

Разработка методики градуировки и измерений абсолютных интегральных концентраций диоксида азота в свободной атмосфере с использованием корреляционного спектрометра ДАН-2

С.Ф. Баландин*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 8.07.2010 г.

Разработана методика пассивных измерений абсолютных интегральных концентраций диоксида азота в реальной атмосфере на длинных трассах с помощью корреляционной спектральной аппаратуры ДАН-2, работающей в области 0,4 мкм по рассеянному излучению. Проведены тестовые испытания предложенной методики измерений концентрационных профилей NO₂ вблизи крупного промышленного объекта в различных условиях фоновой засветки: чистое ясное небо, облачность, здание, деревья и т.д. Показана принципиальная возможность измерений абсолютных интегральных концентраций в диапазоне 200–4500 мг/м² при условии учета коррекции рассеянного оптического фона с погрешностью до 20%.

Ключевые слова: атмосфера, рассеянное излучение, ДАН-2, интегральная концентрация; NO₂, atmospheric, scattering radiation, DAN-2, integral concentration, NO₂.

Введение

В настоящее время для сбора информации об экологическом состоянии окружающей среды [1–8] наиболее важной является проблема изучения состава атмосферного воздуха. Быстро возрастающая антропогенная нагрузка приводит к ухудшению экологической обстановки. Возникает необходимость периодически на больших площадях осуществлять оценку экологической ситуации (режим мониторинга) [1–6, 8–22].

Для решения этих задач в ИОА СО РАН создана и экспериментально апробирована корреляционная спектральная аппаратура ДАН-2 [5, 6, 8–12], позволяющая дистанционно определять интегральные по трассе концентрации газов NO₂, SO₂ в реальной атмосфере вблизи крупных промышленных объектов. Однако, как показали испытания [6–11] данной аппаратуры, на результаты измерений большое влияние оказывает изменяющийся рассеянный фон как от атмосферы, так и от объектов наблюдения (здания, деревья и т.д.). Это обстоятельство позволяет проводить только относительные измерения интегрального содержания газа на трассе зондирования и значительно ограничивает использование аппаратуры для экологического контроля больших территорий. В связи с этим основной нашей задачей стала разработка методики измерений абсолютных интегральных концентраций

газовых примесей в реальной атмосфере (на примере NO₂), независимо от спектра регистрируемого рассеянного фона.

1. Постановка задачи. Принцип измерения

Корреляционный спектрометр ДАН-2 анализирует поступающие сигналы по двум каналам: U_1 и U_2 [4–6] в области спектра $\Delta\lambda = 0,38 \div 0,42$ мкм. При этом определяются отношение разности и сумма сигналов:

$$G = (U_1 - U_2) / (U_1 + U_2).$$

Поскольку $G = (1 - U_2/U_1) / (1 + U_2/U_1)$, в дальнейшем рассматриваем только отношение сигналов $\Gamma = U_2/U_1$. Это соотношение можно записать в виде

$$\Gamma = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} J_0(\lambda) C_1(\lambda) e^{-\tau_{\text{эт.к}}(\lambda)} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} J_0(\lambda) C_2(\lambda) e^{-\tau_{\text{т}}(\lambda)} d\lambda} \quad (1)$$

при условии, что оптическая толщина в эталонной кювете на линиях поглощения измеряемого газа $\tau_{\text{эт.к}}(\lambda) \gg \tau_{\text{т}}(\lambda)$ – регистрируемой на трассе оптической толщи данного газа; $J_0(\lambda)$ – интенсивность излучения участка неба или местности, на которую наведен спектрометр ДАН-2; $C_1(\lambda)$, $C_2(\lambda)$ –

* Сергей Флавиевич Баландин (bal@iao.ru).

спектральные коэффициенты, зависящие от пропускания оптического излучения первого и второго каналов и от параметров коэффициентов усиления фотомножителей с их электрическими схемами; оптическая толщина аэрозоля $\tau_{\text{аэп}}(\lambda) \ll 1$, оптическая толщина неизмеряемых газовых компонентов $\tau_{\text{н.г.}}(\lambda) \ll \tau_{\text{T}}(\lambda)$.

Рассмотрим случай, когда $J_0(\lambda)$, $C_1(\lambda)$, $C_2(\lambda)$ не зависят от длины волны λ в спектральном интервале $\Delta\lambda$. Тогда из (1) после соответствующих [6] преобразований получим

$$\tilde{N}_{\text{T}} = -\tilde{\sigma}_{\text{T}}^{-1} \ln[(C_1/C_2\Gamma)\tilde{T}_{\text{эт.к}}], \quad (2)$$

где \tilde{N}_{T} – интегральная концентрация измеряемого газа на трассе [6]; $\tilde{T}_{\text{эт.к}} = \exp[-\tilde{\sigma}_{\text{эт.к}} N_{\text{эт.к}} L_{\text{эт.к}}]$ – среднее значение функции пропускания измеряемого газа в эталонной кювете в интервале длин волн $[\lambda_1, \lambda_2]$, которое соответствует интегральному пропусканию интерференционного фильтра; $\tilde{\sigma}_{\text{эт.к}}$, $N_{\text{эт.к}}$, $L_{\text{эт.к}}$ – усредненное значение сечения поглощения, объемная концентрация и оптический путь для измеряемого газа в эталонной кювете [6].

Погрешности измерений, связанных с точностью определения $\tilde{\sigma}_{\text{эт.к}}$, можно избежать, устанавливая дополнительную калибровочную кювету с известной концентрацией измеряемого газа перед входом в спектро радиометр. Согласно формуле (2) записываем

$$\begin{cases} \tilde{N}_{\text{T}} + N_{\text{к.к}} = -\tilde{\sigma}_{\text{эт.к}}^{-1}(\lambda) \ln[(C_1/C_2\Gamma_1)\tilde{T}_{\text{эт.к}}], \\ \tilde{N}_{\text{T}} = -\tilde{\sigma}_{\text{эт.к}}^{-1}(\lambda) \ln[(C_1/C_2\Gamma)\tilde{T}_{\text{эт.к}}], \end{cases} \quad (3)$$

где $N_{\text{к.к}}$ – интегральная концентрация измеряемого газа в калибровочной кювете; Γ_1 – сигнал спектро радиометра при вводе калибровочной кюветы. Тогда из (3) получим

$$-\tilde{N}_{\text{T}} \tilde{\sigma}_{\text{эт.к}}^{-1}(\lambda) \ln[(C_1/C_2\Gamma_1)\tilde{T}_{\text{эт.к}}] = -\tilde{N}_{\text{T}} \tilde{\sigma}_{\text{эт.к}}^{-1}(\lambda) \times \ln[(C_1/C_2\Gamma)\tilde{T}_{\text{эт.к}}] - N_{\text{к.к}} \tilde{\sigma}_{\text{эт.к}}^{-1}(\lambda) \ln[(C_1/C_2\Gamma)\tilde{T}_{\text{эт.к}}], \quad (4)$$

откуда

$$\tilde{N}_{\text{T}} = N_{\text{к.к}} \ln[(C_1/C_2\Gamma)\tilde{T}_{\text{эт.к}}] / \ln[(\Gamma/\Gamma_1)]. \quad (5)$$

Формула (5), в отличие от полученной ранее в [6] для \tilde{N}_{T} , не зависит от сечения поглощения $\tilde{\sigma}_{\text{эт.к}}$ и трудно определяемого параметра α , что дает возможность определять абсолютную интегральную концентрацию измеряемого газа на атмосферной трассе по зарегистрированным сигналам спектро радиометра Γ и Γ_1 .

2. Методика градуировки и измерений

Если $J_0(\lambda)$, $C_1(\lambda)$, $C_2(\lambda)$ в формуле (1) зависят от λ в спектральном интервале измерений $[\lambda_1, \lambda_2]$, то предварительно необходимо провести градуировку спектро радиометра с калибровочными кюветами, содержащими различные концентрации изме-

ряемого газа, по процедуре, описанной в [6]. При этом цветовая температура калибровочного источника должна соответствовать цветовой температуре регистрируемого рассеянного фона. Наличие фонового измеряемого газа на атмосферной трассе также может влиять на результаты измерения.

Балансировка каналов оптического спектро радиометра при наличии на трассе фонового измеряемого газа выглядит следующим образом:

$$\langle e^{-\tau_{\text{T}}(\lambda)} \rangle_{\Delta\lambda} \neq 1 \text{ и } \Gamma = 1. \quad (6)$$

Тогда из (1)

$$C_2/C_1 = \langle e^{-\tau_{\text{T}}(\lambda)} \rangle_{\Delta\lambda} / \langle e^{-\tau_{\text{эт.к}}(\lambda)} \rangle_{\Delta\lambda} \quad (7)$$

и формула (5) с учетом (6), (7) примет вид

$$\tilde{N}_{\text{T}} = N_{\text{к.к}} \ln(\langle e^{-\sigma_{\text{эт.к}}(\lambda)\tilde{N}_{\text{T}}} \rangle_{\Delta\lambda}) / \ln(1/\Gamma_1). \quad (8)$$

Выражение (8) является интегральным уравнением относительно \tilde{N}_{T} , которое может быть решено только численным методом.

Обозначим интегральное пропускание измеряемого газа на трассе

$$T_{\text{T}} = \langle e^{-\sigma_{\text{эт.к}}(\lambda)\tilde{N}_{\text{T}}} \rangle_{\Delta\lambda}. \quad (9)$$

Оценки показывают, что при сильном поглощении на трассе $T_{\text{T}} = 0,1$, $\Gamma_1 = 0,3$. При слабом поглощении $T_{\text{T}} = 0,9$; $\Gamma_1 = 0,95$. Если $T_{\text{T}} = 0$, то $\tilde{N}_{\text{T}} = \infty$ и, так как $\Gamma_1 \neq 0$, изменения не возможны.

Отметим, что формула (8) применима и при отсутствии балансировки каналов спектро радиометра, если определено заранее значение C_2/C_1 . Как было показано ранее [6], если источник света $J_0(\lambda)$ зависит от длины волны в выбранном спектральном диапазоне $\Delta\lambda$, то условие балансировки каналов (7) изменится. В этом случае из выражения (1), если $\Gamma = 1$, получаем

$$C_2/C_1 = [\langle J_0(\lambda) e^{-\tau_{\text{эт.к}}(\lambda)} \rangle_{\Delta\lambda}] / \langle J_0(\lambda) \rangle_{\Delta\lambda} \quad (10)$$

и отношение C_2/C_1 становится зависимым от функции источника света $J_0(\lambda)$. Эта зависимость пропадает только в максимумах функции $J_0(\lambda)$, если полуширина спектрального пропускания фильтра $\Delta\lambda \ll \Delta\lambda_{\text{ист}}$ источника света в диапазоне $[\lambda_1, \lambda_2]$ [6]. Функции Γ и Γ_1 также зависят от $J_0(\lambda)$, но они измеряемы. Значение $\tilde{T}_{\text{эт.к}}$ зависит от спектральной зависимости сечения поглощения

$$\tilde{\sigma}_{\text{эт.к}} = \frac{1}{\Delta\lambda} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \sigma_{\text{эт.к}}(\lambda) d\lambda. \quad (11)$$

Поэтому для определения \tilde{N}_{T} с наименьшей погрешностью необходимо знать $\tilde{T}_{\text{эт.к}}$ для выбранного источника излучения, которое определяется следующим образом.

1) Оптическая ось спектро радиометра наводится на другой источник излучения, идентичный по спектру в рабочей полосе $\Delta\lambda$ источнику излучения

на трассе измерения. На трассе может присутствовать измеряемый фоновый газ: $\langle e^{-\tau_{\text{ф.г}}(\lambda)} \rangle_{\Delta\lambda} \neq 1$.

2) Эталонная кювета с измеряемым газом удаляется из 1-го канала спектрорадиометра.

3) Сигналы с обоих каналов выравниваются между собой, так что

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} J_0(\lambda) C_1(\lambda) e^{-\tau_{\text{ф.г}}(\lambda)} d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} J_0(\lambda) C_2(\lambda) e^{-\tau_{\text{ф.г}}(\lambda)} d\lambda. \quad (12)$$

4) Ставится обратно эталонная кювета с измеряемым газом (при условии $\tau_{\text{эт.к}}(\lambda) \gg \tau_{\text{ф.г}}(\lambda)$ на спектральных линиях поглощения), и по соотношению сигналов в каналах спектрорадиометра находится

$$\tilde{T}_{\text{эт.к}} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} J_0(\lambda) C_1(\lambda) e^{-\tau_{\text{эт.к}}(\lambda)} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} J_0(\lambda) C_2(\lambda) e^{-\tau_{\text{ф.г}}(\lambda)} d\lambda}. \quad (13)$$

При проведении калибровки эталонной кюветы от стандартизированного источника света на небольших дистанциях (10–20 м) по процедуре, описанной в [23], между источником света и спектро-радиометром можно положить

$$\langle e^{-\tau_{\text{ф.г}}(\lambda)} \rangle_{\Delta\lambda} = 1. \quad (14)$$

Тогда

$$\tilde{T}_{\text{эт.к}} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} J_0(\lambda) C_1(\lambda) e^{-\tau_{\text{эт.к}}(\lambda)} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} J_0(\lambda) C_2(\lambda) d\lambda}. \quad (15)$$

Если дополнительно к условию (14) C_1 и C_2 не зависят от λ в интервале $\Delta\lambda$, то

$$\tilde{T}_{\text{эт.к}} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} J_0(\lambda) \alpha_s e^{-\tau_{\text{эт.к}}(\lambda)} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} J_0(\lambda) d\lambda}, \quad (16)$$

где α_s – коэффициент пропускания оптических окон эталонной кюветы, не зависящий от λ в интервале длин волн $\Delta\lambda$.

Таким образом, по данной методике производится градуировка эталонной корреляционной кюветы с измеряемым газом на заданный спектральный источник излучения.

В лабораторных условиях, когда $\langle e^{-\tau_{\text{ф.г}}(\lambda)} \rangle_{\Delta\lambda} = 1$, для градуировки наиболее подходят источники излучения со спектром, близким к абсолютно черному телу, которые имеют различную цветовую температуру в максимуме излучения. Лампа LT-T5 BIO light излучает свет, очень близкий к солнечному, но при одной цветовой температуре ~6000 К и может быть использована при градуировке аппаратуры на прямой и нейтрально рассеянный солнечный

свет в полдень. Светоизлучающие диоды OLED, позволяющие изменять цветовую температуру от 2300 до 8200 К, полностью соответствуют солнечному освещению в разное время суток.

Корректировку цветовой температуры, а следовательно, и спектральной зависимости $J_0(\lambda)$ можно также осуществлять с использованием дополнительных светофильтров, устанавливаемых последовательно с калибровочными кюветами [16, 17]. При этом спектральное пропускание дополнительного фильтра $T_f(\lambda)$ в спектральном интервале $\Delta\lambda$ должно удовлетворять условию

$$T_f(\lambda) J_0(\lambda) = \text{const}. \quad (17)$$

Другие факторы, влияющие на результаты измерений, могут быть связаны с аэрозолем, с перепадами температуры и давления на трассе зондирования, с возможным спектральным взаимным перекрытием спектра измеряемого газа со спектрами неизмеряемых газов промвыброса и атмосферы, с поляризацией фонового рассеянного излучения [16, 17, 19–21].

Аэрозоль, рассеивая солнечную радиацию под разными углами в зоне промвыброса, дает паразитный дополнительный вклад в полезный регистрируемый сигнал. В [20] экспериментально было исследовано влияние подфакельного слоя выброса на результаты корреляционных измерений SO_2 . Показано монотонное возрастание ошибки измерений до 40% при увеличении толщины слоя до 900 м.

Влияние температуры и давления обусловлено изменением полуширины отдельных спектральных линий. Для атмосферных давлений и объемной концентрации поглощающего компонента не более 10^{-3} полуширина отдельной линии может быть представлена [19] в виде

$$\gamma_L = \gamma_L^0 P / P_0 \sqrt{T/T_0}, \quad (18)$$

где γ_L – ударная полуширина спектральной линии при давлении P и температуре T , а γ_L^0 – при давлении P_0 и температуре T_0 .

На трассе в пределах дистанции измерений $P = P_0$, но T может сильно меняться, особенно около источника газового выброса. Так, из (18) следует, что при $T = 300$ К, $T_0 = 250$ К $\gamma_L = 1,1\gamma_L^0$.

Чтобы скомпенсировать влияние температуры, давление в эталонной корреляционной кювете должно быть уменьшено в 1,5–2 раза при неизменной массе газа в ней, что вызовет сужение полуширины спектральных линий измеряемого газа в ней также в 1,5–2 раза. И периферийные участки спектров отдельных линий измеряемого газа практически не будут перекрываться с контурами линий эталонной кюветы. Это ведет к значительному уменьшению погрешности измерений за счет вариации температуры на реальной атмосферной трассе.

Спектры поглощения неизмеряемых примесных газов в зоне выброса могут частично перекрываться со спектром измеряемого газа, что также влияет на результаты измерений. Для оценки этого влияния

необходимо провести две градуировки спектро- радиометра — при ориентации телескопа в зону выброса и вне этой зоны. Спектральные характеристики фоновых рассеивающих объектов (атмосфера, облака, лес и т.д.) должны быть идентичны в обоих случаях. Построенные градуировочные зависимости сравниваются между собой, и по разности их абсолютных значений оценивается ошибка измерений. Если подходящую область вне зоны выброса найти не удастся, то градуировка производится в лабораторных условиях с цветовой температурой источника излучения, близкой к температуре фонового источника излучения, на который направлена оптическая ось телескопа, проходящая через зону выброса. При этом перед диафрагмой оптического спектроанализатора устанавливается дополнительная калибровочная кювета с измеряемым газом, имеющим интегральную концентрацию, соответствующую содержанию фонового измеряемого газа на трассе зондирования, которая обычно составляет 100–200 мг/м². Эксперименты показали [14, 22], что для крупных промышленных выбросов дополнительная погрешность за счет влияния неизмеряемых газов может достигать 20–30%.

Влияние поляризации света на ошибку измерений [20] также может быть оценено по аналогичной методике с использованием калибровочных кювет.

3. Результаты экспериментальных исследований

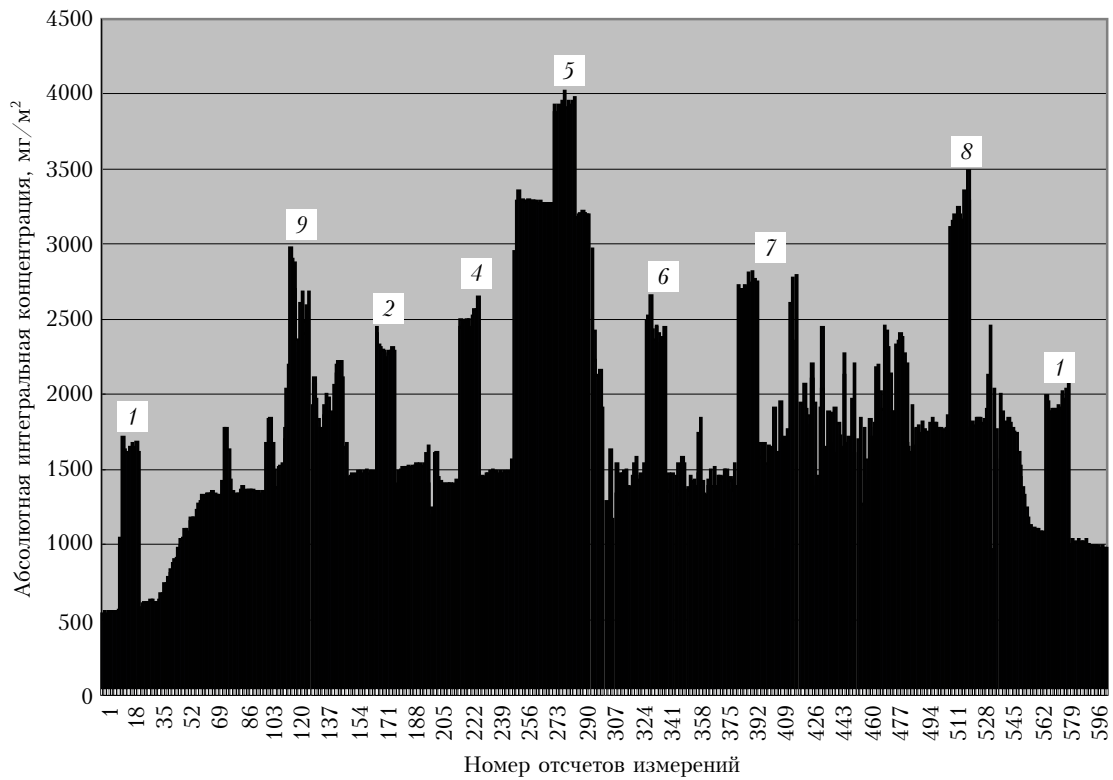
Таким образом, при проведении мониторинга важно, чтобы цветовые температуры в области выброса газа и вне этой области совпадали. Общая схема выполненных экспериментальных исследований в реальной атмосфере вблизи промобъекта ГРЭС-2 г. Томска подобна представленной в [6]. На рис. 1 области пассивного зондирования обозначены цифрами 1–9. Область 1 соответствует наведению оптической оси телескопа на небо под углом 25° к горизонту, проекция на землю которой проходит между трубами ГРЭС-2; 2 — оптическая ось телескопа находится непосредственно внизу между трубами ГРЭС-2 над зданием; 3 — ось телескопа наведена на градирню ГРЭС-2; 4 — наведена на крышу здания; 5 — на светлое здание; 6 — на темно-зеленую сосну; 7 — на дерево с почти опавшими желтыми листьями; 8 — на дерево с желтыми листьями; 9 — на шлейф дыма, идущего из труб ГРЭС-2.

На рис. 1 представлены примеры измерений абсолютной интегральной концентрации двуокиси азота в реальной атмосфере без учета корректировки оптического фона, рассеянного от атмосферы или объектов наблюдения (здания, трубы, деревья и т.д.). Измерения проведены в условиях ясной погоды и при наличии сплошной облачности. Оценка влияния рассеянного фона на результаты измерений осуществлялась с помощью калибровочной кюветы с NO₂ (~1000 мг/м²), которая вводилась в оптический приемный тракт ДАН-2 после

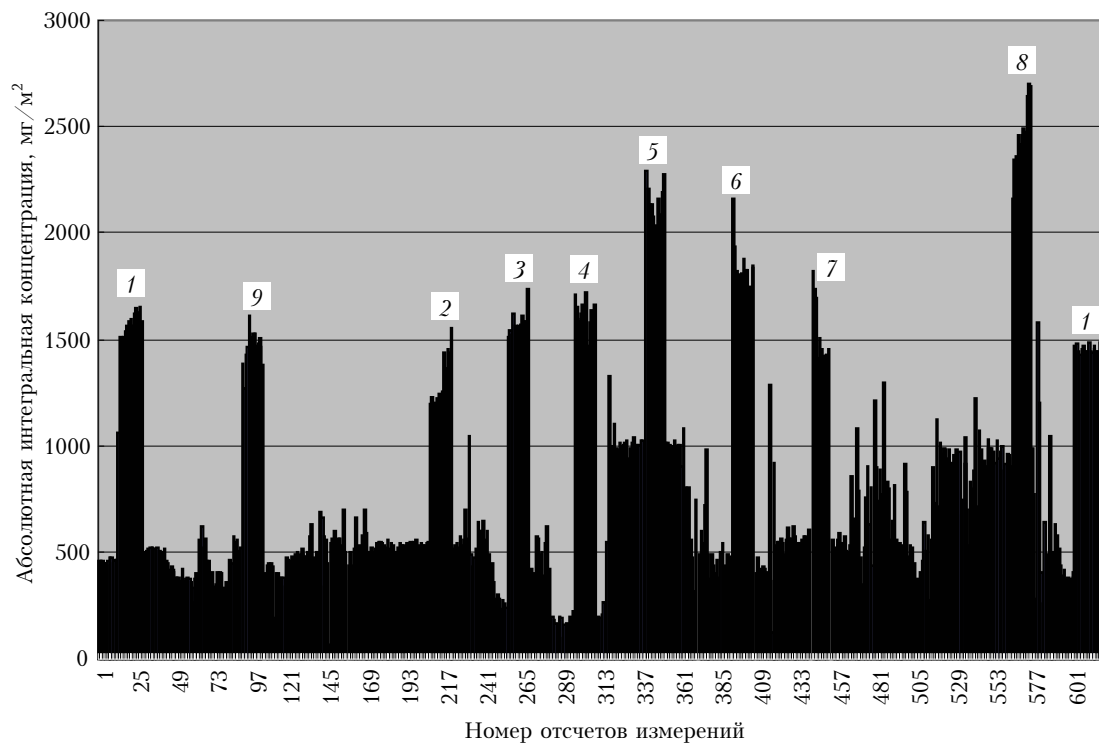
телескопа перед фильтрующей диафрагмой в области формирования изображений объектов наблюдения.

Измерения без корректировки оптического фона проводились следующим образом. Градуировка аппаратуры производилась только один раз в области 1. Затем калибровочная кювета с NO₂ вводилась в приемный тракт телескопа только в режиме измерений. Как показали результаты исследований, в этом случае измеренная абсолютная интегральная концентрация NO₂ в калибровочной кювете сильно зависит от характеристик рассеянного фона. Ошибка измерений при этом может достигать 200% (например, такое отличие измеренных концентраций наблюдается при регистрации рассеянного фона в ясную погоду от дерева с частично опавшими желтыми листьями и от атмосферы над крышей, рис. 1, а, области 2 и 8). Наибольшее влияние на результаты измерений может оказать светлый фон (например, здание, рис. 1, а, отсчеты 261–301, область 5). Темно-серая облачность, рис. 1, б, вызывает значительное перераспределение измеренных концентраций по сравнению с измерениями при ясной погоде. Тем не менее общая закономерность остается прежней: измеряемая абсолютная интегральная концентрация двуокиси азота существенным образом зависит от регистрируемого оптического фона, поэтому в процесс проведения измерений необходимо вводить корректировку фона согласно изложенной выше методике.

На рис. 2 показаны некоторые результаты измерений, полученные при учете корректировки оптического рассеянного фона. Измерения проводились в ясную погоду (рис. 2, а) и при наличии облачности (рис. 2, б). В условиях ясной погоды абсолютная интегральная концентрация двуокиси азота определялась по вертикальному разрезу сверху вниз, с верхней части неба (область 1) до атмосферы над крышей здания (2). В интервале между ними наблюдалось увеличение абсолютной интегральной концентрации NO₂ за счет выбросов ГРЭС-2. Область 3 (см. рис. 1) соответствует приему оптического сигнала от поверхности средней градирни ГРЭС-2. Средний уровень абсолютной интегральной концентрации NO₂ на участке «градирня–телескоп» составил 150–200 мг/м² и практически не менялся при ориентации телескопа на другие объекты наблюдения (области 4, 5): крышу, светлое здание под крышей, и в то же время абсолютная интегральная концентрация, измеренная на ближней трассе (области 6, 7), в пределах расстояний 100–200 м значительно упала до 50–70 мг/м², что находится в пределах ошибок измерений. Ошибка измерений абсолютной интегральной концентрации NO₂, находящейся в запаянной калибровочной кювете (1000 мг/м²), от разных источников фонового рассеянного излучения составила ~20%. Аналогичные результаты были получены в условиях светло-серой облачности, присутствующей в атмосфере (рис. 2, б). Таким образом, введенная процедура корректировки оптического рассеянного фонового излучения позволяет примерно в 10 раз повысить точность измерений по сравнению с измерениями без корректировки фона.

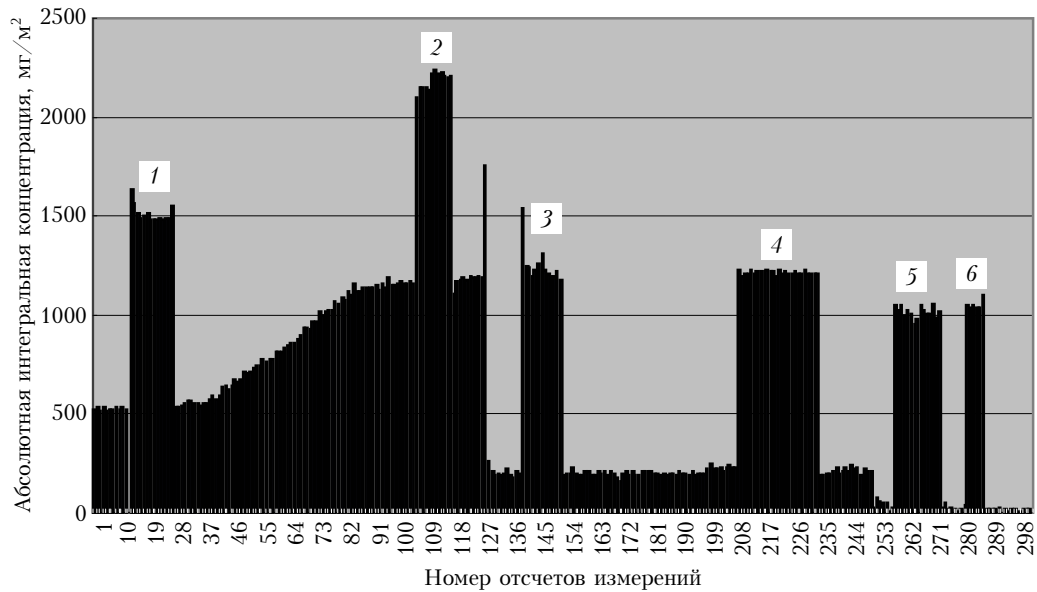


a

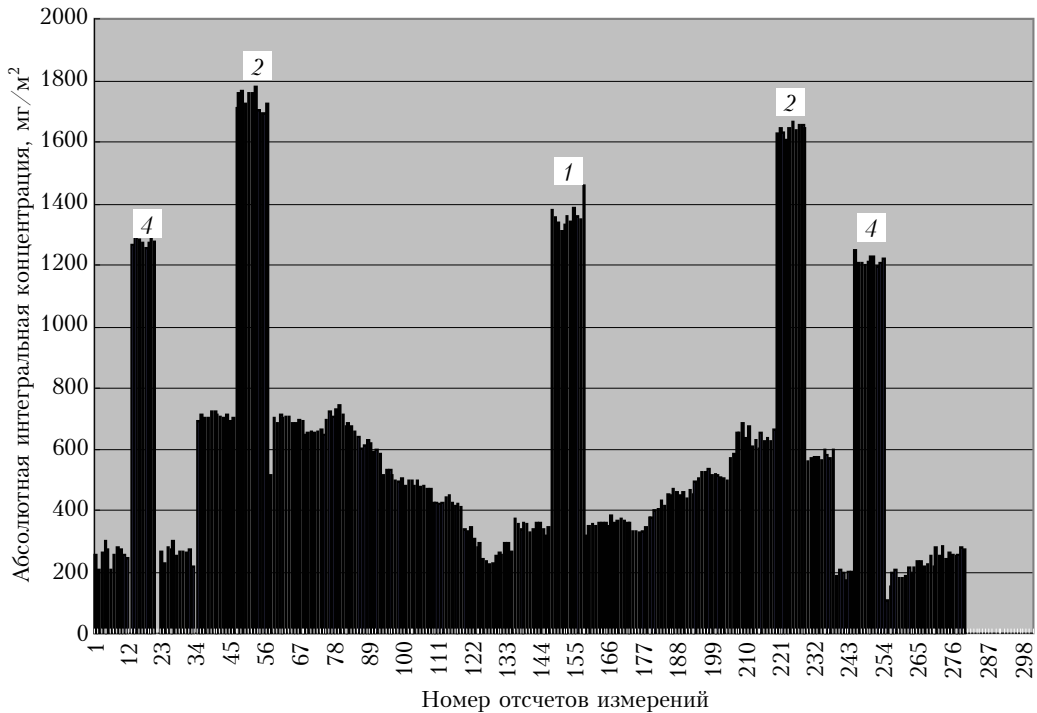


б

Рис. 1. Измерения абсолютной интегральной концентрации NO₂, выполненные с калибровочной кюветой в реальной атмосфере, без учета корректировки фонового излучения: *a* – 14.10.2005. 11:35. Ясно. Ветер южный, 3–5 м/с. Дым светлый из правой трубы; *б* – 10.10.2005. 14:00. Сплошная темно-серая облачность. Ветер северный, 2–4 м/с. Дым светлый из правой трубы



a



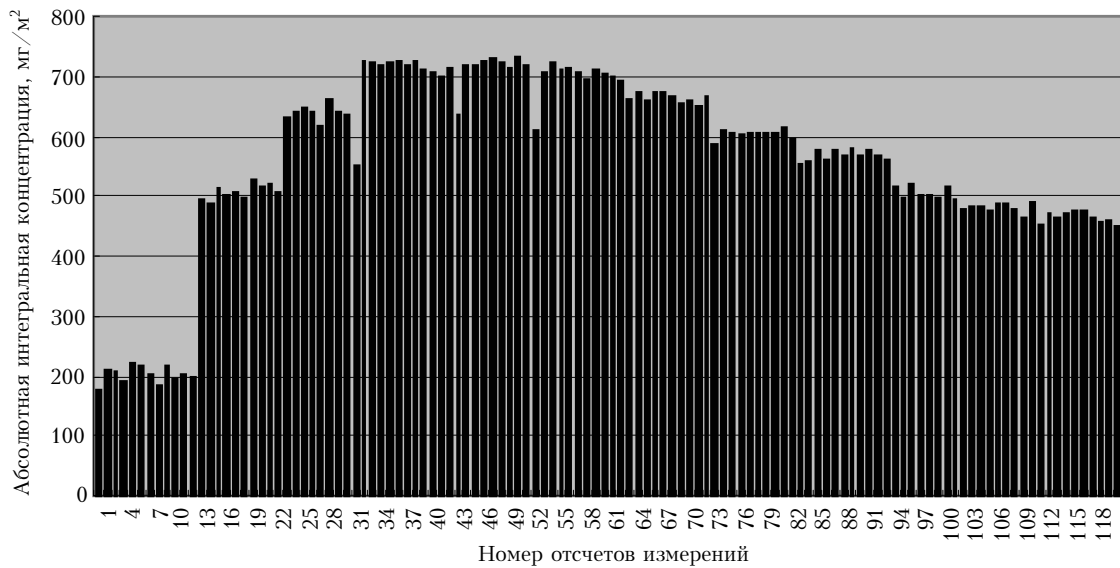
б

Рис. 2. Измерения абсолютной интегральной концентрации NO_2 , выполненные с калибровочной кюветой в реальной атмосфере с учетом корректировки фонового излучения: *a* – 07.10.2005. 14:38. Ясно. Ветер южный, 3–7 м/с. Дым слабый из правой трубы; *б* – 12.10.2005. 11:08. Сплошная светло-серая облачность. Ветер южный, 2–5 м/с. Дым светлый из правой трубы

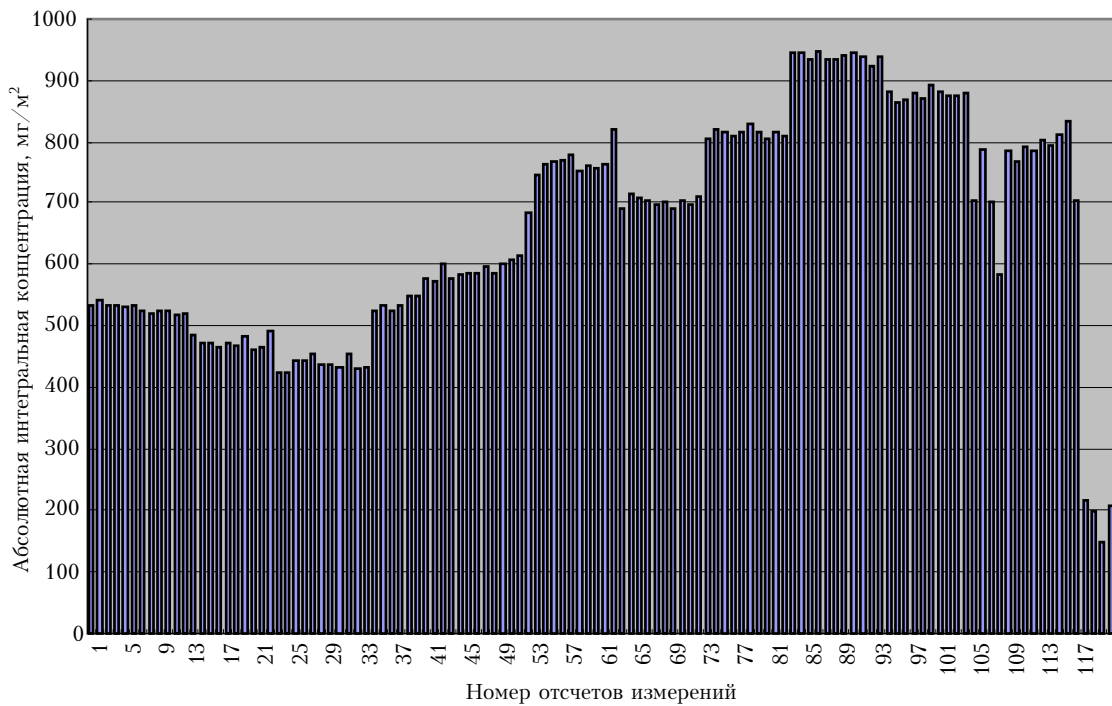
На рис. 3 показаны результаты реальных измерений, проведенных с корректировкой фона в разное время.

Рис. 3, *a* иллюстрирует изменения абсолютной интегральной концентрации NO_2 по вертикальному профилю, проходящему через среднюю градирню ГРЭС-2 и полученному при ясной погоде. Но в данном случае оптическая ось телескопа первоначально ориентировалась на среднюю градирню

ГРЭС-2, а затем поднималась в свободную атмосферу на 25° . Отсчеты измерений 1–12 показывают значения абсолютной интегральной концентрации NO_2 на трассе «градирня–телескоп». При ориентации оптической оси телескопа выше градирни в свободную атмосферу наблюдается скачок концентрации до $\sim 500 \text{ мг/м}^2$ с последующим ростом до $\sim 730 \text{ мг/м}^2$, после чего происходит спад концентраций фактически до фоновых значений.



a



б

Рис. 3. Измерения абсолютной интегральной концентрации двуоксида азота по вертикальному профилю (снизу вверх): *a* – 07.03.2003. 16:40. Ясно. Ветер северный, 2–7 м/с. Дым из правой трубы; *б* – 24.04.03. 11:00. Сверху вниз. Сплошная серая облачность. Ветер южный, 2–4 м/с. Дым из правой трубы

На рис. 3, *б* приведен еще один пример измерений в условиях сплошной серой облачности. Оптическая ось телескопа сканируется по вертикальному профилю сверху вниз. Этот график также показывает наличие максимума и локализацию аномалии NO_2 в верхней части этого профиля, что достаточно хорошо согласуется с данными, полученными в ясную погоду для того же профиля (см. рис. 3, *а*).

В результате была подтверждена работоспособность предлагаемой методики измерений в раз-

личных условиях фоновой засветки и в дальнейшем получена определенная статистика измерений абсолютных интегральных концентраций NO_2 по горизонтальному профилю. Этот массив данных, полученных в 2003–2008 гг., включает ~140 измеренных горизонтальных профилей при ясной погоде и при наличии облачности. Статистика показывает, что при преобладании южных ветров в г. Томске максимум абсолютных интегральных концентраций NO_2 локализуется в основном с правой стороны от труб ГРЭС-2. В этой области максимальные

значения достигают 4500 мг/м², минимальные — 700 мг/м². Средний размер концентрационных аномалий по вертикали 500–1000 м, по горизонтали 300–700 м.

Заключение

Таким образом, в данной статье предложена методика дистанционных измерений абсолютных интегральных концентраций NO₂ в диапазоне 100–5000 мг/м² с использованием корреляционной аппаратуры ДАН-2, работающей в области спектра 0,38–0,42 мкм.

Показано, что для проведения атмосферных измерений предварительно необходимо проводить градуировку оптико-электронного тракта ДАН-2 от источников света с различной цветовой температурой, соответствующей спектральному фону рассеянного сигнала, с устанавливаемыми последовательно калибровочными кюветами с измеряемым газом, имеющим интегральную концентрацию, в рабочем диапазоне измерений на трассе зондирования.

Экспериментально установлено, что рассеивающие объекты с различными цветовыми температурами могут привести к погрешности измерений до сотен процентов. Следует избегать также зон с повышенной концентрацией аэрозоля и поляризации фонового рассеянного излучения.

Разработанная методика была практически апробирована и позволила четко выявлять газовые аномалии NO₂ над крупными промышленными объектами с интегральными концентрациями 100–5000 мг/м² и оценивать их пространственную локализацию и распространение.

1. Метельская Н.С., Кабашиков В.П. Газофилтровой метод в контроле общего содержания SO₂ в атмосфере // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 3. С. 218–222.
2. Кабашиков В.П., Метельская Н.С. Помехоустойчивость пассивного метода недисперсионной корреляционной спектроскопии при определении содержания SO₂ в атмосфере // Ж. прикл. спектроскопии. 2006. Т. 73, № 4. С. 525–529.
3. Кабашиков В.П., Метельская Н.С. Применение метода недисперсионной корреляционной спектроскопии для дистанционного контроля содержания CO, SO₂ и NO₂ в атмосфере // Ж. прикл. спектроскопии. 2005. Т. 72, № 2. С. 260–263.
4. Баландин С.Ф., Копытин Ю.Д., Шишигин С.А., Коханов В.И., Зыков С.Н., Петров А.И. Дистанционный газовый анализатор ДАН-1 // Тезисы докл. 7-го Междунар. симп. «Оптика атмосферы и океана». Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2000. С. 114.
5. Копытин Ю.Д., Носов В.В., Антипов А.Б., Исакова А.И., Самохвалов М.А., Чистякова Л.К. Дистанционные методы прогноза нефтяных, рудных и техногенных аномалий по геоатмосферным проявлениям. Томск: ИОА СО РАН, 2000. С. 99–103.
6. Баландин С.Ф. Исследование распределения относительной погонной концентрации NO₂ вблизи крупного промышленного центра // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18, № 11. С. 999–1006.
7. Кондратьев К.Я., Исидоров В.А. Окислы азота как химически и оптически активные газовые компоненты

тропосферы // Оптика атмосфер. и океана. 2001. Т. 14, № 8. С. 643–652.

8. Баландин С.Ф., Копытин Ю.Д., Зыков С.Н., Коханов В.И., Петров А.И., Шишигин С.А. Разработка методики зондирования плотных газовых шлейфов на основе использования оптического корреляционного газоанализатора // Тезисы доклада VII Междунар. симпози. «Оптика атмосферы и океана». Томск: ИОА СО РАН. 16–19 июля 2000. С. 115.
9. Баландин С.Ф. Измерения абсолютной интегральной концентрации NO₂ в свободной атмосфере с использованием спектрометра ДАН-2 // Тезисы доклада XV Междунар. симпози. «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Красноярск. 22–29 июня 2008. С. 151.
10. Balandin S.F. Calibration of DAN-2 remote spectroradiometer from different types of surface // Proc. SPIE. 2004. V. 5743. P. 28–33.
11. Balandin S.F., Kopytin Y.D., Kokhanov V.I., Shishigin S.A. Tests of the remote sensing spectroradiometer DAN-2 on atmospheric lines // Pros. SPIE. 2004. V. 5396. P. 49–56.
12. Balandin S.F., Shishigin S.A. High-sensitive remote detector of hydrocarbon leakages from oil-and-gas pipelines // Int. Conf. on Optical Technologies for Atmospheric, Ocean and Environmental Studies (ICOT). Beijing, China, 2004. P. 71–72.
13. Баландин С.Ф. Разработка методик дистанционного зондирования газодисперсных сред на основе подхода пассивной локализации // Изв. вузов. Физ. 2000. № 3. С. 95. Деп. в ВИНТИ. Рег. № 3521–1399 от 29.11.99. 30 с.
14. Баландин С.Ф., Копытин Ю.Д., Коханов В.И., Шишигин С.А., Петров А.И. Дистанционный анализатор газовых выбросов УФ-диапазона // Тез. докл. 6-го Междунар. симпози. «Оптика атмосферы и океана». Томск: ИОА СО РАН. 23–26 июня 1999. С. 117.
15. Balandin S.F., Kopytin Y.D., Kokhanov V.I., Shishigin S.A. Sounding of dense Gas Plumes on the basis of the use of the optical correlation Analyzer // Joint Int. Sympos. «Atmospheric and Ocean optics». Institute of Solar-Terrestrial Physics, Institute of Atmospheric Optics. Irkutsk, June 25–29, 2001. P. 156.
16. Beloborodov V.V. Method of spectral compensation and its application in the ultraviolet for sulfur dioxide control with a gas-filter correlation instrument // Appl. Opt. 2002. V. 41, N 18. P. 3517–3522.
17. Николаев А.Н. Метрологические характеристики корреляционного недисперсионного радиометра с газовыми фильтрами // Дистанционный мониторинг загрязнения атмосферы и выбросов. М.: Гидрометеоздат, 1991. Вып. 78. С. 68–80.
18. Кабашиков В.П., Куренов А.А., Макаревич Н.С. К теории метода недисперсионной корреляционной спектроскопии // Ж. прикл. спектроскопии. 1986. Т. 45, № 6. С. 965–970.
19. Назаров И.М., Николаев А.Н., Фридман Ш.Д. Основы дистанционных методов мониторинга загрязнения природной среды. Л.: Гидрометеоздат, 1983. С. 24–170.
20. Решетников А.И., Белобородов В.В., Бондаренко А.А., Корхин Я.М. Дистанционное исследование выбросов и массопереноса SO₂ корреляционным спектрометром КОСПЕК-IVB с борта летающей лаборатории // Дистанционный мониторинг загрязнения атмосферы и выбросов. М.: Гидрометеоздат, 1991. Вып. 78. С. 56–68.

21. Николаев А.Н., Фридман Ш.Д. Измерения параметров факелов с использованием пассивного дистанционного прибора и комплекта кюветных газоанализаторов // Дистанционный мониторинг загрязнения атмосферы и выбросов. М.: Гидрометеоздат, 1991. Вып. 78. С. 80–88.
22. Баландин С.Ф., Соловьев А.А., Копытин Ю.Д. Мобильная аппаратура для дистанционного контроля газового состава промышленных зон промобъектов // Тезисы докл. 1-го Межреспубл. симпоз. «Оптика атмосферы и океана». Томск, 1994. Ч. 2. С. 194–195.
23. Сигернес Ф., Холмс И.М., Черноус С.А., Свиню Т., Дирланд М., Лоренцен Д.А., Моен И., Дир Ч.С. Абсолютная калибровка оптических приборов с малым полем зрения // Оптич. ж. 2007. Т. 74, № 10. С. 29–35.

S.F. Balandin. Development of calibration methods for measurement of absolute integral concentration of nitrogen dioxide in the free atmosphere, using the correlation spectroradiometer DAN-2.

The procedure of passive measuring of integrated concentrations of nitrogen dioxide in the meteorological atmosphere with the help of correlation spectral instrumentation DAN-2, working in the field of 0.4 microns, is described. The tests of the offered method for measurement of concentration profiles of NO₂ near large industrial objects in different conditions of the background noise were carried out: the pure clear sky, the cloudiness, buildings, trees, etc. It is shown that there is an opportunity of measuring the integrated concentrations under conditions of the registration of correction of a dissipated optical background in range 200–4500 мг/м² with an error of 20%.