

УДК 551.506 + 551.510.41 + 551.510.42

Оценка выбросов диоксида серы в атмосферу Норильского промышленного района

В.Ф. Рапута¹, Д.В. Симоненков², Б.Д. Белан², Т.В. Ярославцева^{3*}

¹Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН
630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6

²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

³Новосибирский институт гигиены
630108, Новосибирск, ул. Пархоменко, 7

Поступила в редакцию 12.02.2019 г.

Проведен численный анализ данных самолетного зондирования шлейфа выносов примесей в летней атмосфере Норильского промышленного района. Построена двухпараметрическая модель численного восстановления концентраций примеси в поперечных к шлейфу направлениях, на ее основе выполнены оценки нижних границ эмиссии диоксида серы, соответствующих различным моментам времени выброса. Установлена значительная вариабельность оценок эмиссии вследствие нестационарности поступлений диоксида серы в атмосферу. Получена оценка средней эмиссии SO₂ в атмосферу, которая составила 1,86 млн т/год, что близко к данным государственной статистики в рассматриваемый период.

Ключевые слова: атмосфера, диоксид серы, дымовой шлейф, эмиссия примеси, модель оценивания; atmosphere, sulfur dioxide, smoke plume, emission of impurity, estimation model.

Введение

Производство меди и никеля на Норильском горно-металлургическом комбинате (НГМК) сопровождается выбросами в атмосферу сернистых соединений и тяжелых металлов в больших количествах. Около 96% серы поступает в атмосферу в виде SO₂, остальные 4% составляют сульфаты, H₂S, CS₂, COS и другие соединения. На долю предприятий НГМК приходится 25% российских промышленных выбросов SO₂. В 2009 г. «Норильский никель» выбросил в атмосферу около 979 тыс. т серы [1].

В результате производственной деятельности предприятий НГМК экологическая ситуация в регионе крайне неблагоприятна. Несмотря на предоставляемые данные о сокращении выбросов SO₂, в атмосферном воздухе Норильского промышленного района (НПР) до сих пор фиксируются концентрации SO₂ значительно выше ПДК. Среднемесячное содержание диоксида серы в Норильске в несколько десятков раз превышает фоновый уровень в регионе [1]. Это обуславливает необходимость разработки эффективных методов контроля состояния окружающей среды в районе г. Норильска.

Для численного прогноза процессов атмосферного загрязнения территории НПР можно применять

модели гидротермодинамики атмосферы различной степени детализации [2–6]. Они позволяют рассчитать текущие поля ветра, температуры, влажности, концентрации примесей в пограничном слое атмосферы. В качестве входных данных прямого моделирования процессов загрязнения используется информация о текущей эмиссии примесей, характеристиках дисперсного состава, коэффициентах трансформации и т.д. В частности, необходимо учитывать зависимость выбросов в атмосферу сернистых соединений от протекающих технологических процессов выплавки меди и никеля (нестационарность) [1].

Для контроля загрязнения атмосферы НПР требуется использование и существенное развитие различных систем мониторинга состояния окружающей среды, включая как исследование естественных природных накопителей (снеговой покров, лишайники и т.п.), так и измерения с помощью приборов наземного и самолетного базирования [7–11]. Для получения масштабной оперативной информации особый интерес представляют методы самолетного зондирования атмосферы. Для численной интерпретации данных мониторинга следует привлекать уравнения переноса и диффузии примесей, использовать свойства их решений в рамках соответствующих постановок обратных задач [11–13].

Цель настоящей работы – оценка динамики эмиссии диоксида серы на основе результатов комплексного зондирования летней атмосферы НПР с использованием самолета-лаборатории Ан-30 «Оптик-Э» [14].

* Владимир Федотович Рапута (raputa@sscc.ru); Денис Валентинович Симоненков (simon@iao.ru); Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru); Татьяна Владимировна Ярославцева (tani-ta@list.ru).

1. Объекты, условия и методы исследований

Согласно данным Государственного доклада [15] в 2004 г. предприятия Заполярного филиала ОАО «ГМК «Норильский никель» в НПР выбросили в атмосферу 2068 тыс. т газо-аэрозольных продуктов, из них диоксида серы — почти 2 млн т. Основные источники выбросов SO₂ — три предприятия Заполярного филиала: медный и никелевый заводы на окраинах Норильска и Надеждинский металлургический комбинат (НМК) в районе поселка городского типа Кайеркан между г. Норильском и его аэропортом Алыкель. В прошлом десятилетии распределение среднегодовых выбросов SO₂ от этих трех источников составляло 34, 25 и 41% соответственно [1].

В полете 13.08.2004 г. ставилась задача рассмотреть, как ведут себя примеси внутри шлейфа от основных источников выбросов при его распространении в атмосфере. Полет проводился по схеме, изображенной на рис. 1. На нем линиями с разными значками показаны участки, на которых производился отбор проб газов и аэрозоля. Идея эксперимента заключалась в том, чтобы исследовать структуру шлейфа, измерить вариации концентраций газовых примесей, в частности диоксида серы, а также отобразить пробы внутри шлейфа на разном удалении от источников выбросов.

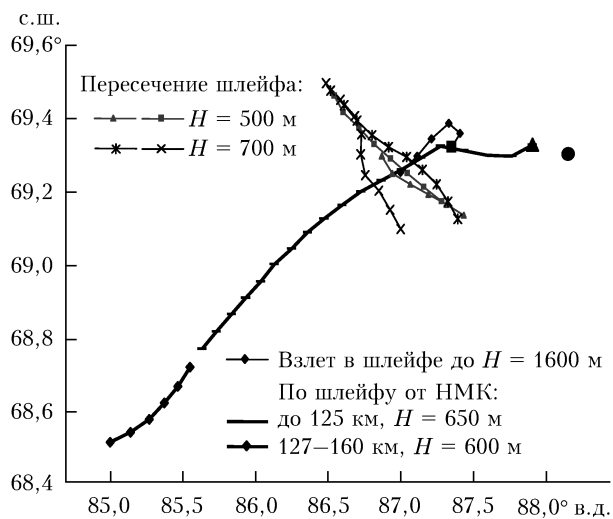


Рис. 1. Схема полета самолета-лаборатории Ан-30 «Оптик-Э» с последующими участками пробоотбора примесей в области шлейфа 13.08.2004 г.: ● — Норильск (медный и никелевый заводы); ▲ — НМК; ■ — аэропорт Алыкель

Погода 13.08.2004 г. была обусловлена образованной двумя циклонами седловиной. Один циклон располагался в районе Северной Земли и постепенно заполнялся, а второй — в среднем течении р. Таз и, практически не меняя интенсивности, перемещался на восток со скоростью около 30 км/ч. В этот день наблюдалась ясная погода со слабым ветром восточного и северо-восточного направлений, ско-

рость в приземном и пограничном слоях атмосферы не превышала 3 и 6 м/с соответственно.

На рис. 2 представлен высотный сглаженный профиль (с минутным осреднением) изменения концентрации диоксида серы при взлете самолета-лаборатории (СМЛ) в аэропорту Алыкель, который находился в этот день в центре шлейфа предприятий Норильска и НМК. Видно, что высокая концентрация SO₂ порядка 950–980 мкг/м³ наблюдалась в районе аэропорта до высот 600–700 м. После взлета СМЛ произвел несколько поперечных проходов через шлейф на высотах 500 и 700 м на удалении 35–45 км от основного источника эмиссии — НМК. Ход концентрации SO₂ для двух срезов на этих высотах представлен и анализируется ниже.

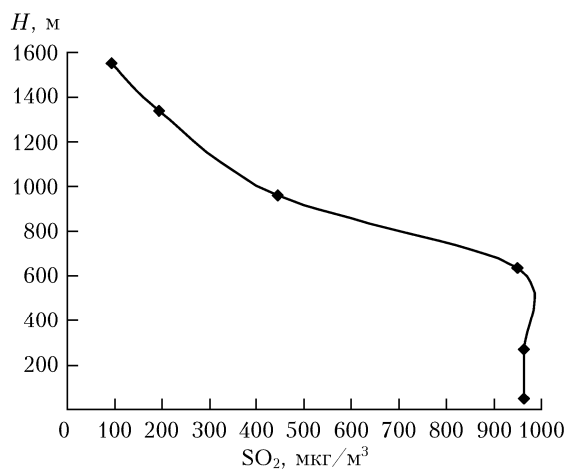
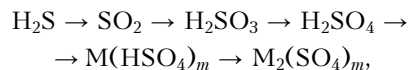


Рис. 2. Высотный профиль концентрации SO₂ в шлейфе, сглаженный с минутным осреднением. Аэропорт Алыкель 13.08.2004 г.

Орография местности позволила провести продольное исследование шлейфа от НМК на расстояниях до 160 км от него и высотах не ниже 600 м. Структура шлейфа с точки зрения концентрационных параметров диоксида серы рассматривается в разд. 3.

Методика эксперимента, характеристики газоанализаторов и методов количественного физико-химического анализа аэрозольного вещества на фильтрах подробно приведены в пионерном описании данного летного эксперимента [14]. Там же отмечено, что основной вклад в загрязнение воздуха НПР дают выбросы от добычи и переработки сульфидных руд цветных металлов. Обжиг руды приводит к окислению сульфидной серы до газообразного сернистого ангидрида, который составляет 96% от массы общих выбросов. То есть главными компонентами, выносимыми из города по атмосферному каналу, являются кислотные оксиды серы в газовой фазе. Согласно теории [16–18] процессы химической трансформации серы происходят по схеме:



где M^{m+} — катион любого металла.

2. Модели оценивания эмиссии источника и полей концентраций в шлейфе выброса

Количество выбрасываемых крупными предприятиями загрязняющих веществ в атмосферу достаточно точно определяется по топливному и материальному балансу. Однако мелкие предприятия и неорганизованные источники выбросов могут вносить заметный вклад в загрязнение атмосферы города и окружающего его пространства. Кроме того, выбрасываемые в ходе химических и фотохимических реакций и ряда других процессов соединения могут трансформироваться в другие, более токсичные.

В общем случае для оценивания эмиссии примеси в атмосферу используется достаточно трудоемкий метод построения вертикальных разрезов атмосферы с наветренной и подветренной сторон [19, 20]. С наветренной и подветренной сторон от города в вертикальной плоскости необходимо выполнение полетов и измерений концентраций примесей в достаточно большом диапазоне высот. Сами плоскости следует выбирать перпендикулярно основному потоку по данным авиаметеостанции и картам барической топографии. Затем проводится интерполяция данных измерений и расчет эмиссии атмосферных примесей.

В случае одного достаточно крупного источника выбросов загрязняющих веществ оценивание эмиссии можно оптимизировать, используя свойства переноса и диффузии примесей в пограничном слое атмосферы. На удалении от источника $\sim 7-10$ км происходит выравнивание концентрации примеси по высоте в слое перемешивания, и для ее расчета применяется формула [13]:

$$q(x, y, z) = \frac{Qe^{-\frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2}}}{\sqrt{2\pi}Uh\sigma_y}. \quad (1)$$

Здесь ось x ориентирована в направлении ветра; ось y – в поперечном направлении; Q – мощность источника примеси; y_0 – положение оси шлейфа; $\sigma_y(x)$ – коэффициент поперечной дисперсии; U, h – средняя скорость ветра и высота слоя перемешивания.

Интегрируя соотношение (1) по y , получим следующее выражение для оценивания эмиссии примеси:

$$Q = hU \int_{-\infty}^{\infty} q(x, y, z) dy. \quad (2)$$

Оно дает возможность по известным параметрам $h, U, q(x_0, y, z)$ для каждого фиксированного $x = x_0$ оценить величину эмиссии.

Процедуру определения величины $q(x_0, y, z)$ можно упростить, если положить $\sigma_y(x) = k_0x$ [13]. Тогда с учетом (1):

$$q(x, y, z, \bar{\theta}) = \frac{\theta_1 e^{-\frac{\theta_2(y-\theta_3)^2}{x^2}}}{x}, \quad (3)$$

где $\theta_1 = \frac{Q}{\sqrt{2\pi}Uhk_0}$, $\theta_2 = \frac{1}{2k_0^2}$, $\theta_3 = y_0$, k_0 – коэффициент поперечной диффузии.

Из свойств функции (3) вытекает, что для каждого x ее максимум достигается на оси шлейфа. Оценку параметров $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ в регрессионной зависимости (3) находим по данным измерений концентраций в поперечном шлейфу направлением методом наименьших квадратов [21].

Замечание 1. Формула (2) может быть использована и при нестационарной эмиссии примеси. В этом случае концентрация $q(t, x_0, y, z)$ будет соответствовать моменту времени $t' = t - \frac{x_0}{U}$ выброса

примеси из источника.

Замечание 2. Если положение оси шлейфа известно, то параметры θ_1, θ_2 можно оценить в явном виде по концентрациям, измеренным в двух точках, расположенных на заданной высоте в поперечном шлейфу направлении, по формулам

$$\theta_1 = x_0 p_1 \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{-\frac{y_1^2}{y_2^2 - y_1^2}}, \quad \theta_2 = \frac{x_0^2}{y_2^2 - y_1^2} \ln \frac{p_1}{p_2}, \quad (4)$$

где p_1, p_2 – измеренные концентрации примеси в точках y_1, y_2 соответственно.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 3 приведены результаты численного восстановления концентраций SO_2 на основе зависимости (3), (4) при $\theta_2 = 0$ по измерениям на двух опорных площадках. Из анализа рис. 3 вытекает, что в рассматриваемом диапазоне расстояний модель оценивания вполне адекватно описывает процессы поперечного расширения шлейфа, что позволяет взять ее за основу для оценки эмиссии. В летних условиях экспериментально определенная концентрация SO_2 в поперечном сечении шлейфа хорошо соответствует теоретическим зависимостям. Это позволяет адаптировать данные измерений в продольном сечении шлейфа в предположении, что СМЛ всегда находился в рамках коридора, близкого к оси шлейфа.

На рис. 4, а представлен сглаженный профиль концентрации SO_2 , измеренный при продольном полете в шлейфе. Анализ показывает, что изменения концентрации с удалением от источника происходят достаточно сложным образом. Они могут быть обусловлены рядом причин: поперечным расширением шлейфа по мере удаления от источника, процессами трансформации в атмосфере и нестационарностью эмиссии SO_2 . Кроме того, следует учитывать возможные отклонения курса самолета от оси шлейфа.

В рассматриваемом диапазоне расстояний вполне надежной характеристикой распространения пассивной примеси от непрерывного стационарного источника является постоянство величины [22]:

$$\theta = q_{oc}(x_0) \cdot x_0, \quad (5)$$

где $q_{oc}(x_0)$ – осевая концентрация в шлейфе на расстоянии x_0 от источника.

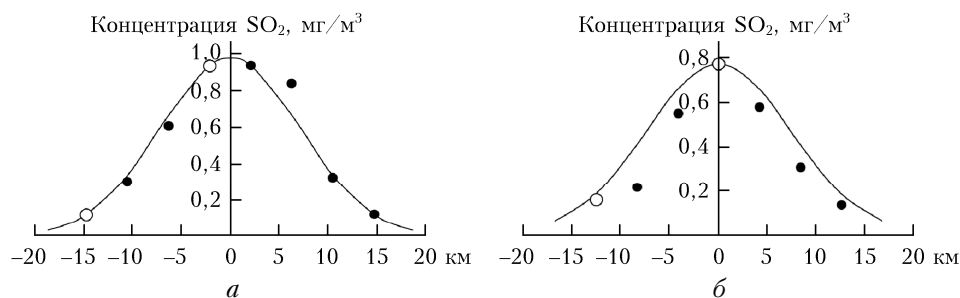


Рис. 3. Измеренная и восстановленная по зависимости (3) концентрация SO_2 в поперечном сечении шлейфа сноса в летнем эксперименте: $H = 500$ м, расстояние от основного источника 35 км (а); $H = 700$ м, расстояние 45 км (б); \circ , \bullet – опорные и контрольные точки измерений

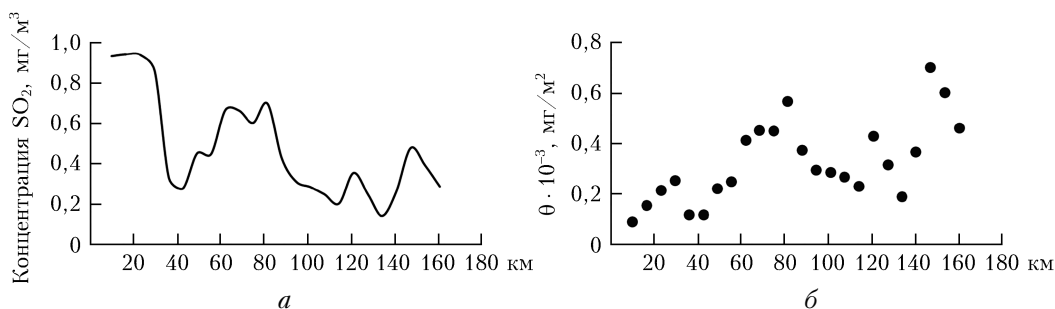


Рис. 4. Измеренная концентрация SO_2 вдоль шлейфа сноса примесей (а); значение параметра θ на площадках измерений SO_2 в шлейфе (б)

На рис. 4, б представлены значения θ на площадках измерений концентрации SO_2 . Из анализа рисунка следует, что участков относительного постоянства величины θ сравнительно не много, что подчеркивает трудности оценивания текущих значений эмиссии SO_2 от источников НГМК. Тем не менее можно рассмотреть задачу оценивания нижних границ эмиссии SO_2 по данным его продольных измерений в шлейфе.

Для решения этой задачи воспользуемся соотношениями (2), (3), результатами продольных измерений и численного восстановления концентраций SO_2 в поперечном сечении шлейфа, представленными на рис. 3. Также следует учесть возможные трансформации части SO_2 по мере удаления от источника и отклонения в полете от оси шлейфа, которые приводят к снижению измеряемой концентрации. В таблице приведены результаты оценивания нижних границ выбросов SO_2 по измерениям на различных расстояниях от источника.

Из анализа таблицы следует, что колебания оценок эмиссии SO_2 достигают почти порядка величины. В отдельные периоды времени эмиссия может быть очень высокой (расстояния 81,4; 147,2 км) или снижаться до минимума (расстояния 42,6; 134,1 км.) Присутствуют диапазоны расстояний, где эмиссия стационарна: 36,1–42,6 км, 68,4–74,9 км, 94,5–101 км. Высокие концентрации на расстояниях более 80 км указывают на существенную нестационарность эмиссии SO_2 , которая связана с технологиями производственных процессов [1]. Осредненная по таблице эмиссия SO_2 , приведенная

Оценки эмиссии SO_2 по данным измерений концентраций в шлейфе выброса

Расстояние от источника, км	Оценка эмиссии, кг/с	Расстояние от источника, км	Оценка эмиссии, кг/с
9,8	16,5	88,0	67,9
16,4	28,0	94,5	53,3
23,0	39,1	101,0	52,0
29,6	45,9	107,5	48,6
36,1	21,5	114,2	41,9
42,6	21,4	120,9	77,6
49,1	40,0	127,6	57,1
55,6	45,1	134,1	34,4
62,0	74,6	140,5	66,2
68,4	81,9	147,2	127,0
74,9	81,5	153,7	109,1
81,4	102,7	160,5	83,4

к годовому выбросу, составляет 1,86 млн т/год, что вполне соответствует официальным статистическим данным.

Заключение

На основе стационарных моделей оценивания регионального переноса примесей выполнен численный анализ данных самолетного зондирования загрязнения летней атмосферы Норильского промышленного района. Показано, что на достаточных удалениях от источников построенная двухпараметрическая модель вполне адекватно описывает

изменение полей средних концентраций диоксида серы в поперечных к шлейфу выноса примесей направлениях. Это позволяет по ограниченной экспериментальной информации определять суммарный вынос примеси через поперечное сечение шлейфа.

С использованием данных маршрутных измерений вдоль шлейфа выполнен анализ изменчивости уровней концентраций и получены оценки нижних границ эмиссии диоксида серы, соответствующих различным моментам времени выброса. Значительная вариабельность оценок эмиссии указывает на нестационарность поступлений диоксида серы в атмосферу. Оценка же средней эмиссии вполне сопоставима с данными официальной статистики. Для получения более полной информации о структуре и объемах атмосферных выбросов НГМК необходимо проведение дальнейших экспериментальных исследований.

Работа выполнена в рамках Госзадания (проекты № 0315-2019-0004 и 0368-2018-0011) при частичной поддержке программы президиума РАН № 51 «Изменение климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования» (проект № 0315-2018-0016) и РФФИ и правительства Новосибирской обл. (проект № 19-47-540008).

1. Горно-металлургическая компания «Норильский никель» (влияние на окружающую среду и здоровье людей) // Докл. объединения Bellona. 2010. 71 с. URL: www.bellona.ru (last access: 12.01.2019).
2. Алоян А.Е., Ермаков А.Н., Арутюнян В.О., Загайнов В.А. Динамика газовых примесей и аэрозолей в атмосфере с учетом гетерогенных процессов // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2010. Т. 46, № 5. С. 657–671.
3. Шлычков В.А., Мальбахов В.М., Леженин А.А. Численное моделирование атмосферной циркуляции и переноса загрязняющих примесей в Норильской долине // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18, № 5–6. С. 490–496.
4. Оболкин В.А., Потемкин В.Л., Макухин В.Л., Ходжер Т.В., Чипанина Е.В. Дальний перенос шлейфов атмосферных выбросов региональных угольных ТЭЦ на акваторию Южного Байкала // Оптика атмосфер. и океана. 2017. Т. 30, № 1. С. 60–65; Obolkin V.A., Potemkin V.L., Makukhin V.L., Khodzher T.V., Chipanina E.V. Long-range transport of plumes of atmospheric emissions from regional coal power plants to the South Baikal water basin // Atmos. Ocean. Opt. 2017. V. 30, N 4. P. 360–365
5. Алоян А.Е., Арутюнян В.О., Ермаков А.Н. Математическое моделирование конвективной облачности в полярных регионах // Оптика атмосфер. и океана. 2017. Т. 30, № 3. С. 222–226.
6. Pitovranov S.E., Fedoro V.V., Edwards L.L. Optimal sampler siting for atmospheric tracer experiments taking into account uncertainties in the wind field // Atmos. Environ. 1993. V. 27A, N 7. P. 1053–1059.
7. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Краснов О.А., Рассказчикова Т.М., Симоненков Д.В., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В. Комплексная оценка состояния воздушного бассейна Норильского промышленного района. Ч. 3. Распространение примесей // Оптика атмосфер. и океана. 2006. Т. 19, № 9. С. 798–805.
8. Онуцин А.А., Буренина Т.А., Зубарева О.Н., Трефилова О.В., Данилова И.В. Загрязнение снежного покрова в зоне воздействия предприятий Норильского промышленного района // Сиб. экол. журн. 2014. № 6. С. 1025–1037.
9. Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Nedelec Ph., Paris J.-D. Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В. Вертикальное распределение газовых и аэрозольных примесей воздуха над российским сектором Арктики // Оптика атмосфер. и океана. 2017. Т. 30, № 12. С. 1043–1052; Antokhina O.Yu., Antokhin P.N., Arshinova V.G., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Belan S.B., Davydov D.K., Ilev G.A., Kozlov A.V., Nedelec Ph., Paris J.-D., Rasskazchikova T.M., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Sklyadneva T.K., Tolmachev G.N., Fofonov A.V. Vertical distributions of gaseous and aerosol admixtures in air over the Russian Arctic // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 3. P. 300–310.
10. Лутау В.В., Таловская А.В., Язиков Е.Г., Лончакова А.Д., Третьяков М.И. Оценка пылевого загрязнения территории г. Омска по данным снеговой съемки // Оптика атмосфер. и океана. 2015. Т. 28, № 3. С. 256–259.
11. Антохин П.Н., Гоцаков А.В., Колкер А.Б., Пененко А.В. Сравнение результатов расчетов химико-транспортной модели WRF-Chem с данными самолетных измерений в г. Норильск // Оптика атмосфер. и океана. 2018. Т. 31, № 4. С. 282–287; Antokhin P.N., Gochakov A.V., Kolker A.B., Penenko A.V. Comparison of WRF-CHEM Chemical Transport Model Calculations with Aircraft Measurements in Norilsk // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 4. P. 372–380.
12. Рацута В.Ф., Олькин С.Е., Резникова И.К. Методы численного анализа данных наблюдений регионального загрязнения территорий площадным источником // Оптика атмосфер. и океана. 2008. Т. 21, № 6. С. 558–562.
13. Бызова Н.Л., Гаргер Е.К., Иванов В.Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 278 с.
14. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Пирогов В.А., Рассказчикова Т.М., Симоненков Д.В., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В. Экспериментальное исследование трансформации примесей в шлейфах предприятий // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18, № 4. С. 335–343.
15. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2004 году». URL: http://www.mnr.gov.ru/docs/o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii/1957/ (дата обращения: 12.01.2019).
16. 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.
17. Изразль Ю.А., Назаров И.М., Прессман А.Я. Кислотные дожди. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 269 с.
18. Исидоров В.А. Органическая химия атмосферы. Л.: Химия, 1985. 265 с.
19. Paffrath D., Peters W. Aircraft measurements of various pollution components and meteorological parameters // YI Congr. mondqualite air. Paris. 1983. P. 133–136.
20. Paffrath D. Airborne chemistry measurements // Remote Sens Earth's Environ.: Some Pap. Present Alpbach, Simp. School. Noordwijk. 1990. P. 43–49.

21. Успенский А.Б., Федоров В.В. Вычислительные аспекты метода наименьших квадратов при анализе и планировании регрессионных экспериментов. М.: Изд-во МГУ, 1975. 168 с.
22. Рапута В.Ф., Симоненков Д.В., Белан Б.Д., Ярославцева Т.В. Численное исследование процессов переноса и трансформации газовых и аэрозольных примесей в шлейфе выбросов Норильского промышленного района // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 6. С. 438–442; Raputa V.F., Simonenkov D.V., Belan B.D., Yaroslavtseva T.V. Numerical study of gas and aerosol impurity transfer and transformation processes in the plume of the Norilsk industrial region // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 5. P. 466–470.

V.F. Raputa, D.V. Simonenkov, B.D. Belan, T.V. Yaroslavtseva. Estimation of SO₂ emission in the air of Norilsk region.

The numerical analysis of the data of the aircraft sounding plume of impurity carry-over in the summer atmosphere of the Norilsk industrial region has been carried out. A two-parameter model was constructed for numerical retrieval of impurity concentrations in directions transverse to the plume and, based on it, estimates of the lower limits of sulfur dioxide emission corresponding to different emission time. Considerable variability of emission estimates was established due to the nonstationarity of sulfur dioxide emissions into the atmosphere. The average emission of SO₂ into the atmosphere was estimated as 1.86 million tons/year, which is close to the official statistics.