	0,9682	0,9545	0,1815	0,2764
aero >0,8					1,0000	0,9796	0,8596	0,8091	0,7755	0,9530	0,9336	0,1791	0,3754
aero >0,9						1,0000	0,8882	0,9064	0,8680	0,8891	0,8710	0,1359	0,4451
aero >1,0							1,0000	0,8826	0,8968	0,7050	0,6476	0,2873	0,5101
aero >1,5								1,0000	0,9806	0,6252	0,6016	0,0715	0,5142
aero >2									1,0000	0,5908	0,5560	0,1181	0,4898
aero >4										1,0000	0,9894	0,1886	0,2609
aero >7											1,0000	0,1302	0,2016
aero >10												1,0000	0,1313

Как и следовало ожидать, максимальная корреляционная связь оказалась характерна для двух компонентов, доминирующих в атмосфере региона в силу специфики промышленного производства в Норильске. Эта пара — газ сернистый ангидрид и сульфат-анион в составе аэрозоля. Они формируют первую коррелирующую с ними и между собой группу элементов аэрозоля, очевидно, имеющих тот же источник происхождения.

В системе графов [2], построенной по значениям корреляционной матрицы с уровнем достоверности $q = 0,9995$, эта группа образует первый кластер химических компонентов — верхний семиугольник, в центре которого — сульфат-анион (рис. 5).

Высокая корреляция углекислого газа с двумя компонентами этого кластера — диоксидом серы и ионом аммония (значительная часть которого, впрочем, весьма вероятно, становится таковым при концентрировании аэрозольного вещества на фильтре аспирации через него воздуха, содержащего газ-предшественник — аммиак) — подтверждает их совместное присутствие в выбросах предприятий Большого Норильска. Отсутствие же при этом существенной корреляции углекислого газа с аэрозольными элементами этого кластера, наряду с наличием таковой у сернистого ангидрида, говорит об адсорбции значительной части молекул SO₂ на частицах выбрасываемого аэрозоля, поскольку различие коэффициентов диффузии между газами существенно меньше, чем молекул газа и аэрозольных частиц.

По всей видимости, такое сухое поглощение приводит в конечном итоге к реализации механизма гетерогенного окисления SO₂ в SO₃ на поверхности твердых аэрозолей [3], содержащих оксиды щелочных металлов, никеля, свинца и кремния, а также к возможному образованию солей сернистой и серной

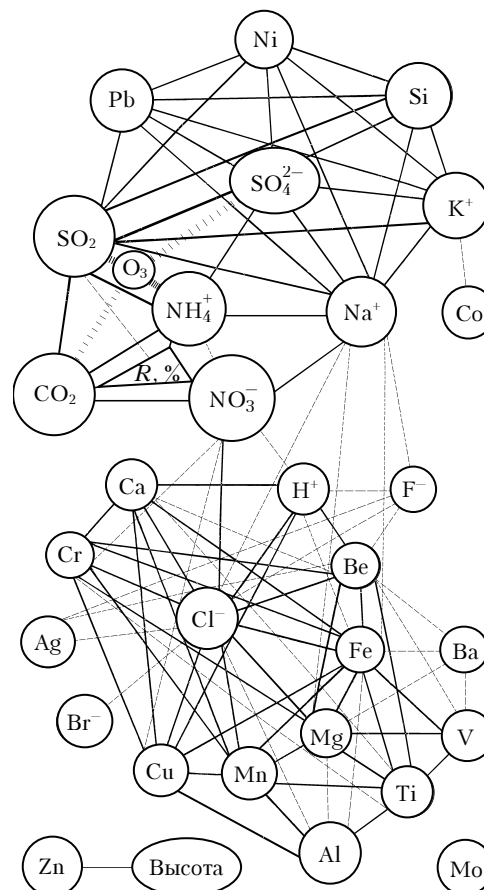


Рис. 5. Графы химической матрицы аэрозоля района Большого Норильска, построенные по корреляционной матрице массива данных периода летних измерений (уровень значимости сплошных линий — 0,9995, пунктира — 0,995–0,975)

кислот без участия водных паров. Этот вывод подтверждается как близкой к нулю корреляцией компонентов этой группы с концентрацией ионов водорода, так и высокой отрицательной корреляцией с озоном (его «выедание» в области присутствия компонентов кластера). Таким образом, металлы первого кластера являются и первыми контрагентами образующихся сульфитов и сульфатов. Кварцевые частицы, вероятно, играют при этом роль конденсационно-коагуляционных центров.

Компоненты первого кластера имеют самые высокие коэффициенты корреляции как с суммарными концентрациями ионов (Ions) и элементов (Els) раздельно, так и с общей массой аэрозольных компонентов (Sum), а также перекрывают большую часть спектра счетной концентрации — от 0,4–0,5 до 1,5 мкм (для свинца, калия и кремния наблюдается второй пик в области 4–10 мкм), определяя в целом объемную концентрацию (C_v) аэрозоля всего района.

Центром второй взаимокоррелирующей группы элементов является ион хлора, которому приписывают морское происхождение [4–6]. Наряду с ним к компонентам преимущественно океанического происхождения традиционно относят натрий и бром. И хотя корреляционная связь с натрием и бромид-ионом в нашем случае имеется, она соответствует более низкому уровню достоверности $q = 0,975$. Возможно, это связано со значительной трансформацией и процессами фракционирования морских аэрозольных частиц при воздушном переносе в атмосфере, при котором, во-первых, на них осаждаются более мелкие частицы различного происхождения, а во-вторых, сам хлор способен участвовать в равновесных переходах с изменением степени окисления, включая фазовые переходы типа «частица — капля — газ — капля — частица».

По мере укрупнения седиментационная устойчивость частиц сильно уменьшается, приводя в конечном итоге к их выпадению из атмосферы на подстилающую поверхность. Очевидно, что промышленные выбросы способствуют усилению конденсационно-коагуляционных процессов и нарушают устойчивую стратификацию аэрозольных полей в пограничном слое атмосферы, приводя к ускорению трансформации и осаждения аэрозоля.

Таким образом, в Норильский промышленный район эти аэрозольные частицы, учитывая удаленность других крупных промрайонов, попадают насыщенными элементами и ионами, в первую очередь морского и почвенно-эрозионного происхождения. Пройдя промышленный район, они дополнительно обогащаются компонентами выбросов предприятий Норильска.

Оценить «норильское» обогащение компонентов второго кластера можно методом простого приближения, основанного на следующих допущениях:

1) весь прошедший через район хлор в составе аэрозоля имеет не местное промышленное происхождение (ввиду отсутствия его корреляции с SO_2 и другими выбрасываемыми компонентами);

2) относительное обогащение хлорид-ионом пограничного слоя при прохождении через район про-

исходит исключительно за счет оседания аэрозоля из вышерасположенных слоев;

3) считать незначительными выпадения хлорсодержащей фракции аэрозоля на подстилающую поверхность района (при необходимости строгого расчета эти потери можно оценить по тем высококоррелированным с хлором компонентам, чьи коэффициенты относительного обогащения стали ниже единицы при прохождении воздушной массы через промрайон);

4) на основе вышеперечисленного считать, что обогащения по другим компонентам этого кластера, превышающие коэффициент обогащения хлорид-иона, будут характеризоваться вкладом Норильского промышленного района.

Математически такая оценка промышленного обогащения элемента или иона второго кластера при прохождении через район будет иметь вид

$$K_E = \frac{[E]_{\text{exit}}/[E]_{\text{entr}}}{[Cl]_{\text{exit}}/[Cl]_{\text{entr}}},$$

где entr — наветренная сторона (концентрации на входе воздушной массы в район); exit — подветренная сторона (на выходе). Данные такой оценки обогащения ряда ионов и элементов в составе аэрозоля представлены на рис. 6.

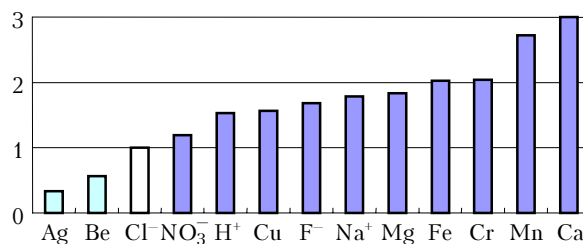


Рис. 6. Оценка обогащения компонентов второго кластера по хлорид-аниону по выборке из 12 проб, отобранных в слое 100–1500 м на наветренных (7 проб) и подветренных (5) сторонах района Большого Норильска 10–13 августа 2004 г.

Ко второму кластеру примыкает несколько обогащенная диагональ элементов Al — Ti — V, которая практически не коррелирует с самим хлором, но имеет сильные связи с половиной его кластера. «Лидером» этой группы можно было бы назвать титан, у которого 6 высокосвязанных связей, однако отсутствие замкнутой цепи корреляций говорит о сложном происхождении элементов группы. Титан, а также железо и алюминий (иногда марганец) часто выбирают опорными элементами индикации почвенного происхождения. Однако существенное обогащение Al, Ca, Fe, Mn свидетельствует о наличии не только почвенно-эрозионного фактора на территории района. Возможной причиной значительного возрастания их концентраций здесь является периодическое проведение в районе горно-взрывных работ. Титан, ванадий, отчасти магний, вероятно, выделяются с подстилающей поверхности нефтегазоносных провинций Западной Сибири.

Связующим звеном двух главных кластеров рассматриваемого аэрозоля является нитрат-анион,

образующийся в атмосфере из оксидов азота фотохимическим путем и, что видно из его положения в системе графов, одинаково хорошо конденсирующийся на любом аэрозоле.

Из всех определявшихся компонентов аэрозоля не обнаруживают никаких значимых связей лишь два элемента — молибден и цинк. Однако известно [6], что первый из них образует довольно устойчивый высший оксид и сильногидратированные кислородные комплексы на его основе, что дает повод предположить наличие его в виде устойчивых аэрозольных частиц подобного состава, довольно медленно трансформирующихся. Цинк также склонен к гидратации и комплексообразованию. Но здесь более интересен тот факт, что он единственный из всех измерявшихся аэрозольных компонентов имеет высокую ($r = 0,4275$) и значимую (по $q = 0,995$) положительную корреляцию с высотным ходом, вероятно за счет дальнего переноса. К тому же ряд авторов [22] приписывают выбросам цинка изначально парофазную форму существования в атмосфере, т.е. цинк из местных выбросов может не проявлять себя в измеряемой здесь аэрозольной фазе.

Более однозначные ответы о происхождении, распространении и времени жизни газовых и особенно аэрозолеобразующих веществ могли бы дать сведения о результатах анализа состава (хотя бы по тривиальным компонентам) используемых пород и выбросов местных металлургических производств, что позволило бы, в конечном итоге, сформулировать конкретные рекомендации о возможных путях не только снижения токсичности отдельных компонентов, но и уменьшения объемов их дальнего переноса в атмосфере в составе аэрозоля.

Рекомендации

Для улучшения экологической ситуации в регионе необходимо снижение выброса серы. Помимо классического обессеривания топлива есть три варианта: 1) процесс очистки с введением CuO , который обеспечивает до 90% удаления NO_x и SO_x [7]; 2) угольное топливо с добавками извести [8–10], обеспечивающее связывание SO_x от 50 до 80%; 3) обессеривание газа в газоходах с помощью известняка [11, 12].

Измерения вертикального распределения примесей и температуры воздуха выявили в течение всего эксперимента наличие перманентной инверсии с высотой около 1 км, которая не позволяет распространяться выбросам вверх. Климатические данные показывают, что такая инверсия не разрушается даже днем с сентября по апрель во всем регионе. Даже летом, в дневное время, в регионе имеется задерживающий слой на высоте 900–1000 м. В связи с этим наращивание заводских труб до 500 м не имеет смысла, так как выбросы все равно будут распространяться под слоем инверсии и их рассеивание не улучшится.

Для решения этой проблемы можно провести следующие мероприятия. Поскольку есть суточная модуляция распространения примесей по вертикали,

то можно изменять интенсивность выбросов днем и ночью. Ночью накапливать выбросы в газгольдерах, а днем осуществлять их выпуск. При этом будет использован эффект лучшего рассеивания примесей днем и частично улучшена их очистка. В газгольдере будет происходить конденсация газов и возникающие микродисперсные частицы будут быстро коагулировать, переходя в аккумуляционную моду [13], хорошо собираемую обычными фильтрами. Для преодоления слоя инверсии вместо обычных труб рекомендуется использовать метеотроны [14, 15]. Для контроля уровня инверсии целесообразно использовать содар [16].

В городской колонке примеси выносятся в основном в газообразном виде, так как аэрозольная фракция оседает в виде грубодисперсных частиц в непосредственной близости от источника. Распространяются они на значительные расстояния под слоем инверсии, в период эксперимента в слое 300–400 м. Переход «газ — частица» начинается на удалении 50–100 км. Причем старт конденсационных процессов зависит от типа соединения. Ввиду ограниченности летних часов весь процесс трансформации соединений в шлейфе проследить не удалось. Учитывая важность трансформационных процессов в шлейфах для большого количества дисциплин, необходимо проведение специализированного эксперимента в рамках какой-нибудь межотраслевой программы. Время его проведения, судя по данным настоящей работы, лучше выбирать в переходные сезоны.

Аэрозольный фон в городе определяется в основном техногенным микродисперсным кальцием и зольными Al , Si , Fe . При этом и в газовом, и в аэрозольном составе отмечается пятнистость. Это обусловлено особенностями аэрации города, которая в рамках обычно принятых сведений объяснению не поддается. На территории города имеются застойные зоны.

Аэрозольный фон улучшается за счет уменьшения выбросов. Для решения проблемы застойных зон экономически целесообразно сделать теоретический расчет циркуляции воздуха в городе по схеме Пененко—Алояна [17, 18] с верификацией результатов в небольшом эксперименте и создать систему контроля типа описанной в [19].

Относительно высокие концентрации озона в атмосфере Норильска в период эксперимента позволяют сделать вывод, что в воздухе города интенсивно идут фотохимические процессы, при которых образуются вторичные, более токсичные соединения, например формальдегид.

Для контроля фотохимических процессов в Норильске крайне необходима организация мониторинга озона. Для этого может использоваться автоматический пост типа TOR-станции [20]. Весьма нежелательно применение зарубежных УФ-анализаторов, которые превышают значения озона в запыленной атмосфере [21].

Работа выполнена по программе СО РАН 24.3, при поддержке междисциплинарного проекта СО РАН № 130, программы Президиума РАН № 13, грантов РФФИ № 04-05-64559 и 04-05-08010.

1. ГН 2.1.6.1338-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест. Утвержден Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 21 мая 2003 г.
2. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул. М.: Высш. школа, 1988. 239 с.
3. Исидоров В.А. Экологическая химия. СПб.: Химиздат, 2001. 304 с.
4. Виноградова А.А. Микроэлементы в составе арктического аэрозоля (обзор) // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 1993. Т. 29. № 4. С. 437–456.
5. Петрухин В.А., Бурцева Л.В., Виженский В.А., Лапенко Л.А., Юшкан Е.И. О возможности использования геохимических соотношений для выделения антропогенной составляющей в загрязнении атмосферы тяжелыми металлами // Мониторинг фонового загрязнения природных сред. Вып. 2. Л.: Гидрометеоздат, 1984. С. 71–78.
6. Полинг Л. Общая химия. М.: Мир, 1974. 848 с.
7. Mobley J.D. Assessment of NO_x and SO_x Flue Gas Treatment Technology. EPA/IERI. RTP-1084. Triangle Park, 1980. P. 1–23.
8. Maloney K.L. Sulfur Capture in Coal Flames // AIChE 87th National Meeting. Boston, 1979. P. 46–50.
9. Giammar R.D. Evaluation of Emission and Control Technology for Industrial Stoker Boilers // Proc. of the Third Station. Sour. Combustion Symp. Triangle Park, 1979. V. 1. P. 3–34.
10. Blythe G.M. Survey of Dry SO₂ Control Systems. EPA-600/7-80-030. 1980. 47 p.
11. Hoffman L., Aresco S.J., Holt E.C. Engineering/Economic Analyses of Coal Preparation with SO₂ Cleanup Processes for Keeping High Sulfur Coals in the Energy Market // EPA-600/7-78-002. 1978. 145 p.
12. Kilgroe J. Combined Coal Cleaning and FGI // Proc. Symp. on Flue Gas Desulfurization. Las-Vegas, 1979. P. 89–97.
13. Белан Б.Д., Ковалевский В.К., Щербатов А.И. Опыт измерения мелкодисперсной фракции аэрозоля с борта самолета-лаборатории с помощью диффузионной батареи // Оптика атмосф. и океана. 1992. Т. 5. № 10. С. 1036–1040.
14. Вульфсон Н.И., Левин Л.М. Метеотрон как средство воздействия на атмосферу. М.: Гидрометеоздат, 1987. 132 с.
15. Вульфсон Н.И. Методы стереологии в геофизике. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 200 с.
16. Гладких В.А., Макиенко А.Э., Федоров В.А. Акустический доплеровский локатор «Волна-3» // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12. № 5. С. 437–444.
17. Пененко В.В., Алоян А.Е. Модели и методы для задач охраны окружающей среды. Новосибирск: Наука, 1985. 256 с.
18. Пененко В.В., Коротков М.Г. Применение численных моделей для прогнозирования аварийных и экологически неблагоприятных ситуаций в атмосфере // Оптика атмосф. и океана. 1998. Т. 11. № 6. С. 567–572.
19. Балин Ю.С., Белан Б.Д., Надеев А.И., Панченко М.В. Система оперативного контроля загрязнения воздушного бассейна промышленных центров «Город» // Оптика атмосф. и океана. 1994. Т. 7. № 2. С. 163–170.
20. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Ковалевский В.К., Плотников А.П., Покровский Е.В., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н. Автоматический пост для мониторинга малых газовых составляющих атмосферного воздуха // Метеорол. и гидрол. 1999. № 3. С. 110–118.
21. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Краснов О.А., Ковалевский В.К., Пирогов В.А., Плотников А.П., Толмачев Г.Н., Гриднев Ю.В. Сравнение ультрафиолетового и хемилюминесцентного озонметров // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15. № 8. С. 723–726.
22. Добровольский В.В. Основы биогеохимии. М.: Высш. школа, 1998. 413 с.

B.D. Belan, G.O. Zadde, G.A. Ivlev, O.A. Krasnov, V.A. Pirogov, D.V. Simonenkov, G.N. Tolmachev, A.V. Fofonov. Complex assessment of the conditions of the air basin over Norilsk industrial region. Part 5. Admixtures in the ground air layer. The correspondence of the air composition to hygienic standards. Recommendations.

This paper is terminating in the cycle «Complex assessment of the conditions of the air basin over Norilsk industrial region». It deals with results obtained in the course of ground measurements with the use of mobile and stationary complexes similar to those installed in the aircraft-laboratory. Interrelations between different compounds found in air over Norilsk have been analyzed; clusters of their interconnection have been compiled. The recorded compound concentrations were compared with hygienic standards, which was followed recommendations on improvement of air in the city.