

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

Экспериментальное исследование трансформации примесей в шлейфах предприятий

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 18.01.2005 г.

Определяются степень и характер воздействия Норильского промышленного узла на состояние воздушного бассейна региона. Задача решалась с помощью самолета-лаборатории Ан-30 «Оптик-Э». Оказалось, что 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. В ходе самолетного эксперимента, впервые за 15-летний период проведения подобных исследований, удалось зафиксировать момент перехода газ — частица в шлейфе выбросов промышленного центра. Этот процесс начался через 6 ч после поступления примесей в атмосферу и происходил на расстоянии 50 км от момента начала конденсации. Основным газом-предшественником являлся сернистый ангидрид. Выполненные оценки показали, что осаждение образовавшихся в шлейфе сульфатов может достигать величины 281 т/(км² · год) в районе, где этот процесс осуществляется.

Введение

Увеличение масштабов промышленной и сельскохозяйственной деятельности человека все более заметно и, как правило, отрицательно сказывается на окружающей природе. Строительство городов и прокладка транспортных магистралей ограничивают размеры площадей, пригодных для ведения сельского хозяйства. Сооружение каскадов гидроэлектростанций резко нарушает жизненные процессы в водных системах, значительно ухудшая качество воды и затрудняя воспроизводство рыбных запасов. Вблизи шахт высятся горы пустой породы, извлеченной на поверхность земли вместе с каменным углем и рудами. Сточные воды промышленных и коммунальных предприятий, содержащие чужеродные для водной среды, нередко токсичные, соединения, попадают в конечном итоге в моря и океаны. Весьма опасно неэффективное использование таких ценных промышленных продуктов, как минеральные удобрения. Выносимые с полей в реки они приводят к интенсивному росту водной растительности, отмирание которой вызывает загрязнение водоемов. Еще более опасны мигрирующие отходы не полностью протекающих технологических процессов: газовые и аэрозольные выбросы, содержащие токсичные вещества.

Исследованием промышленных выбросов коллектив самолета-лаборатории Ан-30 «Оптик-Э» ИОА СО РАН занимается последние 15 лет. Для этого разработана оригинальная методология, которая опробована в 12 городах, 6 регионах и на 2 месторождениях. Ее детальное описание имеется в [1]. В настоящей работе приводятся результаты самолетного зондирования, выполненного в Норильском промышленном районе.

Норильск — крупный промышленный центр Заполярья. Из-за высоких объемов выбросов к концу 80-х гг. атмосфера города характеризовалась следующими параметрами [2]. Разовые концентрации двуокиси серы превышали 40 ПДК, концентрации окиси азота 36 ПДК. Средние за год значения этих же соединений составляли 3–4 ПДК. В 4–6 раз превышались разовые ПДК по хлору, фенолу, сероводороду, окиси углерода, в 15 раз по диоксиду азота.

Основными источниками загрязнения воздуха являются предприятия цветной металлургии. Выбросы двуокиси серы этими предприятиями были самыми высокими в бывшем СССР и достигали 10% от общих. В составе выбросов на нее приходилось 96%, на пыль, окись углерода и окислы азота по 1–1,5%.

По данным краевого комитета по охране окружающей среды [3, 4], на Норильском горно-металлургическом предприятии произошло снижение уровня очистки и утилизации диоксида серы с 20% в 1989 г. до 3,5% в 1994 г., что повлекло дополнительное количество выбросов (тыс. т) в атмосферу [5–8]:

Год	Пыль	SO ₂	NO ₂	CO
1996	24,1	2014,4	13,7	53,1
1997	26,0	2015,0	12,8	32,0
1998	20,1	2065,0	12,8	25,5
1999	20,4	2104,1	12,3	23,6

Поскольку для утилизации сернистого ангидрида отсутствуют экономически оправданные технологии [9], то рассчитывать на улучшение качества воздуха в городе в ближайшее время не приходится.

Усугубляет ситуацию и неудачное расположение предприятий по отношению к жилым кварталам в городе [2]. Предприятия расположены к северу и югу от города. Повторяемость северного и северо-западного направлений ветра составляет 19%, южного и юго-восточного – 28%. Таким образом, город попеременно находится под влиянием выбросов то одного, то другого предприятия цветной металлургии.

1. Приборы и методы

В проведенном эксперименте были задействованы не все установки самолета-лаборатории, перечисленные в [10]. Поэтому в данном разделе приведем краткую характеристику приборов, использованных в нашем эксперименте.

Для измерения газового и аэрозольного состава воздуха на высоте полета в носовой части самолета, перед винтами, установлены заборники воздуха для приборов, основанных на контактных методах измерения. Такое размещение позволяет осуществлять регистрацию метеовеличин и отбирать пробы воздуха в невозмущенной зоне. Сами приборы размещаются на этажерках внутри салона, в непосредственной близости от заборников. Это дает возможность сократить длину воздушных коммуникаций и тем самым свести к минимуму искажения в анализируемом потоке. Особенно это важно при измерении дисперсного состава аэрозоля и его концентрации для определения химического состава частиц.

Забор воздуха осуществляется прямым наддувом встречным потоком и дополнительным разрежением на выходе из измерительного тракта. Такое техническое решение позволяет избавиться от применения в воздухозаборных трактах насосов и всевозможных побудителей расхода, объемных регуляторов скорости прокачки, так как при постоянстве гидравлического сопротивления измерительных устройств автоматически реализуется принцип Бернулли об изменении наддува и отсоса как при изменении скорости, так и при изменении высоты полета [11].

Для изменения газового состава в эксперименте использовались газоанализаторы ЗАО «ОПТЭК», аттестованные и поверенные во ВНИИМ им. Менделеева. Их технические характеристики приведены в табл. 1.

Измерение аэрозольного состава производилось двумя способами. Дисперсный состав определялся оперативно с помощью фотоэлектрического счетчика ПК-ГТА, изготовленного в ЗАО «Прибо-

роостроитель» (г. Выборг) и имеющего заводскую поверку, и диффузионным спектрометром аэрозоля ДСА, разработанным в ИХКГ СО РАН и поверенным там же. ПК-ГТА измеряет количество частиц в единице объема в диапазоне размеров 0,4–10 мкм, по 12 каналам комбинированной нелинейной шкалы, ДСА – по 10 каналам в диапазоне 3–200 нм.

Таблица 1

Прибор	Параметр	Принцип измерения	Диапазон, погрешность
С310	SO ₂	хемилюминесцентный	0...2000 мкг/м ³ , ± 25%
Р310	NO	»	0...1000 мкг/м ³ , ± 25%
	NO ₂	»	0...1000 мкг/м ³ , ± 25%
3–02П	O ₃	»	0...1000 мкг/м ³ , ± 15%
Л-061-02	CO	электрохимический	0...400 мг/м ³ , ± 20%
	CO ₂	оптический, недисперсионный	0...10000 млн ⁻¹ , ± 20%

Химический состав аэрозоля определялся по предварительно концентрированным навескам на фильтрах тип АФА-ХП-20 марки НЭЛ. Расход воздуха через фильтр контролировался с помощью счетчика СГБд4-1, выпущенного АО «Сигнал» (г. Энгельс) и имеющего заводскую поверку. В полете одновременно экспонировались три фильтра. Характеристики перечисленных приборов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Прибор	Параметр	Принцип измерения	Диапазон, погрешность
ПК-ГТА	дисперсный состав	фотоэлектрический	0...300 см ⁻³ , ± 25%
ДСА	дисперсный состав	диффузионный	0...1000 см ⁻³ , ± 25%
СГБд4-1	расход воздуха	ротационный	0...6 м ³ /ч, ± 3%

Обработка проб аэрозоля осуществлялась в лаборатории мониторинга окружающей среды Томского государственного университета (аттестована Госстандартом РФ № 510338) по методикам «Атомно-эмиссионного спектрального анализа» и «Ионной хроматографии», прошедшим метрологическую экспертизу в Государственном метрологическом центре Госстандарта РФ (г. Екатеринбург) № 08-48/031 и 08-48/032 20.12.1994 г. Погрешности определения приведены в табл. 3. Привязка данных по высоте и по географии осуществлялась с помощью системы GPS.

Таблица 3

Компонент	Метод	Предел обнаружения, мкг/фильтр	Погрешность, %
Br ⁻ , SO ₄ ²⁻	Ионная хроматография	0,6	8
NO ₃ ⁻	»	0,6	8
Cl ⁻	»	0,1	12
F ⁻ , NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻	Ионометрия с селективными электродами	0,2	10
Na ⁺ , K ⁺	Пламенная фотометрия	0,2	10
Al, Co, Cr, Mo, Ni, Ti, Zn, B, Si	Атомно-эмиссионная спектроскопия	0,02	20
Ag, Ba, Cu, Pb, Sn, V, Mg, Mn	»	0,01	20
Fe, Ga, W	»	0,1	20
Ca, Cd	»	0,2	20

2. Условия и схема полета по исследованию шлейфов

Одним из неблагоприятных воздействий на окружающую среду выбросов промышленных предприятий Норильска является осаждение соединений серы из атмосферы [2, 4, 5]. В табл. 4 включены данные о содержании сульфатов в атмосферных осадках, полученные в Норильске и на ближайших к нему станциях Росгидромета [12]. Две из них: Диксон и Туруханск — входят в перечень фоновых станций мировой сети мониторинга кислотных осадков [13].

Таблица 4
Среднегодовые концентрации иона SO_4^{2-} (мг/л) в атмосферных осадках

Станция	Год				
	1991	1992	1993	1994	1995
Диксон	11,1	18,2	17,6	2,9	21,1
Норильск	124,8	125,3	112,4	182,0	150,9
Туруханск	1,0	1,6	2,4	1,5	1,7
Уренгой	1,8	2,7	3,4	1,4	1,3
Жиганск	1,3	1,2	0,9	1,4	1,2
Кюсюр	7,9	11,3	6,0	8,2	9,5
Полярный	2,9	—	1,8	2,9	1,7
Тикси	4,4	4,1	7,6	4,7	5,9

Из табл. 4 видно, что содержание сульфатов в Норильске на два порядка превышает концентрацию в других регионах. Выделяется также рост концентрации сульфатов после выхода из строя очистных сооружений (1994, 1995 гг.) на предприятиях города.

Станцию Диксон по сульфатам вряд ли можно отнести к фоновым, так как их концентрация здесь на порядок выше, чем на соседних. Скорее всего, что при южных направлениях переноса воздушных масс она оказывается в зоне влияния предприятий Норильска. Учитывая преобладающий западно-восточный перенос, можно предположить, что повышенное содержание сульфатов, фиксируемое в Кюсюре и Тикси, также является следствием дальнего переноса выбросов Норильска. Поэтому целью этого полета было определение распространения примесей в окружающем регион пространстве.

Первоначально планировалось выполнить картирование примесей над самим городом и ближайшими окрестностями, как это изложено в [1]. Однако несколько обстоятельств привели к необходимости изменения плана полета.

Во-первых, из-за метеоусловий. Низкая инверсия приводила к тому, что выбросы предприятий распространялись в самом нижнем слое, под ней. Чтобы провести измерения в таком шлейфе, нужно летать на сверхмалых высотах, что не позволяет ортография Норильска.

Во-вторых, как было выяснено в предварительном полете, сернистые соединения выносятся из города в газовой фазе. Неизвестно, на каком расстоянии произойдет их конденсация. Осаждение же более эффективно из аэрозольной фазы [14].

Наши предыдущие эксперименты показывают, что аэрозольную фракцию надо улавливать на расстоянии не менее 20 км от источников выбросов [15].

В-третьих, при перемещении городского шлейфа в нем постоянно идут процессы трансформации соединений. В связи с этим целесообразно оценить их скорость. В [13] утверждается, что интенсивность выпадения соединений серы на расстоянии 10–15 км от города в несколько раз (а иногда и на порядок) больше значений, установленных для регионального фона. Согласно данным А.Г. Рябошапко, химические процессы трансформации серы идут по пути ее окисления до высшей валентности VI и нейтрализации [14]:



где Me — любой катион. Реально основная часть выброса представлена диоксидом серы. Использование численных методов [16, 17] позволило определить основные параметры химических трансформаций и выведения из атмосферы соединений серы и азота. Было найдено, что в процессе переноса максимум содержания в атмосфере серной кислоты достигается примерно через 20 ч, а среднее время жизни диоксида серы за счет сухого поглощения и химических трансформаций составляет порядка 40 ч. При выпадении осадков скорость выведения диоксида серы резко увеличивается. Еще более длительный период пребывания сернистого ангидрида в атмосфере (от 4 до 9 дней) получен при моделировании в [18]. Эксперименты, проведенные в [19, 20], показали, что этот период составляет от нескольких часов до 2–3 дней. Такие большие различия, по-видимому, объясняются тем, какие механизмы преобладают в шлейфе — хемоконденсация, бинарная или тройная нуклеация [21].

Поэтому было принято решение провести картирование примесей за пределами города по основному направлению переноса воздушной массы. Здесь следует заострить внимание, что направления ветра и движения воздушной массы часто не совпадают. Еще С.П. Хромовым было показано, что воздушная масса несет свое поле ветра как бы «замороженным» в себя [22]. Примером может служить перемещающийся циклон, в котором ветер направлен против часовой стрелки, а сам он, как единое целое, перемещается по ведущему потоку.

Полет выполнялся 10 ноября 2002 г. в светлое время суток по схеме, изображенной на рис. 1. Видно, что горизонтальные полеты производились на высотах 400, 600, 800 и 1200 м над уровнем моря, равноудаленными галсами. Нижние три площадки выполнены на удалении 60...120 км от города. Площадка 1200 м находилась на удалении 20 км. На площадке 400 м было сделано 6 маршрутов; на площадке 600 м — четыре, на площадке 800 м — три и на площадке 1200 м — четыре.

Погоду в районе Норильска определяла в утренние часы центральная часть заполняющегося циклона с приземными фронтами, а затем наблюдалось малоградиентное поле пониженного давления. Воздушная масса была арктической.

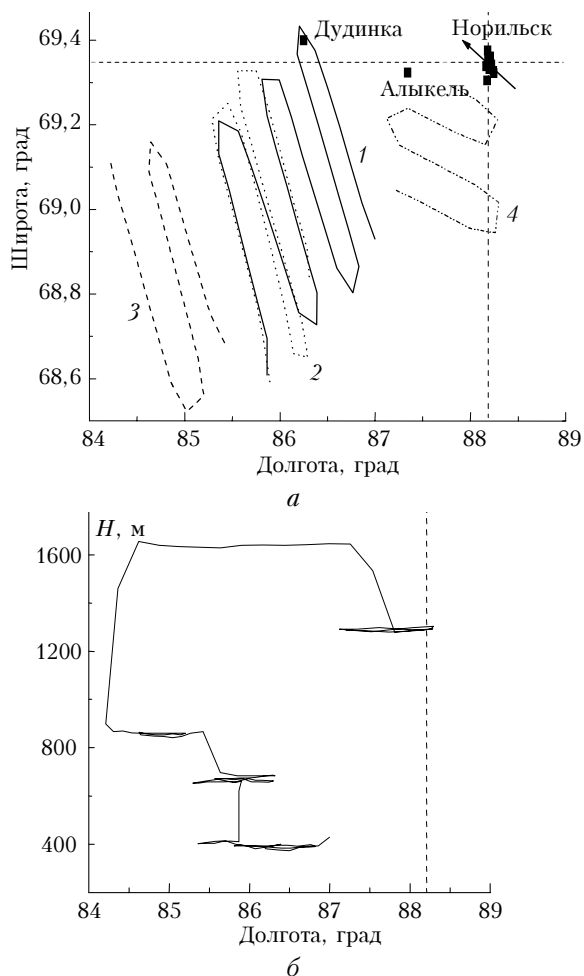


Рис. 1. Схема выполнения полета на высотах 400 м (1), 600 м (2), 800 м (3), 1200 м (4)

Вертикальная стратификация атмосферы показана на рис. 2, из которого видно, что в ночное время сформировалась мощная приземная инверсия температуры, которая способствовала накоплению в подынверсионном слое сернистого ангидрида до 1000 мкг/м^3 и субмикронной фракции аэрозоля. К концу полета интенсивность инверсии уменьшилась, и ее высота несколько понизилась. Кроме того, слабые осадки привели к очищению нижнего слоя атмосферы. Концентрация SO_2 приблизилась к фоновой – $40\text{--}60 \text{ мкг/м}^3$, так же как и счетная концентрация субмикронной фракции аэрозоля.

По данным измерений на перечисленных площадках были построены карты, отражающие распределение примесей в плоскости, близкой к горизонтальной.

В этой работе в основном остановимся на данных, зафиксированных на высоте 400 м в шлейфе выбросов, как наиболее эффективно отражающих предмет анализа.

Из рис. 3 видно, что в квадрат измерений пришел городской воздух, концентрация SO_2 в котором достигала 450 мкг/м^3 . Хотя ближняя граница квадрата находилась на расстоянии 58 км от города, дальняя – 100 км, как показал траекторный анализ, воздух попал в этот район по дуге через 6 ч.

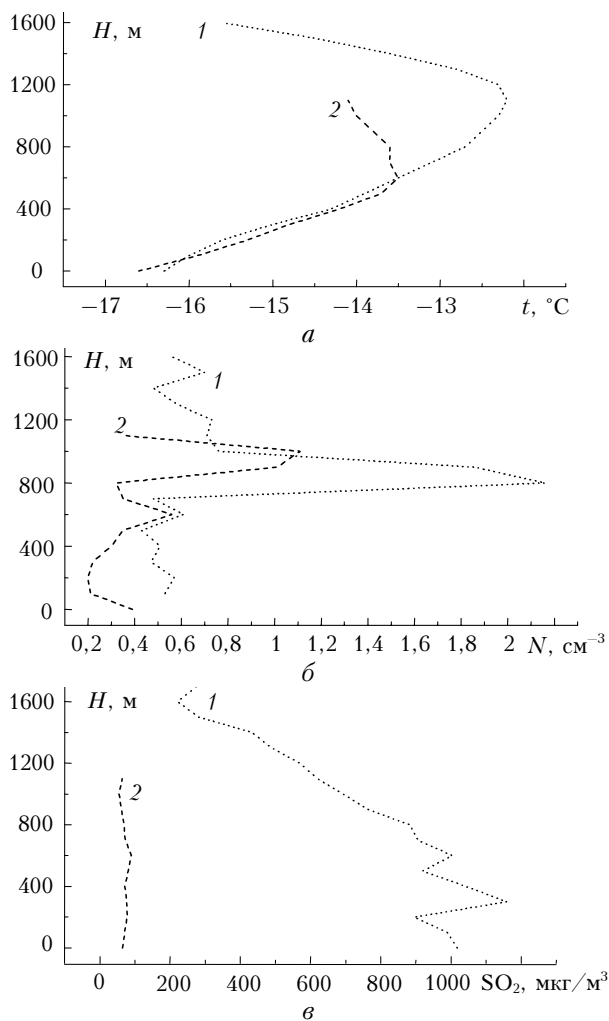
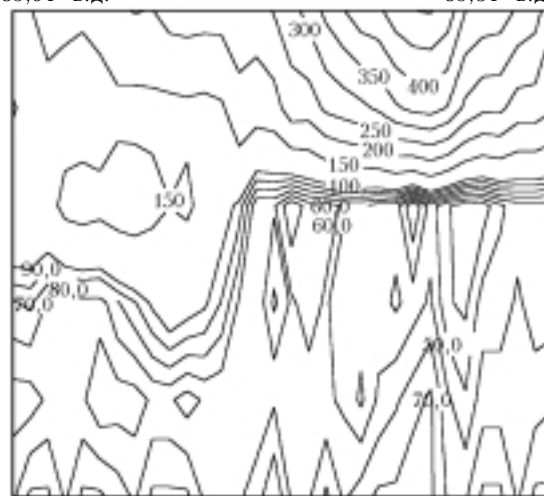


Рис. 2. Вертикальное распределение в районе Норильска 10 ноября 2002 г.: а – температуры воздуха; б – счетной концентрации аэрозоля ($d \geq 0,4 \text{ мкм}$); в – концентрации сернистого ангидрида на взлете (1) и посадке (2)

68,65° с.ш. 69,16° с.ш.
85,91° в.д. 85,31° в.д.



68,93° с.ш. 69,43° с.ш.
86,97° в.д. 86,30° в.д.

Рис. 3. Распределение концентрации сернистого ангидрида на высоте 400 м 10 ноября 2002 г., мкг/м^3

При этом достаточно контрастно прослеживается переход от городского шлейфа к фоновым условиям, где содержание сернистого ангидрида составляет 50–60 мкг/м³. Это подтверждает результаты [16–21], что SO₂ может десятками часов находиться в шлейфе. Таким образом, в этом полете удалось впервые за 15 лет зафиксировать в шлейфе переход газ–аэрозоль. Переходный процесс, отраженный на рис. 3, проявился в концентрации оксида и диоксида углерода, характеристиках аэрозоля.

Помимо прямых измерений в ходе полета отбирались пробы аэрозоля, по которым можно проследить переход газ–частица. Маршруты выбирались перпендикулярно направлению ветра и проходили на различном удалении от источника (рис. 4).

Из рис. 4 видно, что в шлейфе, по мере удаления от источника, происходит уменьшение массовой доли кальция и увеличение доли сульфатов: с 64 до 9 и с 4 до 51% соответственно.

Выше слоя инверсии, как показали измерения, изменение содержания примесей было обратным: чем дальше от источника, тем больше доля кальция и тем меньше доля всех остальных. Так, на высоте 800 м его вклад в суммарный аэрозоль возрастает с 56% на удалении 121 км до 87% на дистанции

142 км от источника. На высоте 1200 м вклад кальция на удалении 10 км составляет 69% и возрастает до 94% на расстоянии 35 км.

Такое разное поведение основных составляющих аэрозоля можно объяснить двумя обстоятельствами. В шлейфе, где высока концентрация SO₂, идет интенсивно его конденсация в кислоты H₂SO₃ и H₂SO₄, которые взаимодействуют, по-видимому, с кальцием. В результате образуются аэрозольные частицы, которые оседают из потока. Выше инверсии, где концентрация SO₂ приближается к фоновой, таких процессов не наблюдается. Сам же кальций, скорее всего попавший в атмосферу при сгорании топлива, содержится в микродисперсной фракции, которая хорошо переносится в атмосфере и почти не оседает. По крайней мере, хорошо известно, что аэрозоль, возникший в процессе горения, находится в диапазоне размеров частиц 20–180 нм [23].

Возможно также, что частицы, содержащие кальций, имеют двухмодальное распределение. Одна мода содержит микродисперсные частицы, а другая – субмикронные или грубодисперсные. Однако это предположение можно проверить лишь экспериментально, для чего нужны повторный отбор проб и анализ на оптическом и электронном микроскопах.

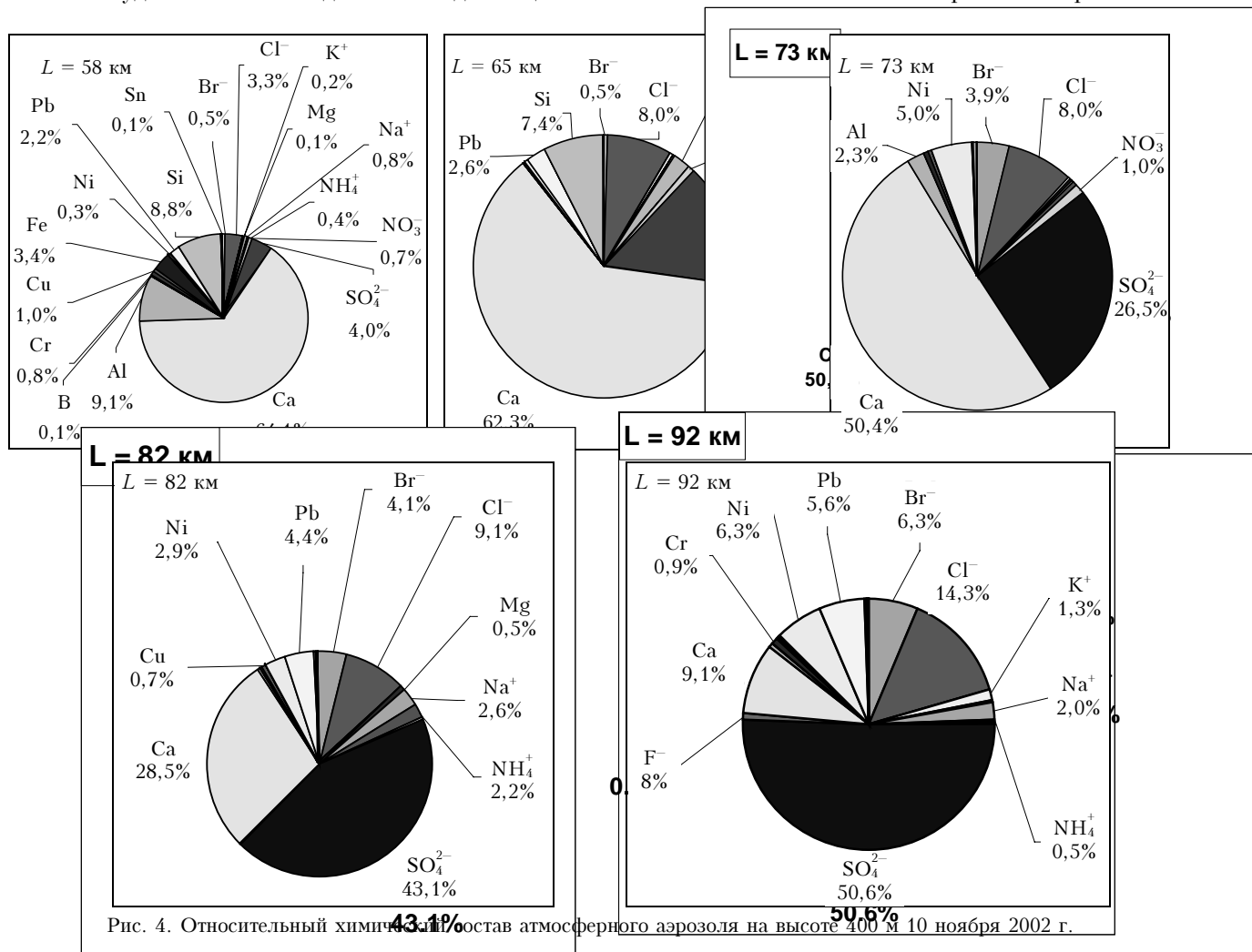


Рис. 4. Относительный химический состав атмосферного аэрозоля на высоте 400 м 10 ноября 2002 г.

Поскольку кальций явно доминирует в составе аэрозоля, на рис. 5 приведен относительный химический состав аэрозоля, где он исключен.

Из рис. 5 видно, что отмеченная выше тенденция увеличения доли сульфатов в аэрозоле, по мере удаления от источника, на высоте 400 м сохраняется. После кальция сульфат-ион является основным компонентом в шлейфе.

Таким образом, из проведенного эксперимента следует, что концентрация диоксида серы остается

высокой в городском шлейфе на значительном расстоянии, При этом на удалении свыше 50 км от источника начинается интенсивный переход газ→частица, сопровождаемый изменением химического состава аэрозоля. В результате доминирующим становится сульфатный аэрозоль. Выше инверсии в составе частиц доминируют кальций и хлор, происхождение которого, возможно, морское.

Очевидно, что если переход газ – частица происходит путем ядрообразования, а не конденсации

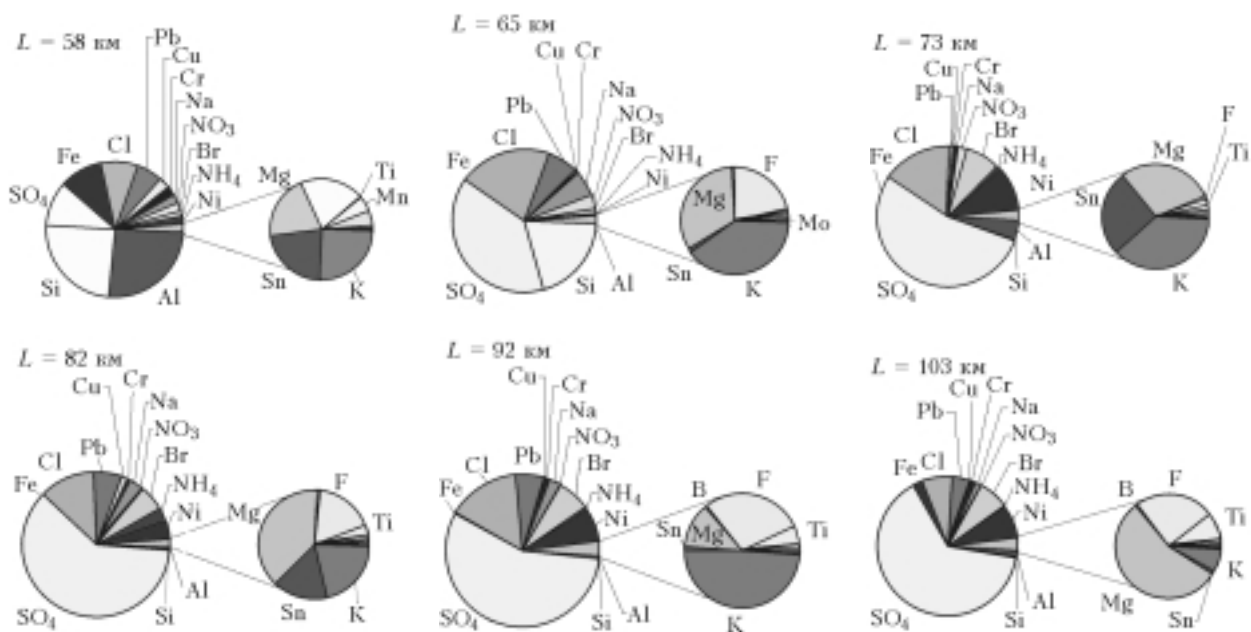


Рис. 5. Относительный химический состав аэрозоля без кальция на высоте 400 м 10 ноября 2002 г. (индексы зарядов ионов опущены)

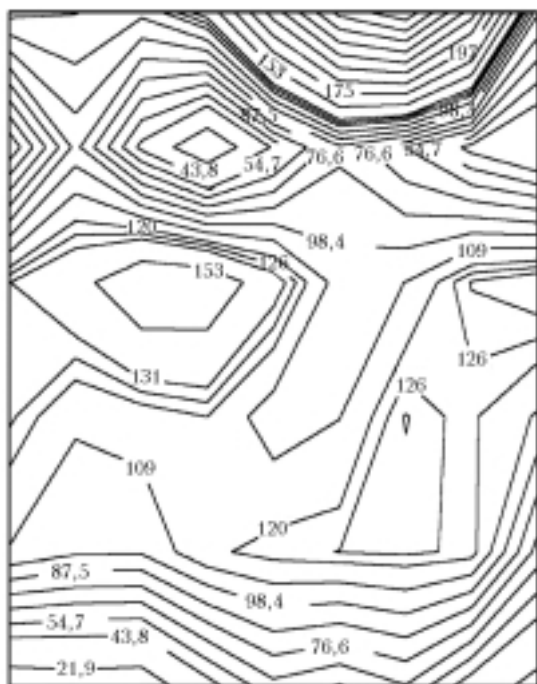


Рис. 6. Распределение нуклеационной моды на высоте 400 м, см⁻³ (координаты площадки см. на рис. 3)

паров на уже существующих частицах, то это должно проявляться в увеличении концентрации нуклеационной моды. Расчеты, выполненные в [24], и эксперименты [25] показывают, что скорости образования частиц размером 1 и 10 нм могут отличаться на порядок. Для проверки этих положений обратимся к рис. 6, на котором показано распределение нуклеационной моды в пределах изучаемого квадрата.

Из рис. 6 видно, что зона наивысшей концентрации наночастиц совпадает с той же областью пространства, в которой наблюдалась наибольшая концентрация сернистого ангидрида (см. рис. 3). Вне этой области концентрации наночастиц и сернистого ангидрида приближаются к фоновым. Следовательно, генерация новых частиц происходит в основном из SO₂, где его содержание повышено.

Повышение концентрации нуклеационной моды должно усиливать коагуляционные процессы. Это видно из рис. 7, на котором приведено распределение аккумуляционной моды, образующейся из наночастиц именно в ходе таких процессов. Как видно из сопоставления рис. 6 и 7, зоны максимальных концентраций обеих мод совпадают. Это означает, что в данной части шлейфа одновременно идут и нуклеационные, и коагуляционные процессы.

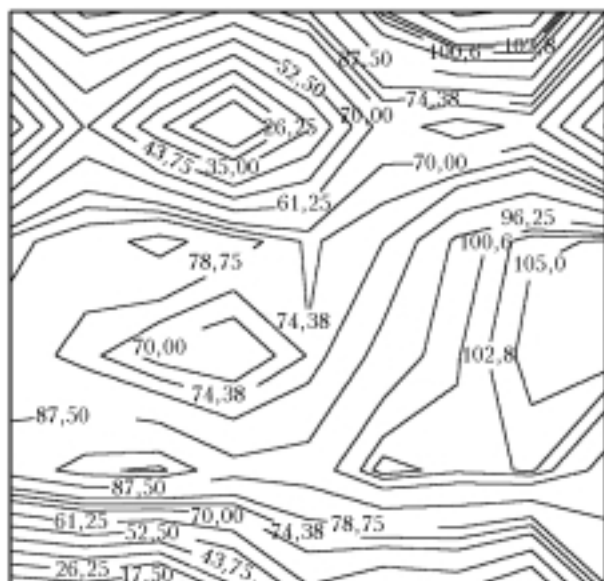


Рис. 7. Распределение аккумуляционной моды на высоте 400 м, см^{-3} (координаты площадки см. на рис. 3)

Если бы все имеющиеся и вновь образовавшиеся частицы сохранялись в шлейфе, то это бы отразилось на концентрации субмикронных частиц, наиболее долгоживущих в атмосфере. Чтобы проверить такое предположение, обратимся к рис. 8.

Субмикронная фракция (в нашем случае это не только вновь образовавшийся аэрозоль) также близка к распределению SO_2 . Об этом можно судить по рис. 8.

Концентрация ее в шлейфе невелика – $2,4 \text{ см}^{-3}$. Вне шлейфа – $0,8 \text{ см}^{-3}$. По сравнению с CO и SO_2 , превышение концентрации которых в шлейфе составляет 5–7 раз, у субмикронной фракции всего 3 раза. Близкие характеристики по соотношениям получены и в работе [26]. Для SO_2 здесь приводится величина 6,2, для CO – 1,5. Учитывая, что в счетную фракцию входит и грубодисперсная фракция ($d > 1 \text{ мкм}$), такое различие в поведении

микродисперсной и субмикронной фракций в шлейфе может означать, что часть частиц, достигших размера 1 мкм и более, оседает.

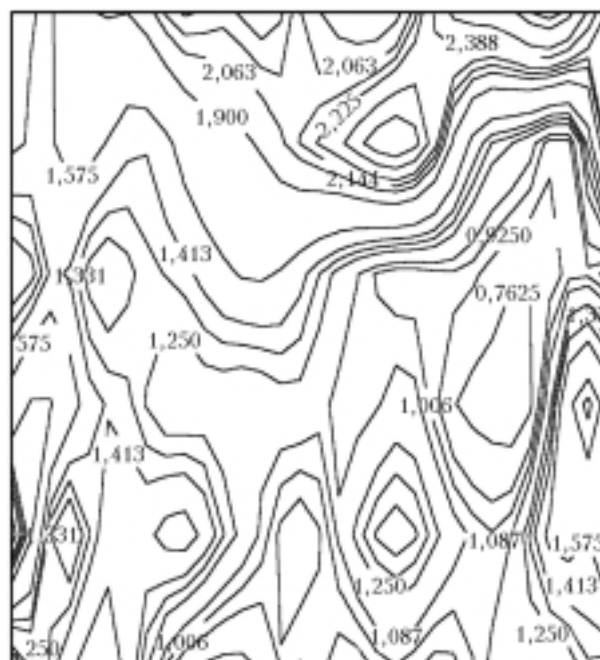


Рис. 8. Распределение субмикронной фракции аэрозоля ($d \geq 0,4 \text{ мкм}$) на высоте 400 м 10 ноября 2002 г., см^{-3} (координаты площадки см. на рис. 3)

Приведенные выше данные позволяют оценить возможные потоки химических составляющих атмосферного аэрозоля к подстилающей поверхности. Для расчета используем результаты, полученные на высоте 400 м в шлейфе, где начались интенсивный процесс аэрозолеобразования и выход отдельных частиц из шлейфа вниз. Исходные данные и результаты расчетов представлены в табл. 5, где в верхней части приведены концентрации элементов и ионов в начале и в конце процесса перехода газ–частица. Причем начало и минимум «привязаны» к удалению от города.

Таблица 5

Концентрации ($\text{мкг}/\text{м}^3$) примесей в шлейфе до и в конце аэрозолеобразования и оценка объемов осаждения										
Удаление от источника, км	Cu	Ca	Al	Si	Pb	Cr	Ni	SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-
58	0,738	45,715	6,466	6,228	1,553	0,580				
65			0,006			0,109			0,523	4,092
73				0,700					0,256	
82							1,258	10,408		
92		1,269								
103	0,021				0,397		0,790	6,283		0,716
Разность концентраций	0,717	44,446	6,460	5,528	1,156	0,470	0,468	4,125	0,266	3,376
Объем, км^3	10530	7956	1638	3510	10530	1638	4914	4914	1972	8892
Масса, кг	7552	353613	10582	19404	12170	770	2300	20270	525	30023
Площадь, км^2	2700	2040	420	900	2700	420	600	600	480	2280
Время, с	8100	6480	1080	2700	8100	1080	3780	3780	1440	6840
Поток, $\text{г}/(\text{км}^2 \cdot \text{с})$	0,36	26,75	23,33	8,01	0,56	1,70	1,01	8,94	0,76	1,93
Поток, $\text{т}/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$	10,89	843,59	735,70	251,80	17,56	53,57	31,98	281,85	23,98	60,71

Во второй части табл. 5 приведены: объем, в котором шел процесс оседания частиц; площадь, на которой это происходило, и время осаждения. Рассчитывались общая масса вышедшего из шлейфа вещества, удельный и годовой потоки к поверхности земли. Последнюю строку следует принимать условной, так как она базируется на данных кратковременного эксперимента. Площадь рассчитывалась исходя из того, что ширина шлейфа была около 60 км, а длина определялась по началу и окончанию процесса перехода частиц из газообразного состояния в аэрозольное. Вертикальная протяженность определялась по лидарным данным и в среднем составила 60 м.

В особых комментариях результаты расчета не нуждаются. Отметим только, что оседание сульфата не столь велико, как можно ожидать. Но процесс образования SO_4^{2-} , как видно из табл. 5, максимален на удалении 82 км. Помимо оседания сульфатов, данные табл. 5 выявляют значительные потоки зольных компонентов Al, Si, Са. Относительно велики значения осаждения свинца. Возможно, он используется в технологиях на предприятиях Норильска.

Приведенная в табл. 5 оценка по осаждению сульфатов значительно больше величины, полученной ранее в среднем для территории бывшего СССР [27], и близка к оценкам, которые сделаны для регионов с высокими объемами выбросов диоксида серы [28,29], хотя и превышает их в 1,5–2 раза.

Заключение

В ходе самолетного эксперимента впервые за 15-летний период проведения подобных исследований удалось зафиксировать момент перехода газ-частица в шлейфе выбросов промышленного центра. Этот процесс начался через 6 ч после поступления примесей в атмосферу и происходил на расстоянии 50 км от момента начала конденсации. Основным газом-предшественником являлся сернистый ангидрид. Выполненные оценки показали, что осаждение образовавшихся в шлейфе сульфатов может достигать величины $281 \text{ т}/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$ в районе, где этот процесс осуществляется.

Работа выполнена по заказу Института леса СО РАН при поддержке Междисциплинарного проекта СО РАН № 130 «Экология промышленных городов Сибири» и грантов РФФИ № 04-05-08010, 04-05-64559.

1. Белан Б.Д. Самолетное экологическое зондирование атмосферы // Оптика атмосфер. и океана. 1993. Т. 6. № 2. С. 205–222.
2. Безуглая Э.Ю., Расторгуева Г.П., Смирнова И.В. Чем дышит промышленный город. Л.: Гидрометеондат, 1991. 256 с.
3. Состояние окружающей природной среды в Сибири. Новосибирск: СО РАН, 1996. 112 с.
4. Савченко В.А., Новицкий М.А. Современный климат Норильска. М.: ИПФ «ГАРТ», 2003. 168 с.

5. Состояние загрязнения атмосферы в городах на территории России в 1997 г. СПб.: Гидрометеондат, 1999. 218 с.
6. Состояние загрязнения атмосферы в городах на территории России в 1998 г. СПб.: Гидрометеондат, 1999. 131 с.
7. Состояние загрязнения атмосферы в городах на территории России в 1999 г. СПб.: Гидрометеондат, 2000. 240 с.
8. Состояние загрязнения атмосферы в городах на территории России в 2000 г. СПб.: Гидрометеондат, 2001. 182 с.
9. Мазур И.И., Молдаванов О.И. Курс инженерной экологии. М.: Высш. шк., 2001. 510 с.
10. Зуев В.Е., Белан Б.Д., Кабанов Д.М., Ковалевский В.К., Лукьянов О.Ю., Мелешкин В.Е., Микушев М.К., Панченко М.В., Пеннер И.Э., Покровский Е.В., Сакерин С.М., Терпугова С.А., Толмачев Г.Н., Тумаков А.Г., Шаманаев В.С., Щербатов А.И. Самолет-лаборатория Ан-30 «Оптик-Э» для экологических исследований // Оптика атмосфер. и океана. 1992. Т. 5. № 10. С. 1012–1021.
11. Белан Б.Д., Гришин А.И., Матвиенко Г.Г., Самохвалов И.В. Пространственная изменчивость характеристик атмосферного аэрозоля. Новосибирск: Наука, 1989. 152 с.
12. Ежегодные данные по химическому составу атмосферных осадков 1991–1995 гг. СПб.: Гидрометеондат, 1998. 67 с.
13. Обзор фоновое состояние окружающей среды на территории стран СНГ за 2000 г. СПб.: Гидрометеондат, 2001. 49 с.
14. Рябошапка А.Г. Дальний атмосферный перенос и атмосферные балансы соединений серы, азота и ртути: Автореф. дис. ... д.ф.-м.н. М.: ИГКЭ, 2002. 29 с.
15. Белан Б.Д. К вопросу о применении самолета-лаборатории для экологического контроля состояния воздушного бассейна города // Тезисы докл. III Междунар. симп. «Оптика атмосферы и океана». Томск, 1996. С. 237.
16. Израэль Ю.А., Назаров И.М., Прессман А.Я., Ровинский Ф.Я., Рябошапка А.Г. Кислотные дожди. Л.: Гидрометеондат, 1989. 269 с.
17. Рябошапка А.Г. Модель химических превращений и выведения из атмосферы соединений серы и азота при дальнем атмосферном переносе // Тр. ИПГ. 1988. Вып. 71. С. 25–32.
18. Benkovitz C.M., Schwartz S.E., Jensen M.P., Miller M.A., Easter R.C., Bates T.S. Modeling atmospheric sulfur over the Northern Hemisphere during the Aerosol Characterization Experiment 2 experimental period // J. Geophys. Res. D. 2004. V. 109. N 22. D22207.
19. 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. D15S08.
20. Park R.J., Jacob D.J., Field B.D., Yantosca R.M., Chin M. Natural and transboundary pollution influences on sulfate-nitrate-ammonium aerosols in the United States: implications for policy // J. Geophys. Res. D. 2004. V. 109. D15204.
21. Laaksonen A., Talanquer V., Oxtoby D.W. Nucleation: Measurements, Theory, and Atmospheric Applications. // Annu. Rev. Phys. Chem. 1995. V. 46. P. 489–524.
22. Хромов С.П. Основы синоптической метеорологии. Л.: Гидрометеондат, 1948. 700 с.

23. *Савенко С.В.* Природные и антропогенные источники загрязнения атмосферы. М.: ВИНТИ. Итоги науки и техники. Сер. Охрана природы и воспроизводство природных ресурсов. 1991. Т. 31. 212 с.
24. *Петрова И.В.* Исследование процессов образования и трансформации сернокислотных аэрозолей // Проблемы физики атмосферы. 1997. Вып. 20. С. 5–24.
25. *Gupta A., Tang D., McMurry P.H.* Growth of Monodisperse, Submicron Aerosol Particles Exposed to SO₂, H₂O₂, and NH₃ // *J. Atmos. Chem.* 1995. V. 20. N 2. P. 117–139.
26. *Jordan C.E., Dibb J.E., Andersen B.E., Fuelberg H.E.* Uptake of nitrate and sulfate on dust aerosols during TRACE-P // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 21. P. 8817.
27. *Василенко В., Назаров И., Фридман Ш.* Атмосферные выпадения сульфатов и нитратов в СССР // Проблемы фонового мониторинга состояния природной среды. 1989. № 7. С. 25–31.
28. *Моложников Е.В., Кучменко Е.В.* Оценка некоторых характеристик образования и выпадения сульфатов в городах Прибайкалья // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17. № 5–6. С. 418–422.
29. *Fournier N., Dore A.J., Vieno M., Weston K.J., Dragonis U., Sutton M.A.* Modelling the deposition of atmospheric oxidized nitrogen and sulphur to the United Kingdom using a multi-layer long-range transport model // *Atmos. Environ.* 2004. V. 38. N 5. P. 683–694.

M.Yu. Arshinov, B.D. Belan, D.K. Davydov, G.A. Ivlev, V.A. Pirogov, T.M. Rasskazchikova, D.V. Simonenkov, G.N. Tolmachev, A.V. Fofonov. **Experimental investigation of pollution transformation in industrial plumes.**

The aim of this work was to determine the extent and character of the influence of the Norilsk industrial center on the regional air basin. This problem was solved with the aid of the Optik-E flying laboratory (An-30 aircraft). It turned out that in the urban column the pollutants are mostly transported in the gaseous form, because the aerosol fraction deposits in the form of coarse particles just near the source. Gaseous pollutants spread to significant distances under the inversion layer (in the 300–400 m layer during the experiment). During the airborne experiment, we succeeded, for the first time for 15 years, in observing the gas-to-particle transition in the plume emitted by an industrial center. This process started 6 hours after the pollutants were emitted into the atmosphere and proceeded at the distance of 50 km from the point where the condensation began. Sulfurous anhydride was the main precursor gas. The estimates have shown that the deposition of sulfates formed in the plume can achieve 281 t/km² in the region, where this process proceeds.