

УДК 681:785.5

## ОЦЕНКА ВЫБРОСОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ МЕТОДОМ ИНФРАКРАСНОЙ ФУРЬЕ-СПЕКТРОСКОПИИ

© 2024 г. А. Н. Морозов<sup>1</sup>, С. Е. Табалин<sup>1</sup>, Д. Р. Анфимов<sup>1</sup>, И. Б. Винтайкин<sup>1</sup>, В. Л. Глушков<sup>1</sup>, П. П. Дёмкин<sup>1</sup>, О. А. Небритова<sup>1</sup>, Иг. С. Голяк<sup>1</sup>, Е. В. Барков<sup>2</sup>, А. В. Чеботаев<sup>2</sup>, М. С. Дроздов<sup>3</sup>, С. И. Светличный<sup>3</sup>, И. Л. Фуфурин<sup>1</sup>, \*

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>2</sup>Заполярный филиал ГМК “Норильский никель”, Норильск, Россия

<sup>3</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова  
Российской академии наук, Москва, Россия

\*E-mail: igfil@mail.ru

Поступила в редакцию 14.11.2023

После доработки 11.01.2024

Принята к публикации 22.01.2024

Ежегодно металлургические предприятия выбрасывают в атмосферу сотни тысяч тонн вредных веществ. Дистанционный мониторинг отходящих газов дымовых труб металлургических комплексов является актуальной задачей как для самих промышленных предприятий, так и систем экологического контроля близлежащих населенных пунктов. В настоящей работе на основе результатов дистанционного оптического мониторинга выбросов дымовых труб металлургических заводов Заполярного филиала ГМК “Норильский никель” проведена оценка концентрации диоксида серы в отходящих газах. Измерения проводились с использованием инфракрасных фурье-спектрометров, работающих в диапазоне длин волн 7–13 мкм со спектральным разрешением 4 см<sup>-1</sup>. Предложена новая технология дистанционного оптического зондирования в пассивном режиме отходящих газов металлургических предприятий, включающая измерения как на срезах дымовых труб, так и на шлейфах.

*Ключевые слова:* металлургическое предприятие, выбросы дымовых труб, диоксид серы, экологический мониторинг, инфракрасная фурье-спектроскопия.

DOI: 10.31857/S0207401X24060052

### 1. ВВЕДЕНИЕ

По мере развития промышленности и ужесточения требований законодательных актов РФ загрязнение окружающей среды становится все более актуальной проблемой. Быстрый рост производства в таких отраслях, как энергетика, металлургия, химическая и текстильная промышленности, фармацевтика и другие, привел к значительным выбросам загрязняющих веществ в атмосферу [1]. Загрязняющие вещества не только оказывают значительное влияние на повседневную жизнь людей, но и представляют серьезную опасность для здоровья человека [2–4]. Обнаружение и идентификация газов, загрязняющих атмосферу, играют ключевую роль в охране окружающей среды, поскольку они дают ценную информацию для отслеживания источников загрязняющих веществ, классификацию уровней

опасности и разработки эффективных способов мониторинга и контроля [5, 6].

Стандартные датчики локального контроля предполагается устанавливать на источник выбросов, что требует регулярного технического обслуживания, вызванного загрязнениями чувствительных элементов при непосредственном контакте с выделяемыми газами. В то же время определение выбросов загрязняющих веществ с помощью датчиков дистанционного контроля позволяет исследовать смеси, непосредственно выбрасываемые в атмосферу источником, без необходимости установки газоанализаторов на дымовые трубы. Кроме того, дистанционное зондирование позволяет осуществлять мониторинг выбросов без подготовительных мероприятий на предприятии.

В настоящее время существует большое разнообразие методов активного измерения загрязнений на месте и пассивного дистанционного зондирования, которые могут применяться для мониторинга загрязняющих веществ в атмосфере. В первую очередь к ним относятся: инфракрасная (ИК) фурье-спектроскопия [7, 8], технология электрохимического зондирования [9], использование лидара дифференциального поглощения (ЛДП) [10–16], дифференциальная спектроскопия оптического поглощения (ДСОП) [17–20], неди-сперсионная ИК-спектроскопия [21, 22] и др.

Лидарный метод [23] позволяет получить данные о концентрациях газообразных загрязняющих веществ в воздухе с высоким пространственным разрешением [12, 13]. В технология ЛДП [10, 11] используется импульсное лазерное излучение с двумя разными длинами волн. Длина волны измерения выбирается таким образом, чтобы интенсивность лазерного излучения уменьшалась за счет поглощения загрязнителем воздуха, подлежащим измерению, а поглощение импульсного излучения опорного канала, наоборот, было бы низким. Различия в поведении рассеяния и затухания (поглощения) другими составляющими атмосферы на обеих длинах волн должны быть незначительными. В противном случае их тоже необходимо принимать во внимание. Концентрация газообразного загрязнителя определяется по разнице значений интенсивности света на обеих длинах волн, а его местоположение — временем действия лазерных импульсов. Для нахождения скорости и направления ветра на разных высотах над уровнем Земли применяется ветровой профилемер (SODAR, sonic detection and ranging), который посылает в атмосферу звуковые импульсы и принимает их после отражения от слоев различной плотности. Анализ отраженного звукового сигнала позволяет определить положение различных неоднородностей тропосферы [24].

Мониторинг атмосферных загрязнений может осуществляться путем объединения информации о распространении загрязнения и пространственном местоположении источника [25]. В начале 2000-х гг. в России была разработана система мобильного лидарного комплекса [26], которая работала как с лазером YAG:Nd<sup>3+</sup> на длинах волн 1064 нм, 532 нм, 355 нм, 266 нм, так и с CO<sub>2</sub>-лазером с гетеродинным детектором (9–11 мкм). Система позволяла регистрировать концентрацию

аэрозоля, химический состав газовой фазы, ветер, турбулентность и т.д. Однако она имела сложную структуру и значительные размеры. В 2017 г. Национальная физическая лаборатория Великобритании представила установленную на транспортном средстве систему ИК-ЛДП, специально предназначенную для мониторинга выбросов метана на свалках [15]. Для получения данных о скорости и направлении ветра в непосредственной близости от места измерения устанавливалась переносная мачта. Следует отметить, что система имела существенные ограничения в получении информации о поле ветра на больших площадях и больших высотах. В 2022 г. впервые была реализована система, которая объединила в себе использование ЛДП и когерентного доплеровского лидара ветра [27]. В этой системе был применен источник излучения с длиной волны 1.55 мкм, что позволило эффективно исследовать пространственное распределение как концентрации CO<sub>2</sub>, так и полей ветра, тем самым облегчив точную оценку локализованных выбросов CO<sub>2</sub>. Однако ограничение системы по длине волны сузили ее применимость до измерения исключительно концентрации CO<sub>2</sub>.

Когда свет распространяется в атмосфере, его интенсивность уменьшается за счет поглощения следовых газов. Поэтому одним из эффективных методов мониторинга атмосферных загрязняющих газов, таких как NO<sub>x</sub> и SO<sub>2</sub>, является ДСОП. Пассивный метод дистанционного зондирования ДСОП работает в так называемом диапазоне “отпечатков пальцев”: измеряются излучения молекулами загрязняющих газов на различных длинах волн для определения их концентраций [19, 20].

В последние годы появились наземные, бортовые и мобильные приборы ДСОП, широко применяемые для мониторинга атмосферных загрязняющих веществ. Среди большого разнообразия платформ мониторинга наземные приборы ДСОП используются в основном для определения распределения и изменчивости концентрации загрязняющих газов в атмосфере. Бортовые и мобильные приборы ДСОП обладают более широким спектром возможностей. Они могут одновременно находить распределение концентраций атмосферных загрязняющих газов, определять местоположение их источников и проводить количественную оценку потоков их выбросов. По сравнению с бортовым прибором, мобильный

прибор ДСОП имеет достаточно низкую стоимость и более высокое пространственное разрешение. Измерения с помощью мобильных устройств ДСОП можно проводить вокруг основных городских трасс, чтобы определить поток выбросов от локальных источников. Так, например, в работе [17] представлен метод определения общего объема выбросов загрязняющих веществ в атмосферу из районного источника в г. Пекин (Китай) с применением мобильного устройства ДСОП, в котором на основе технологии измерения выбросов точечных источников была предложена расширенная версия метода измерения для поверхностных протяженных источников. Авторы работы [18] использовали мобильную технологию ДСОП для количественной оценки выбросов  $\text{NO}_x$  транспортными средствами в г. Шанхай (Китай) и изучили влияние на загрязнение атмосферы условий дорожного движения и ветрового режима. Тан и соавт. [28] продемонстрировали интегральный метод количественной оценки выбросов  $\text{NO}_x$  и исследовали его источник в Хэфэе (Китай), также применив мобильную технологию ДСОП.

Как правило, результаты дистанционных измерений выбросов вредных веществ, в том числе диоксида азота  $\text{NO}_2$ , регистрируются в единицах интегральных концентраций, когда отсутствует точная информация о линейных размерах загрязняющего слоя [29]. Существенный объем данных по концентрациям загрязняющих веществ ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$  и др.) дают измерения с околоземных орбит [30, 31]. В работе [32] приведены результаты 4-летних спутниковых измерений концентрации  $\text{SO}_2$  над Норильском, а также исследовано влияние влажности и температурного контраста

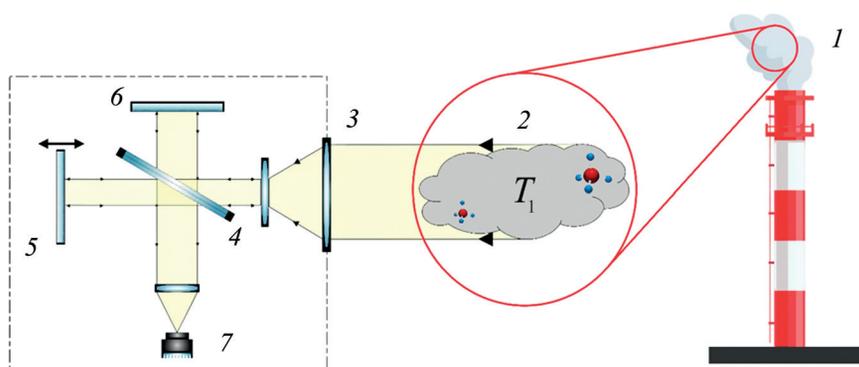
на измерения в ИК-диапазоне. Однако здесь необходимо учитывать, что спутниковые измерения содержат данные по концентрациям всего атмосферного столба, что предполагает необходимость учета влияния составляющих атмосферы на результаты измерения.

Цель данного исследования — оценка концентраций диоксида серы в отходящих газах дымовых труб (ДТ) металлургических комбинатов с использованием метода ИК-фурье-спектроскопии. Предложена новая технология дистанционного оптического зондирования в пассивном режиме.

## 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Дистанционные измерения выбросов вредных веществ из ДТ в дневное время проводились с площадок рабочей зоны Надеждинского металлургического завода им. Б.И. Колесникова и Медного завода Заполярного филиала ГМК «Норильский никель» в период с 3 по 11 июля 2023 г. Температура окружающей среды во время экспериментов варьировалась в диапазоне от 5 до 20 °С. Расстояние от ИК-фурье-спектрометров до верхней точки ДТ составляло 250–760 м. В процессе измерения фурье-спектрометры регистрировали ИК-излучение выбросов ДТ как на срезах, так и в шлейфах отходящих газов.

Принципиальная схема регистрации ИК-спектров отходящих газов ДТ приведена на рис. 1. Промышленные отходящие газы дымовых труб 1 имеют достаточный температурный контраст относительно подстилающей поверхности, что позволяет регистрировать собственное тепловое излучение 2 с помощью ИК-фурье-спектрометра, который построен на базе интерферометра Майкельсона с подвижным зеркалом 5. Входящее из-



**Рис. 1.** Принципиальная схема регистрации спектров отходящих газов ДТ с температурой  $T_1$  с помощью ИК-фурье-спектрометра: 1 — отходящие газы дымовых труб, 2 — входящее излучение, 3 — собирающий объектив, 4 — светоделитель, 5 — подвижное зеркало интерферометра, 6 — неподвижное зеркало интерферометра, 7 — КРТ-фотоприемник.



**Рис. 2.** Схема эксперимента по дистанционной регистрации ИК спектров отходящих газов ДТ: 1 – дымовая труба, 2 – отходящие газы, 3 и 4 – ИК-фурье-спектрометры, 5 – направления регистрации ИК-излучения.

лучение 2 проходит через собирающий объектив 3 и попадает на светоделитель 4. После модуляции в интерферометре Майкельсона излучение попадает на кадмиево-ртутно-теллурический (КРТ) фотоприемник 7. Охлаждение КРТ-фотоприемника обеспечивается микрокриогенной системой, работающей по циклу Стирлинга.

На рис. 2 приведена схема эксперимента по дистанционной регистрации ИК-спектров отходящих газов ДТ на Надеждинском металлургическом заводе им. Б.И. Колесникова. Цифрами 3 и 4 обозначены ИК-фурье-спектрометры, имеющие угловые поля зрения  $2.0^\circ$  (ФСР-1) и  $0.7^\circ$  (ФСР-2) соответственно. Основные технические параметры ФСР-1 и ФСР-2 приведены в табл. 1.

Рудные месторождения Норильского промышленного района, богатые залежами сульфидных медно-никелевых руд, составляют основную массу исходного сырья для получения меди, никеля и

**Таблица 1. Основные параметры ИК-фурье-спектрометров**

Параметр	Единица измерения	Значение параметра
Рабочий спектральный диапазон	мкм	7–13
Угловое поле зрения:		
ФСР-1	град	2.0
ФСР-2	град	0.7
Спектральное разрешение	$\text{см}^{-1}$	4.0
Время одного сканирования	с	1.0
Обнаружительная способность ФПУ на $\lambda = 10$ мкм	$10^{10}$	2.0–3.0

металлов платиновой группы. В процессе пирометаллургического производства основным вредным веществом, образующимся при окислении сульфидных руд, является диоксид серы  $\text{SO}_2$  [33]. Так, в 2008 г. на Канадском заводе концерна Thompson выбросы  $\text{SO}_2$  составили более 200 тыс. т

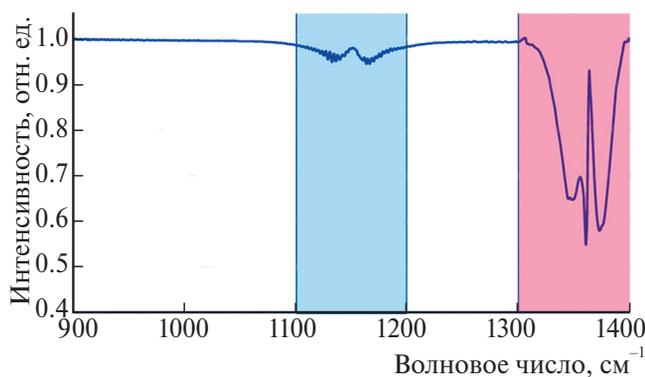


Рис. 3. Эталонный спектр  $\text{SO}_2$  с массовой концентрацией, равной  $139 \text{ мг/м}^3$ . Спектральное разрешение –  $4 \text{ см}^{-1}$ .

в виде твердой пыли с газами [34]. По данным Федеральной службы государственной статистики и Министерства экологии и рационального природопользования Красноярского края по состоянию на 2019 г. в атмосферу Норильска ежегодно поступает около 1.7–1.8 млн т загрязняющих веществ [34]. Перечень вредных веществ, подлежащих контролю в Норильске, приведен в докладе Министерства экологии и рационального природопользования Красноярского края за 2019 г. [35].

Таким образом, наиболее важным для определения компонентом отходящих газов ДТ для ГМК “Норильский никель” является  $\text{SO}_2$ . С целью дистанционного определения концентраций  $\text{SO}_2$  предварительно был измерен спектр поверочной газовой смеси диоксида серы в азоте с массовой концентрацией, равной  $139 \text{ мг/м}^3$  (см. рис. 3). Для анализа в рабочем спектральном диапазоне длин волн 7–13 мкм могут использоваться спектральные полосы в диапазонах волновых чисел 1100–1200 и 1300–1400  $\text{см}^{-1}$ . Для  $\nu = 1163 \text{ см}^{-1}$  сечение поглощения составляет  $\sigma = 0.71 \cdot 10^{-19} \text{ см}^2/\text{молекула}$ , а для  $\nu = 1359 \text{ см}^{-1}$  –  $\sigma = 8.45 \cdot 10^{-19} \text{ см}^2/\text{молекула}$ . При этом для частот 1165 и 1361  $\text{см}^{-1}$  сечения поглощения воды равны  $\sigma = 2.71 \cdot 10^{-23} \text{ см}^2/\text{молекула}$  и  $\sigma = 2.71 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2/\text{молекула}$  соответственно

[36]. Стоит отметить, что для трасс протяженностью более 100 м функция пропускания атмосферы составляет 0.7–0.8 в диапазоне длин волн 1100–1200  $\text{см}^{-1}$  и менее 0.1 в диапазоне 1300–1400  $\text{см}^{-1}$ . Другими словами, линия поглощения  $\text{SO}_2$  в диапазоне длин волн 1300–1400  $\text{см}^{-1}$  существенно маскируется поглощением атмосферы, поэтому для анализа выбросов  $\text{SO}_2$  были выбраны спектральные линии, лежащие в диапазоне 1100–1200  $\text{см}^{-1}$ .

Эталонный спектр, представленный на рис. 3, был зарегистрирован ИК-фурье-спектрометром, оснащенный многоходовой кюветой типа Уайта с длиной оптического пути 6 м [37]. Эти данные соответствуют интегральной концентрации, равной  $834 \text{ мг/м}^2$ .

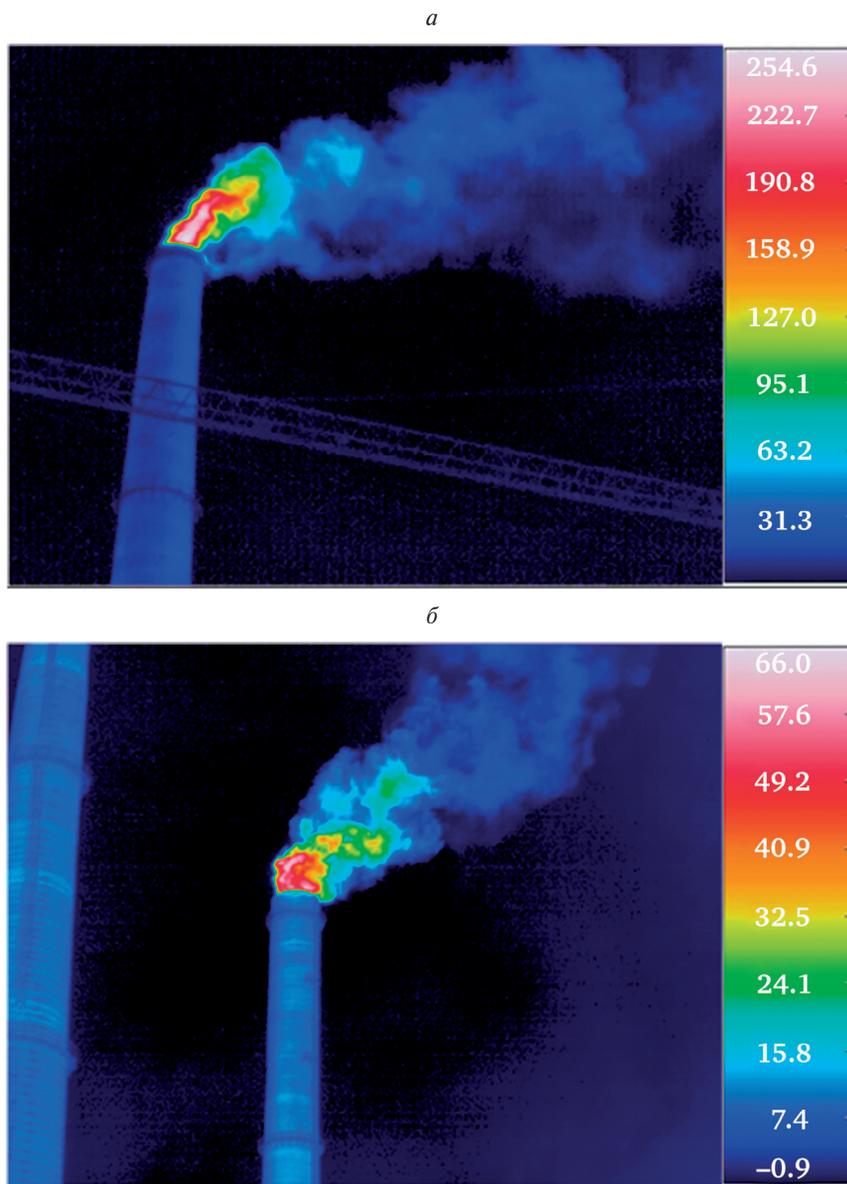
### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Измерения интегральных концентраций  $\text{SO}_2$  дистанционным методом проводились 7, 10 и 11 июля 2023 г. на Медном заводе Заполярного филиала ГМК “Норильский никель” с использованием ФСР-1. На рис. 4 приведены термограммы выбросов ДТ № 1 и ДТ № 2. Видно, что температурный контраст между выбросами на срезе трубы и воздушной средой составлял  $260^\circ\text{C}$  для ДТ № 1 (см. рис. 4а) и  $60\text{--}70^\circ\text{C}$  для ДТ № 2 (см. рис. 4б).

На рис. 5 представлены блочные диаграммы распределения значений интегральных концентраций  $\text{SO}_2$ , полученных дистанционно на срезах дымовых труб (СДТ № 1 и СДТ № 2). В табл. 2 для каждой серии измерений указаны расстояния от местоположения ФСР-1 до СДТ, значения медианы, 1-го и 3-го квартилей распределений интегральных концентраций  $\text{SO}_2$ , а также оценка значений температурного контраста. Разность в значениях интегральных концентраций отходящих газов ДТ, показанных на рис. 5 и в табл. 2, объясняется различной толщиной поглощающего слоя для представленных серий измерений. Кроме того, столб отходящего газа ДТ состоит из водя-

Таблица 2. Значения интегральных концентраций  $\text{SO}_2$  в  $\text{мг/м}^2$ , измеренные дистанционно на срезах ДТ № 1 и ДТ № 2 Медного завода Заполярного филиала ГМК “Норильский никель”

Дата	№ СДТ	Расстояние, м	Медиана	Квартиль 1	Квартиль 3	Температурный контраст, $^\circ\text{C}$
07.07.23	1	475	1197	770	1768	260
07.07.23	2	315	1706	1087	2414	70
10.07.23	1	170	5799	3205	9060	260
10.07.23	2	250	3957	1846	8714	70



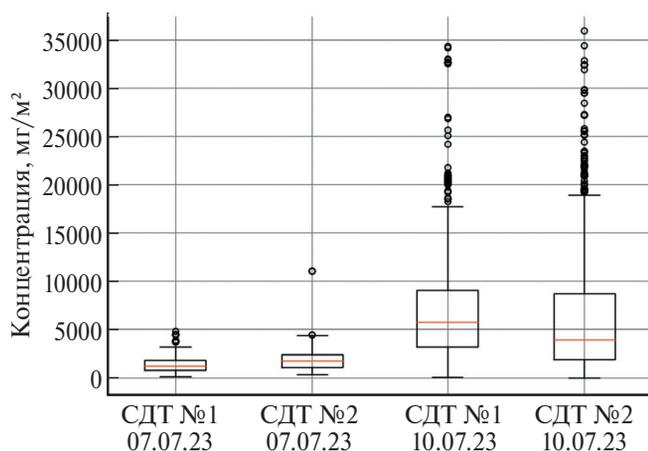
**Рис. 4.** Термограммы выбросов дымовых труб Медного завода Заполярного филиала ГМК «Норильский никель»: *a* – ДТ № 1, *б* – ДТ № 2. Измерения проведены 10.07.2023.

ного пара, частиц горячей аэрозоли, непрозрачных для ИК-излучения, и газового слоя, в котором определяется концентрация  $\text{SO}_2$ .

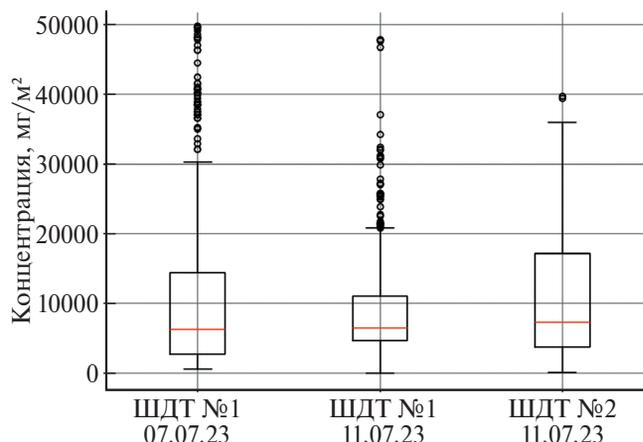
Блочные диаграммы с ограничителями выбросов для значений интегральных концентраций  $\text{SO}_2$ , полученных дистанционно на шлейфах ДТ (ШДТ № 1 и ШДТ № 2) приведены на рис. 6. Аналогично в табл. 3 для каждой серии измерений указаны расстояния от местоположения ФСП-1 до ШДТ, значения медианы, 1-го и 3-го квартилей распределений интегральных концентраций  $\text{SO}_2$ . При регистрации ИК-спектров по шлейфу отходящих газов в режиме сканирования наблюдалось резкое увеличение значений интегральной кон-

центрации  $\text{SO}_2$  при переходе от среза к шлейфу, а далее – экспоненциальное уменьшение по мере удаления по шлейфу от СДТ.

Отметим, что 7 июля 2023 г. сканирование проводилось в диапазонах углов от  $-120^\circ$  до  $0^\circ$  по азимуту и от  $13^\circ$  до  $23^\circ$  по углу места. Измерения 11 июля выполнялись в диапазонах углов:  $15\text{--}133^\circ$  по азимуту и  $5\text{--}35^\circ$  по углу места для шлейфа ДТ № 1 и  $14\text{--}15^\circ$  по азимуту и  $13\text{--}43^\circ$  по углу места для шлейфа ДТ № 2. На рис. 7 показана динамика интегральных концентраций при сканировании по азимуту ШДТ № 1 и ШДТ № 2. Существенные различия между медианными значениями концентраций, приведенными в табл. 3, и интеграль-



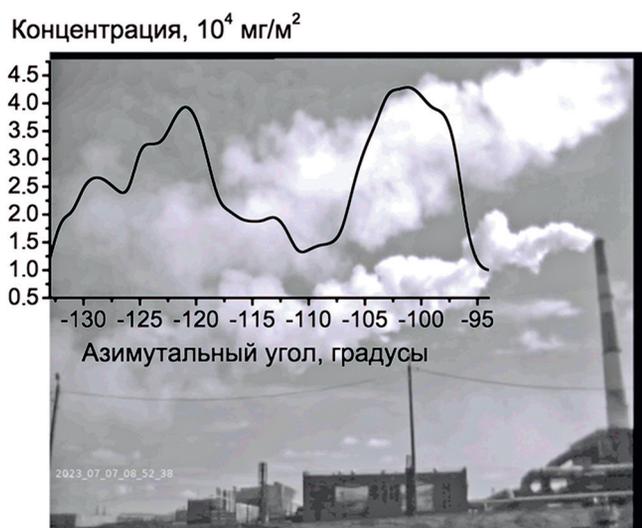
**Рис. 5.** Блочные диаграммы значений интегральных концентраций SO<sub>2</sub>, полученных на срезах ДТ №1 и ДТ №2 Медного завода Заполярного филиала ГМК “Норильский никель”. Время и условия проведения измерений представлены в табл. 2.



**Рис. 6.** Блочные диаграммы значений интегральных концентраций SO<sub>2</sub>, полученных на шлейфах ДТ №1 и ДТ №2 Медного завода Заполярного филиала ГМК “Норильский никель”. Время и условия проведения измерений представлены в табл. 3.

**Таблица 3.** Значения интегральных концентраций SO<sub>2</sub> в мг/м<sup>3</sup>, измеренные дистанционно на шлейфах ДТ №1 и ДТ №2 Медного завода Заполярного филиала ГМК “Норильский никель”

Дата	№ ШДТ	Расстояние, м	Медиана	Квартиль 1	Квартиль 3
07.07.23	1	1000	7983	4118	16 404
11.07.23	1	450	6477	4610	11 078
11.07.23	2	500	7297	3757	17 157



**Рис. 7.** Динамика интегральной концентрации SO<sub>2</sub>, измеренная при сканировании по азимуту с углом в 40° в отходящих газах от двух ДТ Медного завода Заполярного филиала ГМК “Норильский никель”. Измерения проведены 07.07.2023.

ными значениями, указанными на рис. 7, можно объяснить тем, что первые получены в широком телесном угле сканирования, а вторые — вдоль насыщенного шлейфа отходящего газа.

Измерения на Надеждинском металлургическом заводе им. Б.И. Колесникова Заполярного

филиала ГМК “Норильский никель” проводились 3 и 4 июля 2023 г. с помощью двух ИК-фурье-спектрометров (ФСР-1 и ФСР-2), основные характеристики которых представлены в табл. 1. В этой серии экспериментов ИК-спектры выбросов регистрировались только на срезе одной ДТ. Термограмма ДТ Надеждинского металлургического завода идентична термограмме ДТ №1 Медного завода (см. рис. 4а) и отдельно в настоящей работе не приводится. На рис. 8 представлены блочные диаграммы с ограничителями выбросов для значений интегральных концентраций SO<sub>2</sub>, полученных на срезе ДТ с помощью ФСР-1 и ФСР-2. В табл. 4 приведены значения медианы интегральных концентраций SO<sub>2</sub>, значений 1-го и 3-го квартилей блочных диаграмм распределений для каждой серии измерений и типа ИК-фурье-спектрометра соответственно.

Закон Бугера–Ламберта–Бера показывает, что интенсивность излучения, прошедшего через слой поглощающего вещества, линейно зависит от толщины этого слоя [38]:

$$D(\nu) = -\ln\left(\frac{I(\nu)}{I_0(\nu)}\right) = \sum_{i=1}^N k_i(\nu)c_i \cdot l, \quad (1)$$

Таблица 4. Значения интегральных концентраций  $\text{SO}_2$  в  $\text{мг}/\text{м}^2$ , измеренные дистанционно на срезе ДТ Надеждинского металлургического завода им. Б.И. Колесникова Заполярного филиала ГМК “Норильский никель”

Дата	Тип прибора	Расстояние, м	Медиана	Квартиль 1	Квартиль 3
03.07.23	ФСР-1	250	997	581	1717
03.07.23	ФСР-2	250	1433	1171	1692
04.07.23	ФСР-1	760	2780	2208	3447

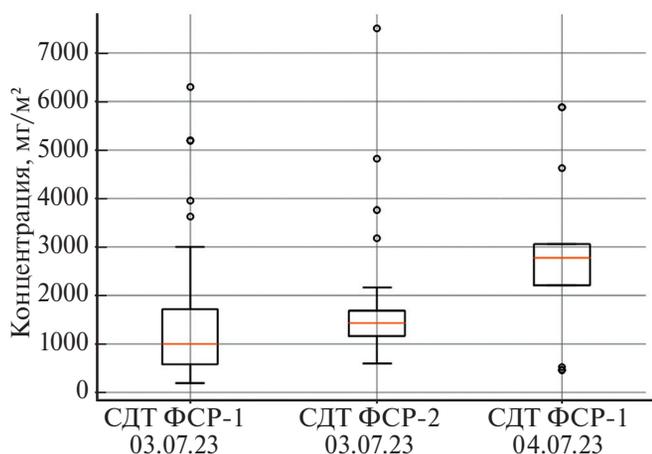


Рис. 8. Блочные диаграммы значений интегральных концентраций  $\text{SO}_2$ , полученных на срезе ДТ Надеждинского металлургического завода Заполярного филиала ГМК “Норильский никель” с использованием ФСР-1 и ФСР-2. Время и условия проведения измерений представлены в табл. 4.

где  $I_0(\nu)$  – интенсивность излучения, падающего на исследуемый объект,  $I(\nu)$  – интенсивность излучения, прошедшего через исследуемый объект,  $\nu$  – волновое число,  $D(\nu)$  – спектр оптической толщины,  $i$  – номер компонента смеси,  $N$  – число компонентов,  $k_i(\nu)$  – спектральный коэффициент экстинкции (поглощения) данного вещества,  $l$  – толщина поглощающего слоя,  $c_i$  – концентрация  $i$ -го вещества.

В пассивном методе измерения ИК-спектров, как правило, не известен размер поглощающего слоя. Более того, при измерении концентраций в шлейфе необходимо учитывать динамику геометрии облака газа и массовых концентраций  $C_{\text{масс}}$  его компонентов. Интегральная концентрация

$$C_{\text{инт}} = C_{\text{масс}} \cdot l \quad (2)$$

позволяет учитывать одновременно динамику массовой концентрации и линейных размеров поглощающего слоя. При анализе выброса на СДТ необходимо также учитывать наличие частиц горячих аэрозолей и паров воды, что делает прозрачной для ИК-излучения только часть столба выброса. Априорная информация о скорости по-

тока и динамике линейного размера облака газа позволит выполнить вычисление средних массовых концентраций вещества. Информация о мгновенных значениях концентраций вредных веществ, в том числе  $\text{SO}_2$  и других промышленных газов, позволит выполнять тарировку измерений концентраций дистанционным оптическим методом. Для тарировки результатов дистанционных измерений могут быть использованы данные спутниковых наблюдений [39, 40].

В настоящей работе описана методика дистанционных измерений интегральных концентраций  $\text{SO}_2$  с использованием ИК-фурье-спектрометра. Вопросы определения массовых концентраций, соответствия представленных данных фактическим и оценки валовых выбросов  $\text{SO}_2$  выходят за рамки данной работы. Вариации медианных значений интегральных концентраций от шлейфа отходящего газа не превышают 10% и существенно меньше значений 1-го и 3-го квартилей блочных диаграмм, что показывает высокую воспроизводимость результатов измерений.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе на основе результатов дистанционного оптического мониторинга выбросов дымовых труб металлургических заводов Заполярного филиала ГМК “Норильский никель” проведена оценка концентрации диоксида серы в отходящих газах. Мониторинг проводился с использованием ИК-фурье-спектрометров, работающих в диапазоне длин волн 7–13 мкм со спектральным разрешением  $4 \text{ см}^{-1}$ . Предложена новая технология дистанционного оптического зондирования в пассивном режиме отходящих газов металлургических предприятий, включающая измерения интегральных концентраций диоксида серы как на срезах дымовых труб, так и на шлейфах.

Для всех серий измерений построены блочные диаграммы с ограничителями выбросов значений интегральных концентраций  $\text{SO}_2$ . Установлены

медианные значения концентраций, а также границы 1-го и 3-го квартилей блочных диаграмм с ограничителями выбросов. Определена динамика интегральной концентрации SO<sub>2</sub> при сканировании шлейфов отходящих газов двух дымовых труб Медного завода по азимуту с углом 40°.

Показано, что для независимых измерений двумя ИК-фурье-спектрометрами различия в медианных значениях интегральной концентрации SO<sub>2</sub> соответствуют диапазону 1–3 квартилей распределения, что свидетельствует о хорошей воспроизводимости значений независимых измерений. Установлено, что медианные значения концентрации SO<sub>2</sub>, полученные на срезе дымовой трубы, в несколько раз меньше значений в шлейфе отходящих газов. Такая разница объясняется тем, что столб отходящих газов содержит частицы горячей аэрозоли и водяной пар, непрозрачный для ИК-излучения, поэтому вклад в интегральную концентрацию вносит лишь часть газового слоя вокруг столба отходящего вещества. С учетом данных по размеру столба или шлейфа облака отходящего газа, а также оценок динамики движения газовой смеси дымовых труб, полученные значения интегральных концентраций могут быть пересчитаны в массовые концентрации, для корректного вычисления которых необходимо применение газодинамических моделей распространения отходящих газов в атмосфере.

Работа выполнена в рамках госзадания Министрства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 122040500060–4) и реализации программы стратегического академического лидерства “Приоритет-2030”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голяк Ил.С., Анфимов Д.Р., Винтайкин И.Б. и др. // Хим. физика. 2023. Т. 42. № 4. С. 3; <https://doi.org/10.31857/S0207401X23040088>
2. Rossi R., Ciparisse J.F., Gelfusa M. et al. // J. Instrum. 2019. V. 14. № 3. Article C03004; <https://doi.org/10.1088/1748-0221/14/03/C03004>
3. Donato A., Villani M.G., Feudo T.L. et al. // Atmosphere. 2020. V. 11. № 10. P. 1054; <https://doi.org/10.3390/atmos11101054>
4. Морозов И.И., Васильев Е.С., Волков Н.Д. и др. // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 10. С. 16; <https://doi.org/10.31857/S0207401X22100089>
5. Gaudio P., Gelfusa M., Malizia A. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2015. V. 658. № 1. Article 012004; <https://doi.org/10.1088/1742-6596/658/1/012004>
6. Gaudio P., Malizia A., Gelfusa M. et al. // J. Instrum. 2017. V. 12. № 1. C01054; <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/01/C01054>
7. Sung L.Y., Shie R.H., Lu C.J. // J. Hazard. Mater. 2014. V. 265. P. 30; <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.11.006>
8. Фуфурин И.Л., Шлыгин П.Е., Позвонков А.А. и др. // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 10. С. 68; <https://doi.org/10.31857/S0207401X21100046>
9. Kau N., Jindal G., Kaur R. et al. // Results Chem. 2022. V. 4. 100678; <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2022.100678>
10. Carlisle C.B., van der Laan J.E., Carr L.W. et al. // Appl. Opt. 1995. V. 34. № 27. P. 6187; <https://doi.org/10.1364/AO.34.006187>
11. Pierrottet D.F., Senft D.C. // Chemical and Biological Sensing / Ed. Gardner P.J. Proc. SPIE. 2000. V. 4036. P. 17; <https://doi.org/10.1117/12.394075>
12. Li J., Yu Z., Du Z. et al. // Remote Sens. 2020. V. 12. № 17. Article 2771; <https://doi.org/10.3390/rs12172771>
13. Yang Z., Zhang Y., Chen Y. et al. // Opt. Commun. 2022. V. 518. № 5. Article 128359; <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2022.128359>
14. Голубков Г.В., Адамсон С.О., Борчевкина О.П. и др. // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 5. С. 53; <https://doi.org/10.31857/S0207401X22050053>
15. Innocenti F., Robinson R., Gardiner T. et al. // Remote Sens. 2017. V. 9. № 9. Article 953; <https://doi.org/10.3390/rs9090953>
16. Cezard N., Le Mehaute S., Le Gouët J. et al. // Opt. Express. 2020. V. 28. № 15. P. 22345; <https://doi.org/10.1364/OE.394553>
17. Johansson M., Galle B., Yu T. et al. // Atmos. Environ. 2008. V. 42. № 29. P. 6926; <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.05.025>
18. Wang S., Zhou B., Wang Z. et al. // J. Geophys. Res. Atmos. 2012. V. 117. Article D13305; <https://doi.org/10.1029/2011JD016983>
19. Constantin D.E., Merlaud A., van Roozendaal M. et al. // Sensors. 2013. V. 13. № 3. P. 3922; <https://doi.org/10.3390/s130303922>
20. Tan W., Liu C., Wang S. et al. // Atmos. Res. 2020. V. 245. № 2. 105037; <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105037>
21. Vojtisek-Lom M., Zardini A.A., Pechout M. et al. // Atmos. Meas. Tech. 2020. V. 13. № 11. P. 5827; <https://doi.org/10.5194/amt-13-5827-2020>
22. Sun Q., Liu T., Yu X. et al. // Sens. Actuators, B. 2023. V. 390. Article 133901; <https://doi.org/10.1016/j.snb.2023.133901>
23. Фуфурин И.Л., Винтайкин И.Б., Назолин А.Л. и др. // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 5. С. 28; <https://doi.org/10.31857/S0207401X2205003X>

24. Schröter M., Obermeier A., Brüggemann D. et al. // J. Air Waste Manage. Assoc. 2003. V. 53. № 6. P. 716; <https://doi.org/10.1080/10473289.2003.10466213>
25. Mønster J., Kjeldsen P., Scheutz C. // Waste Manag. 2019. V. 87. P. 835; <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.12.047>
26. Boreisho A.S., Volodenko V.A., Gryaznov N.A. et al. // Laser Optics 2003: High-Power Gas Lasers / Ed. Danilov O.B. Proc. SPIE. 2004. V. 5479. P. 177; <https://doi.org/10.1117/12.558393>
27. Yue B., Yu S., Li M. et al. // Remote Sens. 2022. V. 14. № 20. Article 5150; <https://doi.org/10.3390/rs14205150>
28. Tan W., Zhao S., Liu C. et al. // Atmos. Environ. 2019. V. 200. P. 228; <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.12.009>
29. Hamilton P.M., Varey R.H., Millán M.M. // Proc. Intern. Sympos. Sulfur in the Atmosphere. Dubrovnik, Yugoslavia, 1977. V. 12. P. 127; <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-022932-4.50017-3>
30. Theys N., De Smedt I., Yu H. et al. // Atmos. Meas. Tech. 2017. V. 10. № 1. P. 119; <https://doi.org/10.5194/amt-10-119-2017>
31. Gamal G., Abdeldayem O.M., Elattar H. et al. // Sustainability. 2023. V. 15. № 12. Article 9362; <https://doi.org/10.3390/su15129362>
32. Bauduin S., Clarisse L., Clerbaux C. et al. // J. Geophys. Res. Atmos. 2014. V. 119. № 7. P. 4253; <https://doi.org/10.1002/2013JD021405>
33. Tømmervik H., Johansen B.E., Pedersen J.P. // Sci. Total Environ. 1995. V. 160–161. P. 753; [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(95\)04409-T](https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04409-T)
34. Богатырев Д.М., Петров Г.В., Цымбулов Л.Б. // Вестн. Магнитогорского гос. технического ун-та им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. № 1. С. 14; <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-1-14-24>
35. Гос. докл. “О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае” за 2019 год; <http://www.mpr.krskstate.ru/envir/page5849/0/id/45884>
36. Михайленко С.Н., Бабилов Ю.Л., Головкин В.Ф. // Оптика атмосферы и океана. 2005. Т. 18. № 9. С. 765.
37. Fufurin I.L., Golyak I., Bashkin S. et al. // Proc. SPIE. Optics + Optoelectronics. 2021. V. 11775. Article 1177512; <https://doi.org/10.1117/12.2588714>
38. Морозов А.Н., Светличный С.И. Основы фурье-радиоспектрометрии. 2-е изд., испр. и доп. М: Наука, 2014.
39. Goyal R., Khare M. // J. Civil. Environ. Eng. 2012. V. 1. S1; <https://doi.org/10.4172/2165-784X.S1-001>
40. Kashkin V.B., Zuev D.V., Kurako M.A. et al. // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2018. V. 193. № 1. Article 012029; <https://doi.org/10.1088/1755-1315/193/1/012029>

## ESTIMATION OF EMISSIONS FROM METALLURGICAL PLANTS USING INFRARED FOURIER TRANSFORM SPECTROSCOPY

N. Morozov<sup>1</sup>, S. E. Tabalin<sup>1</sup>, D. R. Anfimov<sup>1</sup>, I. B. Vintaykin<sup>1</sup>, V. L. Glushkov<sup>1</sup>, P. P. Demkin<sup>1</sup>,  
O. A. Nebritova<sup>1</sup>, Ig. S. Golyak<sup>1</sup>, E. V. Barkov<sup>2</sup>, A. V. Chebotaev<sup>2</sup>, M. S. Drozdov<sup>3</sup>,  
S. I. Svetlichnyi<sup>3</sup>, I. L. Fufurin<sup>1, \*</sup>

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>MMC "Norilsk Nickel's", Polar Division, Norilsk, Russia

<sup>3</sup>Semenov Federal Research Center for Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

\*E-mail: igfil@mail.ru

Every year, metallurgical plants emit hundreds of thousands of tons of harmful substances into the atmosphere. Remote sensing of flue gases from chimneys of metallurgical plants is an urgent task for both industrial enterprises themselves and environmental control systems of nearby settlements. In this work, based on the results of remote optical monitoring of emissions from chimneys of metallurgical plants of the MMC "Norilsk Nickel's", Polar Division, the concentration of sulfur dioxide in the flue gases was estimated. The measurements were carried out using Infrared Fourier Transform Spectrometers operating in the range 7–13  $\mu\text{m}$  with 4  $\text{cm}^{-1}$  spectral resolution. A new technology for remote optical sensing in a passive mode of flue gases from metallurgical plants is proposed, including measurements both on cross sections of chimneys and plumes.

**Keywords:** metallurgical plants, flue gas emissions, sulfur dioxide, environmental monitoring, Infrared Fourier Transform Spectroscopy.

### REFERENCES

- Golyak I.I., Anfimov D.R., Vintaykin I.B. et al. // Russ. J. Phys. Chem. B 2023. V. 17. P. 320; <https://doi.org/10.1134/S1990793123020264>
- Rossi R., Ciparisse J.F., Gelfusa M. et al. // J. Instrum. 2019. V. 14. № 3. Article C03004; <https://doi.org/10.1088/1748-0221/14/03/C03004>
- Donateo A., Villani M.G., Feudo T.L., Chianese E. // Atmosphere. 2020. V. 11. № 10. P. 1054; <https://doi.org/10.3390/atmos11101054>
- Morozov I.I., Vasiliev E.S., Volkov N.D. et al. // Russ. J. Phys. Chem. B 2022. V. 16. P. 877; <https://doi.org/10.1134/S1990793122050220>
- Gaudio P., Gelfusa M., Malizia A. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2015. V. 658. № 1. Article 012004; <https://doi.org/10.1088/1742-6596/658/1/012004>
- Gaudio P., Malizia A., Gelfusa M. et al. // J. Instrum. 2017. V. 12. № 1. C01054; <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/01/C01054>
- Sung L.Y., Shie R.H., Lu C.J., Hazard J. // Mater. 2014. V. 265. P. 30; <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.11.006>
- Fufurin I.L., Shlygin P.E., Pozvonkov A.A. et al. // Russ. J. Phys. Chem. B 2021. V. 15. P. 911; <https://doi.org/10.1134/S1990793121050146>
- Kau N., Jindal G., Kaur R. et al. // Results Chem. 2022. V. 4. 100678; <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2022.100678>
- Carlisle C.B., van der Laan J.E., Carr L.W. et al. // Appl. Opt. 1995. V. 34. P. 6187; <https://doi.org/10.1364/AO.34.006187>
- Pierrottet D.F., Senft D.C. // Chemical and Biological Sensing / Ed. by Gardner P.J., Proc. SPIE. 2000. V. 4036. P. 17; <https://doi.org/10.1117/12.394075>
- Li J., Yu Z., Du Z. et al. // Remote Sens. 2020. V. 12. № 17. Article 2771; <https://doi.org/10.3390/rs12172771>
- Yang Z., Zhang Y., Chen Y. et al. // Opt. Commun. 2022. V. 518. № 5. Article 128359; <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2022.128359>
- Golubkov G.V., Adamson S.O., Borchevskina O.P. et al. // Russ. J. Phys. Chem. B 2022. V. 16. P. 508; <https://doi.org/10.1134/S1990793122030058>
- Innocenti F., Robinson R., Gardiner T. et al. // Remote Sens. 2017. V. 9. № 9. Article 953; <https://doi.org/10.3390/rs9090953>
- Cezard N., Le Mehaute S., Le Gouët J. et al. // Opt. Express. V. 28. № 15. P. 22345; <https://doi.org/10.1364/OE.394553>
- Johansson M., Galle B., Yu T. et al. // Atmos. Environ. 2008. V. 42. № 29. P. 6926; <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.05.025>
- Wang S., Zhou B., Wang Z. et al. // J. Geophys. Res. Atmos. 2012. V. 117. Article D13305; <https://doi.org/10.1029/2011JD016983>
- Constantin D.E., Merlaud A., van Roozendaal M. et al. // Sensors. 2013. V. 13. № 3. P. 3922; <https://doi.org/10.3390/s130303922>
- Tan W., Liu C., Wang S. et al. // Atmos. Res. 2020. V. 245. № 2. 105037; <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105037>

21. *Vojtisek-Lom M., Zardini A.A., Pechout M. et al.* // Atmos. Meas. Tech. 2020. V. 13. № 11. P. 5827; <https://doi.org/10.5194/amt-13-5827-2020>
22. *Sun Q., Liu T., Yu X. et al.* // Sensors Actuators, B. 2023. V. 390. Article 133901; <https://doi.org/10.1016/j.snb.2023.133901>
23. *Fufurin I.L., Vintaikin I.B., Nazolin A.L. et al.* // Russ. J. Phys. Chem. B 2022. V. 16. P. 483; <https://doi.org/10.1134/S1990793122030034>
24. *Schröter M., Obermeier A., Brüggemann D. et al.* // J. Air Waste Manage. Assoc. 2003. V. 53. № 6. P. 716; <https://doi.org/10.1080/10473289.2003.10466213>
25. *Mønster J., Kjeldsen P., Scheutz C.* // Waste Manag. 2019. V. 87. P. 835; <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.12.047>
26. *Boreisho A.S., Volodenko V.A., Gryaznov N.A. et al.* // Proceedings of Laser Optics 2003: High-Power Gas Lasers / Ed. by Danilov O.B. Proc. SPIE. 2003. V. 5479. P. 177; <https://doi.org/10.1117/12.558393>
27. *Yue B., Yu S., Li M. et al.* // Remote Sens. 2022. V. 14. № 20. Article 5150; <https://doi.org/10.3390/rs14205150>
28. *Tan W., Zhao S., Liu C. et al.* // Atmos. Environ. 2019. V. 200. P. 228; <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.12.009>
29. *Hamilton P.M., Varey R.H., Millán M.M.* // Proc. Intern. Sympos. Sulfur in the Atmosphere. Dubrovnik, Yugoslavia, 1977. V. 12. P. 127; <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-022932-4.50017-3>
30. *Theys N., De Smedt I., Yu H. et al.* // Atmos. Meas. Tech. 2017. V. 10. P. 119; <https://doi.org/10.5194/amt-10-119-2017>
31. *Gamal G., Abdeldayem O.M., Elattar H. et al.* // Sustainability. 2023. V. 15. № 12. Article 9362; <https://doi.org/10.3390/su15129362>
32. *Bauduin S., Clarisse L., Clerbaux C. et al.* // J. Geophys. Res. Atmos. 2014. V. 119. № 7. P. 4253; <https://doi.org/10.1002/2013JD021405>
33. *Tømmervik H., Johansen B.E., Pedersen J.P.* // Sci. Total Environ. 1995. V. 160–161. P. 753; [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(95\)04409-T](https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04409-T)
34. *Bogatyrev D.M., Petrov G.V., Tsybulov L.B.* // Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University. 2022. V. 20. P. 14; <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-1-14-24>
35. The State report of the Ministry of Ecology and Rational Nature Management of the Krasnoyarsk Territory “On the state and protection of the environment in the Krasnoyarsk Territory for 2019”; <http://www.mpr.krskstate.ru/envir/page5849/0/id/45884>
36. *Mikhaylenko S.N., Babikov Y.L., Golovko V.F.* // Optics of the atmosphere and ocean. 2005. V. 18. P. 765.
37. *Fufurin I.L., Golyak I.S., Bashkin S.V. et al.* // Proc. SPIE. Optics + Optoelectronics. 2021. V. 11775. Article 1177512; <https://doi.org/10.1117/12.2588714>
38. *Morozov A.N., Svetlichnyi S.I.* Fundamentals of Fourier Radio Spectrometry. Nauka, Moscow, 2014.
39. *Goyal R., Khare M.* // J. Civil. Environ. Eng. 2012. V. 1. S1; <https://doi.org/10.4172/2165-784X.S1-001>
40. *Kashkin V.B., Zuev D.V., Kurako M.A. et al.* // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2018. V. 193. № 1. Article 012029; <https://doi.org/10.1088/1755-1315/193/1/012029>