

С.Ф. Баландин

## Исследование распределения относительной погонной концентрации NO<sub>2</sub> вблизи крупного промышленного центра

*Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск*

Поступила в редакцию 28.12.2004 г.

Представлены результаты дистанционных (до 3 км) измерений в сильно загрязненной реальной атмосфере вблизи крупного промышленного объекта г. Томска профилей диоксида азота с помощью разработанной корреляционной спектральной аппаратуры ДАН-2, работающей по рассеянному солнечному излучению в области спектра 0,4 мкм.

Исследовалась возможность использования рассеянного солнечного излучения от различных типов поверхностей, характерных для городских ландшафтов (стены и крыши зданий, трубы промышленных предприятий, деревья и др.) в качестве опорного калибровочного сигнала для данной аппаратуры. Проведено сравнение эффективности использования данных калибровочных сигналов и калибровочных сигналов, полученных от фонового солнечного излучения, рассеянного в атмосфере. Выявлено, что диффузионно рассеивающие шероховатые поверхности наиболее эффективны для калибровки аппаратуры. Показана возможность функционирования аппаратуры и измерения интегральных по трассе концентраций в условиях сильной облачности. Обнаружено, что вблизи источника средняя стационарная концентрация диоксида азота на высоте выброса составляет 1–5 мг/м<sup>3</sup> в радиусе 100–200 м от источника и при умеренном ветре слабо зависит от его направления.

В последние годы к наиболее перспективным методам создания средств измерений загрязнения атмосферного воздуха, контроля технологических процессов и промышленных выбросов относится корреляционная спектроскопия [1–6, 9–19]. При этом наибольший интерес для практики представляет способ с использованием эталонной кюветы, содержа-

щей исследуемый примесный газ [5, 8, 9, 13–15], благодаря сравнительной простоте его использования. Данный подход был реализован в созданной спектральной измерительной аппаратуре ДАН-2 [2] для видимого и УФ-диапазонов длин волн.

Блок-схема разработанного корреляционного [1] анализатора представлена на рис. 1.

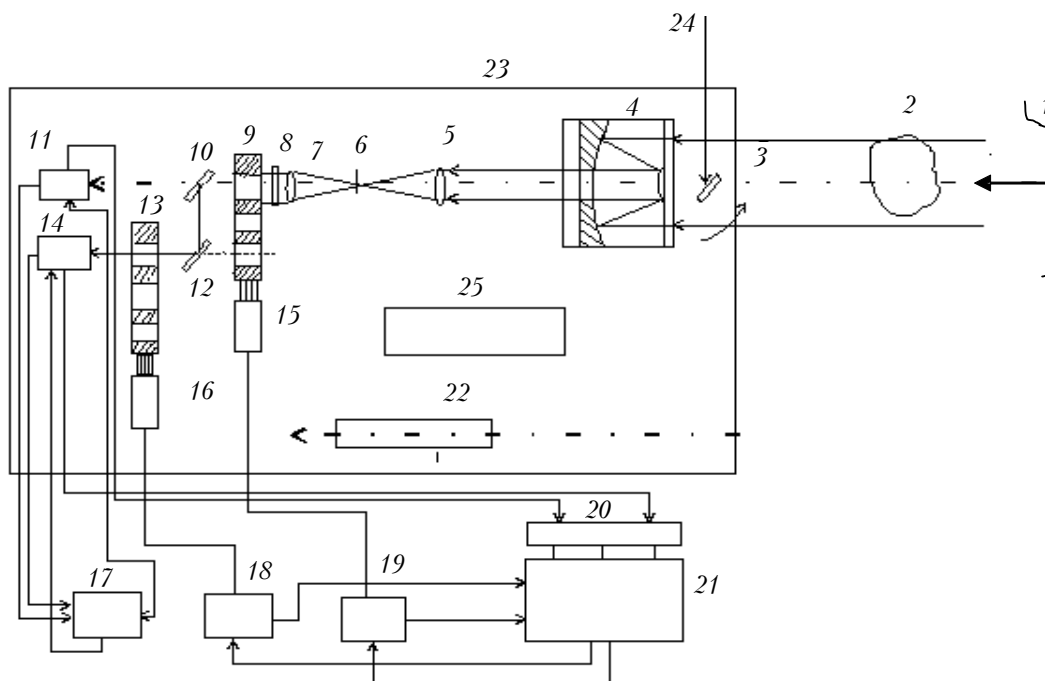


Рис. 1. Дистанционный анализатор газовых выбросов ДАН-2

Излучение от неба (рассеянный фон), солнца или искусственного источника излучения 1 проходит газовое облако 2 с измеряемым газом и попадает в телескоп Кассегрена 4 с диаметром большого зеркала 270 мм. После телескопа излучение фокусируется кварцевой линзой 5 на диафрагме 6, диаметр которой определяет пространственное разрешение аппаратуры. Кварцевая линза 7 формирует от точечной диафрагмы 6 параллельный световой поток, проходящий полосовой интерференционный фильтр 8 и калибровочную кварцевую кювету с зондируемым газом, которая находится в кассете 9, приводимой во вращение шаговым двигателем 15. Далее световой поток разделяется на два канала с помощью полупрозрачной кварцевой пластины 10 и зеркала 12. По одному из каналов, после прохождения пластины 10, световой поток попадает на фотоприемник 11. По другому каналу, после отражения от зеркала 12, излучение проходит эталонную кювету, заполненную исследуемым газом, и попадает на фотоприемник 14. Эталонная кювета закреплена в кассете 13, которая вращается шаговым двигателем 16. Электронный блок 17 служит как для питания фотоприемников 11, 14, так и для предварительной обработки сигналов, поступающих от них (для предварительной настройки параметров). Сигналы с фотоприемников 11, 14 параллельно поступают на АЦП 20, где оцифровываются и затем вводятся в ЭВМ 21. Блоки управления шаговыми двигателями 18, 19 вырабатывают тактовые сигналы в соответствии с программой, заложеной в ЭВМ.

Для предварительной настройки и юстировки анализатора применен теодолит 22, оптическая ось которого ориентирована в пространстве параллельно оптической оси телескопа 4. Для калибровки анализатора по фону неба, солнцу или искусственному источнику 24 использован диффузно-матовый экран 3. Видеокамера 25 служит для визуализации дымовых шлейфов труб и определения точных координат точек зондирования по характерным топографическим точкам местности. Вся оптическая система анализатора закреплена на координатной платформе 23, позволяющей проводить сканирование пространства по двум угловым координатам.

Управление процессом измерений, обработка сигналов и отображение на экране монитора осуществляются в реальном масштабе времени. Применение автоматического сканирования кассетными устройствами 9, 13 позволяет значительно повысить оперативность работы и расширить число определяемых ингредиентов в одном цикле измерений. Среднее время измерения с учетом калибровки одного газового компонента составляет не более 1 мин. При этом пространственное разрешение телескопа достигает 1 м на расстоянии 3 км от объекта измерений. Измерения трассовых концентраций газа на разработанной аппаратуре ДАН-2 [2] производятся следующим образом.

1. Предварительно осуществляется балансировка обоих каналов при наводке телескопа на фоновый участок атмосферы, не содержащий измеряемый примесный газ. Сигналы, регистрируемые фотомножителями, равны между собой:  $U_1 = U_2$ .

2. В оптический тракт с помощью вращающейся кассеты 9 (рис. 1) вводится калибровочная кварцевая кювета с известной концентрацией измеряемого газа  $N_{изв}$ . Определяется соотношение  $\frac{U_3 - U_4}{U_3 + U_4} = k_0$ ,

зависящее от разбалансировки каналов  $U_3 - U_4$ ,  $k_0$  — коэффициент калибровки. После осуществления этой операции калибровочная кювета убирается.

3. Оптическая ось телескопа наводится на участок атмосферы с измеряемым примесным газом, и определяется соотношение  $\frac{U_5 - U_6}{U_5 + U_6} = k_1$ , где  $U_5 - U_6$  —

разбалансировка сигналов фотоприемников при условии наличия газа на трассе.

4. Измеренная концентрация примесного газа  $\tilde{N}_x$  на трассе находится из пропорции

$$\begin{aligned} k_0 - N_{изв} \\ k_1 - \tilde{N}_x, \end{aligned}$$

откуда  $\tilde{N}_x = \frac{k_1 N_{изв}}{k_0}$ .

В случае нелинейной зависимости  $k_0(N_{изв})$  определяется несколько значений  $k_0$  для известных концентраций примесного газа в калибровочных кюветах при ориентации телескопа на фон без примесного газа. Для  $NO_2$  в работе использовались калибровочные кюветы с известной концентрацией газа в диапазоне 100–2000 мг/м<sup>2</sup> (с учетом длины кюветы, так называемая погонная концентрация). Строится график зависимости  $k_0(N_{изв})$ . Телескоп в отсутствие калибровочной кюветы наводится на область атмосферы с измеряемым газом. Определяется  $k_1$ . По зависимости  $k_0(N_{изв})$  находится погонная концентрация примесного газа, соответствующая измеренному коэффициенту  $k_1$ .

Приведенная выше процедура измерений применима только в том случае, если не меняется спектральный состав источника подсветки. При профильных трассовых измерениях спектральный состав источника подсветки может изменяться, что приводит к дополнительным ошибкам.

Для интерпретации результатов трассовых измерений концентраций был выполнен предварительный анализ возможности осуществления калибровки аппаратуры ДАН-2 для условий, характерных при выполнении экспериментов. В [14–17] представлены уравнения трансформации интенсивности оптического излучения в опорном и измерительном каналах для чистой атмосферы, содержащей примесный измеряемый газ. В настоящей статье мы используем следующий упрощенный вид данных уравнений:

$$\begin{cases} I_1 = \frac{1}{\Delta\lambda} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} C_1(\lambda) I_0(\lambda) \exp[-\tau_x(\lambda) - \tau_{ст}(\lambda)] d\lambda \\ I_2 = \frac{1}{\Delta\lambda} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} C_2(\lambda) I_0(\lambda) \exp[-\tau_x(\lambda)] d\lambda, \end{cases} \quad (1)$$

где  $I_0(\lambda)$  — спектральная интенсивность излучения источника;  $I_1$  и  $I_2$  — сигналы по двум каналам, ре-

гистрируемые аппаратурой;  $C_1(\lambda)$ ,  $C_2(\lambda)$  – спектральные коэффициенты, зависящие от коэффициентов пропускания каналов в интервале выбранных длин волн  $\Delta\lambda$  и от выбранных параметров фотоприемников;  $\tau_x(\lambda)$  и  $\tau_{\text{эп}}(\lambda)$  – спектральные зависимости оптических толщин измеряемого газа в атмосфере и эталонной кюветы.

В качестве измеряемой величины на устройство индикации выводится значение

$$\Gamma = I_1 - I_2/I_1 + I_2, \quad (2)$$

которое характеризует величину поглощающей массы, т.е. интегральной по трассе концентрации исследуемого газа.

В большинстве практических случаев  $C_1(\lambda) = C_2(\lambda)$  в полосе  $\Delta\lambda$ , поэтому положим  $C_1(\lambda) = C_1$ ,  $C_2(\lambda) = C_2$ .

Вначале, для упрощения задачи, будем считать, что  $I_0(\lambda) = \text{const}$  в спектральном диапазоне  $\Delta\lambda$ . При выполнении условия калибровки каналов [2, 15]:

$$I_1 - I_2 = 0, \quad (3)$$

получаем из (2) следующее выражение:

$$C_1 < e^{-\tau_{\text{эп}}} >_{\Delta\lambda} = C_2. \quad (4)$$

Из (4) следует, что условие калибровки каналов (3) определяется только параметрами аппаратуры и не зависит от интенсивности рассеянного сигнала  $I_0$ .

В том случае, когда измеряемый газ присутствует на трассе измерения ( $\tau_x \neq 0$ ), интегральное по трассе поглощение измеряемого газа

$$< e^{-\tau_x(\lambda)} >_{\Delta\lambda} = \frac{C_1}{C_2} \alpha < e^{-\tau_{\text{эп}}(\lambda)} >_{\Delta\lambda} \frac{[1-\Gamma]}{[\Gamma+1]} \quad (5)$$

и, как следует из (5), не зависит от  $I_0$ . Здесь

$$\alpha = < e^{-\tau_x(\lambda) - \tau_{\text{эп}}(\lambda)} >_{\Delta\lambda} / < e^{-\tau_{\text{эп}}} >_{\Delta\lambda}. \quad (6)$$

Левая часть выражения (5) может быть представлена в виде

$$< e^{-\tau_x(\lambda)} >_{\Delta\lambda} = \exp(-\bar{\sigma}_x \tilde{N}_{x \text{ погл}}), \quad (7)$$

где  $\bar{\sigma}_x$  – усредненное по  $\Delta\lambda$  сечение поглощения измеряемого газа;  $\tilde{N}_{x \text{ погл}}$  – погонная концентрация измеряемого газа, которая может быть записана в виде

$$\tilde{N}_{x \text{ погл}} = \tilde{N}_x \tilde{L}_x, \quad (8)$$

где  $\tilde{N}_x$  – усредненная по длине трассы наблюдения концентрация измеряемого газа;  $\tilde{L}_x$  – длина трассы. Такое представление позволяет получить из (6)–(8) следующее выражение для оценки  $\tilde{N}_{x \text{ погл}}$ :

$$\tilde{N}_{x \text{ погл}} = 1/\bar{\sigma}_x \left\{ < e^{-\tau_{\text{эп}}(\lambda)} >_{\Delta\lambda} - \ln \left[ \frac{C_1}{C_2} \alpha \frac{[1-\Gamma]}{[\Gamma+1]} \right] \right\}. \quad (9)$$

Для типичных [6, 14] параметров

$$< e^{-\tau_{\text{эп}}(\lambda)} >_{\Delta\lambda} = 0,4; \quad \bar{\sigma}_x = 10^{-18} \text{ см}^2; \\ \alpha = 0,5; \quad C_1 = C_2; \quad \Gamma = 0,01$$

получим  $\tilde{N}_{x \text{ погл}} = 5,7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ , которая может реализоваться при  $\tilde{L}_x = 5 \cdot 10^4 \text{ см}$  и  $\tilde{N}_x = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , что соответствует объемной концентрации для  $\text{NO}_2$  порядка  $7 \text{ мг/м}^3$ .

В случае, если интенсивности рассеянного сигнала зависят от длины волны, то из выражения (1) при условии калибровки (3) получаем следующее выражение:

$$\alpha < I'_0(\lambda) C_1 e^{-\tau_{\text{эп}}(\lambda)} >_{\Delta\lambda} - < C_2 I'_0(\lambda) >_{\Delta\lambda} = 0, \quad (10)$$

где штрих указывает на зависимость интенсивности от длины волны. Тогда условие калибровки каналов (3) запишется в виде

$$C_1 \alpha \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I'_0(\lambda) e^{-\tau_{\text{эп}}(\lambda)} d\lambda = C_2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I'_0(\lambda) d\lambda. \quad (11)$$

При наличии фонового измеряемого газа на трассе калибровки с оптической толщиной  $\tau_{\text{фр}}(\lambda)$  условие калибровки (11) преобразуется к виду

$$C_1 \alpha \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I'_0(\lambda) e^{-\tau_{\text{эп}}(\lambda)} e^{-\tau_{\text{фр}}(\lambda)} d\lambda = C_2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I'_0(\lambda) e^{-\tau_{\text{фр}}(\lambda)} d\lambda. \quad (12)$$

Из (11) и (12) следует, что измеряемый калибровочный коэффициент будет зависеть от поведения функции  $I'_0(\lambda)$ , которая может быть связана с изменяющимся спектральным фоном атмосферного неба, либо зависеть от типа рассеивающей поверхности, по которой производится калибровка аппаратуры. Кроме того, проведенный выше анализ указывает, что измеренный сигнал с другой трассы наблюдения может быть как больше, так и меньше сигнала, соответствующего уровню калибровки. Однако если в спектральном интервале полосового фильтра аппаратуры  $\Delta\lambda_{\text{ф}}$  присутствует хотя бы один из максимумов  $\lambda_{I_{\text{max}}}$  в спектре принимаемого оптического сигнала с полушириной  $\Delta\lambda_{I_{\text{max}}}$ , то при условии  $\Delta\lambda_{I_{\text{max}}} \gg \Delta\lambda_{\text{ф}}$  и совпадении максимумов функции спектральной прозрачности фильтра и спектральной характеристики регистрируемого излучения измеряемая интегральная концентрация не будет зависеть от фона подсветки. Для ряда естественных природных объектов это условие выполняется и максимум в их спектре определяется цветовой температурой.

В таблице по данным [7, 20–23] систематизированы некоторые цветные температуры, характерные для Солнца, голубого неба, облачности, луны, и указан максимум  $\lambda_{I_{\text{max}}}$  в спектрах их излучения. Эти данные показывают, что максимум спектральной интенсивности свечения смещается из синей области спектра (при ясном голубом небе) в красную при восходе и заходе Солнца. Цветовая температура неба как при сильной, так и при слабой облачности значительно превышает цветовую температуру Солнца, особенно при слабой облачности (12000–14000 К). Таким образом, облака, в зависимости от степени их освещенности, могут значительно исказить спектр Солнца и вносить соответствующие коррективы в измерения.

Цветовые температуры, соответствующие различным условиям дневного освещения

Естественный источник света	$\lambda_{max}$ , мкм	Цветовая температура, T, К
Утреннее или вечернее сумеречное небо	1,70	2000
Небо близ восходящего или заходящего Солнца	1,30	2300–2400
Солнце через час после восхода	0,90	3500
Солнце за час до захода	0,90	3500
Луна	0,75	4125
Утреннее или вечернее Солнце в ясном небе под углом больше 15° над линией горизонта	0,90–0,70	3600–5000
Солнце около полудня при легкой облачности	0,70–0,60	5100–5600
Свет летнего полуденного Солнца близ поверхности Земли при ясном голубом небе	0,70–0,60	5300–5700
Свет полуденного Солнца при легкой облачности	0,50–0,60	5700–5900
Летнее Солнце в зените в синем ясном небе	0,50–0,48	6000–6500
Дневной свет неба при легкой высокой облачности	0,49–0,48	6700–7000
Дневной свет неба при сильной облачности	0,49–0,43	7000–8500
Дневной свет неба при слабой облачности	0,35–0,30	12000–14000
Облачное небо в северной части	0,35–0,12	12000–25000
Ясное голубое небо	0,20–0,10	15000–27000

Теоретически учесть все вариации спектра, регистрируемые приемной корреляционной аппаратурой, и оценить влияние этих вариаций на ошибки измерений интегральных по трассе зондирования концентраций газов не представляется возможным. Поэтому были проведены эксперименты, целью которых было оценить влияние различного типа отражающих поверхностей и рассеянного фона изменяющегося свечения неба на возможность восстановления усредненных профилей концентрации примесных газов в атмосфере.

Общая схема экспериментальных исследований с помощью аппаратуры ДАН-2 в реальной атмосфере для различных трасс зондирования представлена на рис. 2.

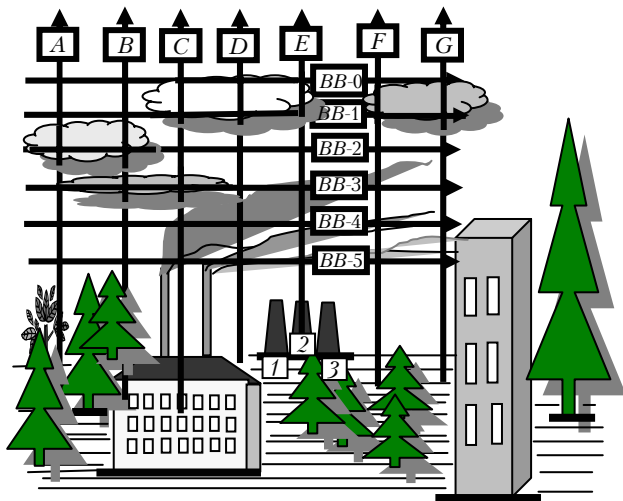


Рис. 2. Общий вид территории вблизи крупного промышленного объекта г. Томска и разрезы измерений  $\text{NO}_2$  в атмосфере

Цифрами 1–3 обозначены градирни Томской ГРЭС-2. Разрез А характерен тем, что проходит между деревьями (сосна, ель) и калибровка осуществлялась от деревьев внизу. Разрез В проходит через деревья и здание. Разрез С – между труб ГРЭС-2, включая здание и его крышу. Разрезы D, E, F проходят либо через градирню (E), либо начинаются от земли. Разрез G, проходящий около здания, начинается от земли. Поле сканирования телескопа в вертикаль-

ной плоскости дано в относительных угл. ед.  $\frac{W}{\Delta W}$ , где

W – текущий угол сканирования от начала разреза (сверху или снизу),  $\Delta W$  – диапазон угла сканирования на выбранном разрезе, который составлял  $\approx 25$ – $30^\circ$  в зависимости от ландшафта местности.

Горизонтальные разрезы на рис. 2 обозначены BB-0 – BB-5. Сканирование телескопа по этим профилям производилось как слева направо, так и справа налево (это направление указывается на рис. 4). Угол сканирования, отсчитываемый от начала разреза (справа или слева),  $W = 15$ – $25^\circ$ . Расстояние до объекта наблюдения около 3 км. Телескоп Кассегрена (диаметром 270 мм) на этой дистанции наблюдения обеспечивал уверенный прием оптического сигнала с площадки диаметром 2 м. Пространственная фильтрация принимаемого излучения осуществлялась с помощью диафрагмы, установленной в фокальной плоскости телескопа. Калибровка оптических сигналов на начальном участке измерений производилась с помощью калибровочной кюветы длиной 5 см и погонной концентрацией  $\text{NO}_2$  1000  $\text{мг}/\text{м}^2$ . Погонная концентрация измеряемого газа по каждому из разрезов нормировалась по максимуму.

На рис. 3 представлены наиболее характерные экспериментальные результаты для вертикальных разрезов. На рис. 3, а показан вертикальный профиль относительной погонной концентрации  $\text{NO}_2$  (разрез С), когда поле зрения телескопа сканировалось сверху вниз, а калибровка осуществлялась от рассеянного излучения верхнего участка неба. Характерный минимум сигнала связан со слабым рассеянием солнечного излучения от плотного (черного) дыма; при этом спектр рассеяния не испытывает значительных искажений. Интегральная концентрация на трассе в этом случае значительно падает, так как ветровой снос газа происходит в направлении зондирования. В то же время при калибровке на фон ясного неба (начальный уровень сигнала) интегральная по трассе зондирования фоновая концентрация значительно выше, чем на короткой трассе от дыма из трубы до телескопа приемной аппаратуры ДАН-2.

Следующий интересный экспериментальный результат приведен на рис. 3, б. Здесь калибровка

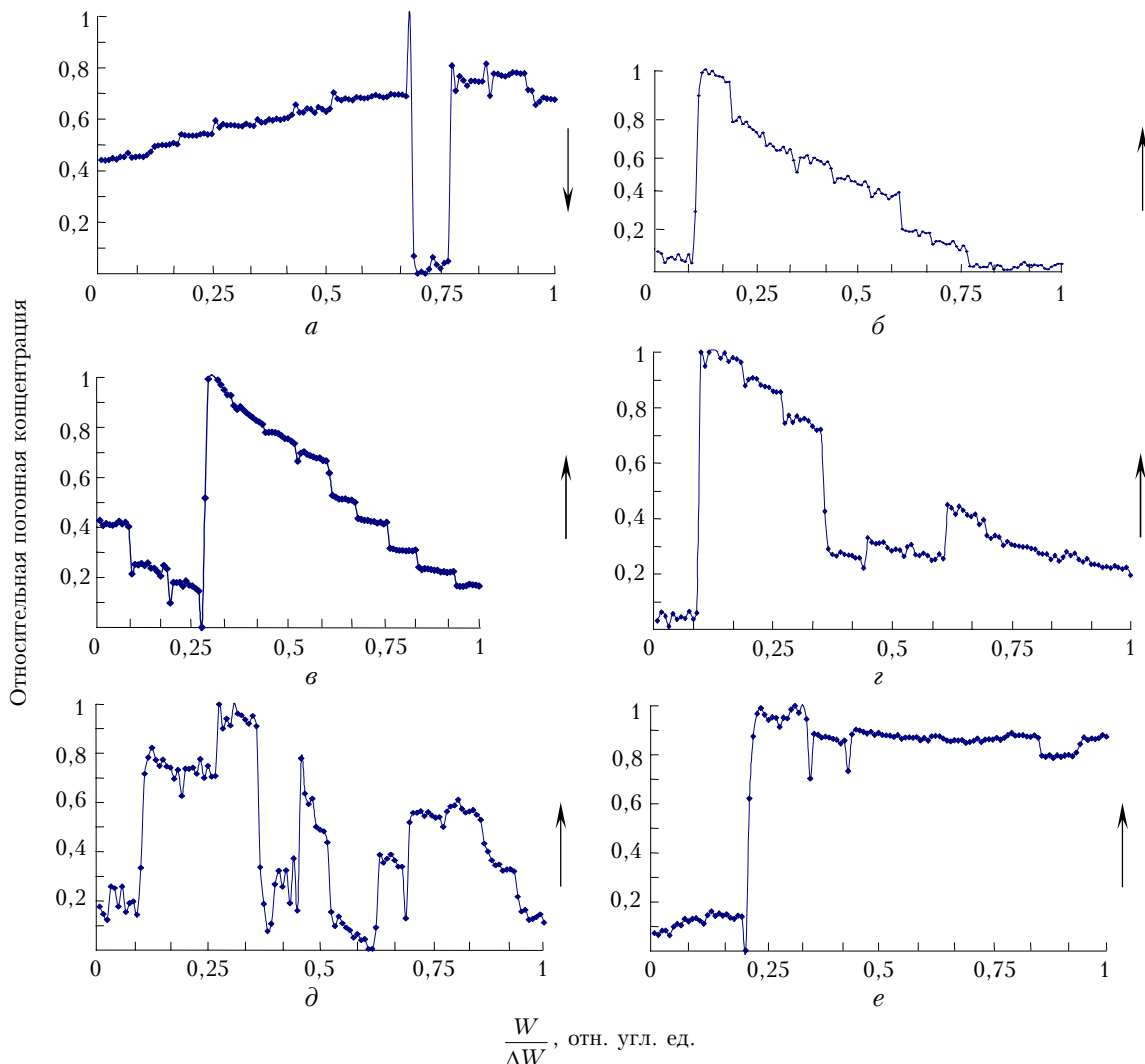


Рис. 3. Относительная погонная концентрация  $\text{NO}_2$  при вертикальных разрезах. Стрелка указывает направление движения оптической оси телескопа в пространстве наблюдения: *a* – разрез *C*. Калибровка – ясная атмосфера (вверху разреза *C*). Небольшая разорванная облачность. Ветер восточный, 3–7 м/с. 14.04.03. Время 15:40; *б* – разрез *C*. Калибровка – труба ГРЭС-2. Небольшая разорванная облачность. Ветер северный, 2–5 м/с. 08.04.03. Время 13:01; *в* – разрез *B*. Калибровка – деревья, здание. Ясно. Ветер южный, 3–5 м/с. 18.04.03. Время 15:05; *г* – разрез *E*. Калибровка – градирня. Сплошная однородная темно-серая облачность. Ветер северный, 3–8 м/с. 25.04.03. Время 15:52; *д* – разрез *C*. Калибровка – крыша здания. Сплошная неоднородная темно-серая облачность. Ветер северо-западный, 1–3 м/с. 24.04.03. Время 15:15; *е* – разрез *C*. Калибровка – крыша, труба. Сплошная светло-серая облачность. Ветер юго-западный, 2–5 м/с. 20.05.03. Время 15:35

осуществлялась от поверхности трубы ГРЭС-2 при ясной солнечной погоде (разрез *C*), т.е. телескоп перемещался вверх до уровня фонового свечения неба, используемого для калибровки аппаратуры при движении телескопа сверху вниз. Хорошо видно, что средние уровни сигналов при калибровке на трубе и наводке на фон практически, с точностью до 5%, совпадают. Это дает основание сделать вывод, что серые диффузно отражающие поверхности могут быть использованы для калибровки. Данный результат подтверждается другими аналогичными измерениями, проведенными при калибровке от поверхности наклонной неосвещенной темно-красной крыши здания, от темной диффузно отражающей поверхности градирни ГРЭС-2 и от поверхности Земли.

Светлые здания, зеленая растительность, снег приводят к неоднозначной калибровке [4]. На рис. 3, *в*

проиллюстрирована эта закономерность (разрез *B*, рис. 2). Калибровка проведена от темно-зеленого хвойного леса (на начальном участке графика), затем от светлого здания и темно-красной крыши этого здания. Здание и лес не освещены Солнцем. Калибровочные сигналы на крыше и здании довольно хорошо соответствуют уровню фона (в конце графика), в то время как от хвойной растительности калибровочный сигнал завышен (на 30%). В случае солнечной подсветки деревьев и здания уровень сигнала калибровки резко возрастает, что делает измерения практически невозможными. Аналогично получили, что при калибровке от снега измерения становятся практически невозможными, так как сигнал калибровки превышает фоновые измерения вдоль разрезов.

Исследования, проведенные при наличии облачности, выявили возможность измерения интегральных

концентраций и калибровки аппаратуры от затемненных поверхностей только в условиях темной и темносерой облачности. Для светлой облачности (например, перистые облака) измерения становятся невозможными, что обусловлено их изменяющейся высокой яркостной температурой (см. таблицу). На рис. 3, *з* показаны наиболее типичные результаты, получен-

ные при калибровке от поверхностей при наличии облачности. При сплошной темной облачности (типа С<sub>т</sub>, С<sub>б</sub>), при калибровке от крыши здания (рис. 3, *д*), результат калибровки и измерение фоновой концентрации в верхней точке вертикального профиля практически совпадают. Прерывистый вид графика объясняется влиянием оптических характеристик облаков.

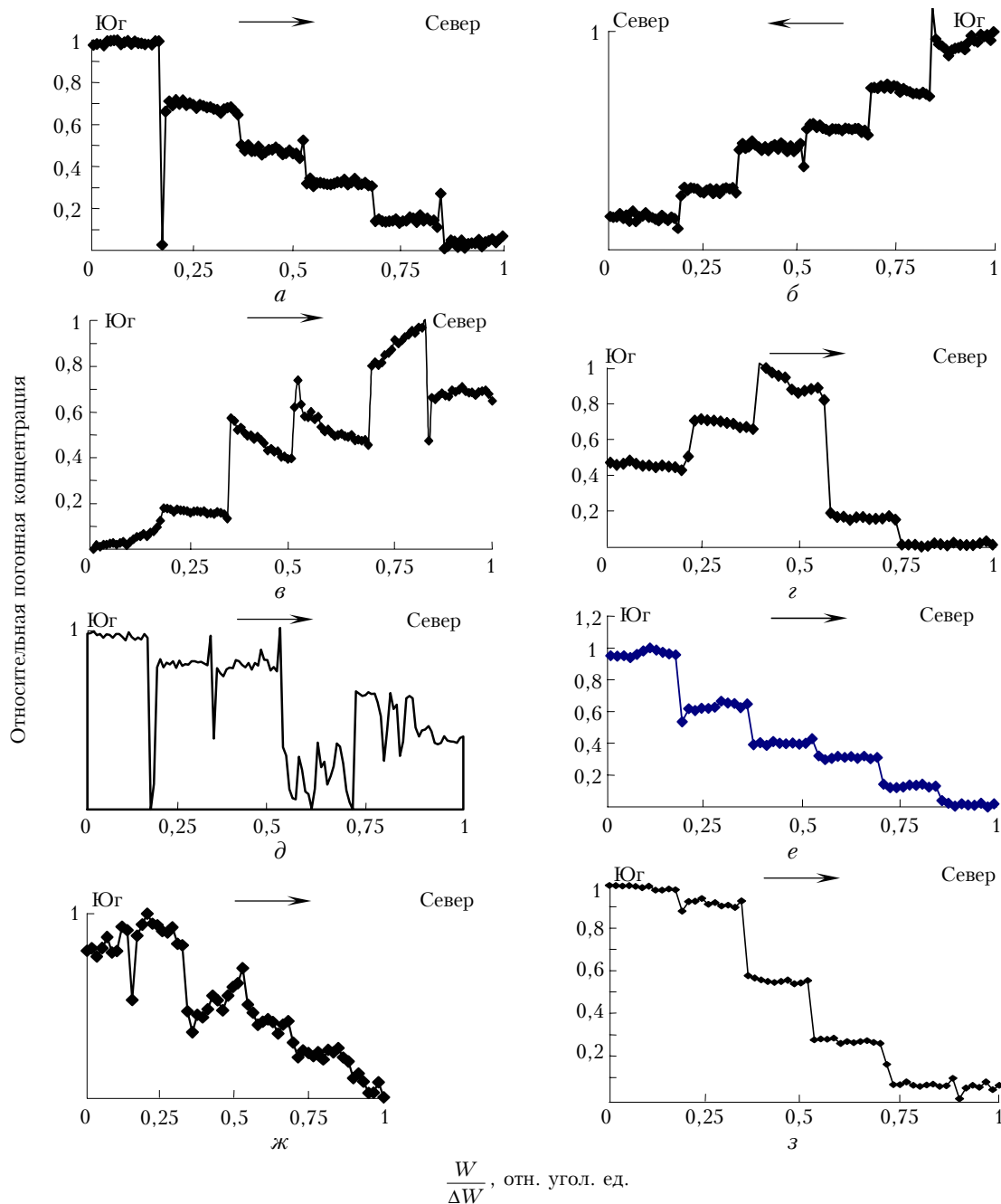


Рис. 4. Относительная погонная концентрация  $\text{NO}_2$  при горизонтальных атмосферных разрезах *BB-1–BB-5*. Стрелка указывает направление движения оптической оси телескопа в пространстве наблюдения: *а* – разрез *BB-1*. Ясно. Ветер северный, 1–3 м/с. 14.03.03. Время 14:05; *б* – те же условия эксперимента. Время 14:07; *в* – разрез *BB-3*. Ясно. Ветер южный, 2–5 м/с. 10.12.02. Время 12:55; *г* – разрез *BB-1*. Ясно. Ветер северный, 2–4 м/с. 07.03.03. Время 16:40; *д* – разрез *BB-5* (на высоте трубы). Сплошная облачность. Ветер северо-западный, 3–8 м/с. 27.01.03. Время 13:30; *е* – разрез *BB-2*. Небольшая дымка (видимость  $S_m \sim 5$  км). Ветер северный, 1–3 м/с. 11.03.03. Время 16:35; *ж* – разрез *BB-1*. Слабый туман ( $S_m \sim 4$  км). Ветер северный, 1–3 м/с. 06.01.03. Время 12:45; *з* – разрез *BB-5*. Небольшая дымка ( $S_m \sim 4–5$  км). 30.01.03. Время 15:15

Наличие светло-серой облачности (типа As, Ci, Cc) (рис. 3, e) не дает возможности получить профиль изменения концентрации. В то же время сама калибровка (крыша, труба) вполне приемлема, и уровень интегральной концентрации может быть найден.

Характерные результаты, полученные для горизонтальных разрезов, приведены на рис. 4. Графики, представленные на рис. 4, a и б, получены на вертикальном участке дымового шлейфа из труб ГРЭС-2. Разрезы выполнены как в прямом, так и в обратном направлениях движения оси телескопа при ясной солнечной погоде практически в одно и то же время наблюдения. Хорошо видно, что относительная погонная концентрация NO<sub>2</sub> в южном направлении, при северном слабом ветре, значительно выше, чем в северном. Некоторое отличие (не более 15%) на конечном (рис. 4, a) и начальном (рис. 4, б) участках зондирования можно объяснить различными условиями калибровки сигналов в присутствии примесного газа NO<sub>2</sub>, так как калибровка производилась непосредственно на начальном и конечном участках горизонтального профиля ВВ-1 (см. рис. 2).

На следующем графике (рис. 4, в) показан концентрационный профиль NO<sub>2</sub> на разрезе ВВ-3 при южном ветре и ясной погоде. Максимум концентрации наблюдается в северном направлении зондирования. Виден небольшой максимум сигнала, связанный с поглощением газовой примеси в этой зоне зондирования. На рис. 4, г, при северном ветре и ясной погоде, максимум смещается к югу (около труб). В целом общее содержание NO<sub>2</sub> в южном направлении выше, чем в северном. Причем такая тенденция наблюдалась в большинстве (80%) проведенных экспериментов, что может быть объяснено тем, что в южной зоне города находится значительно больше промышленных объектов (7 объектов), чем в северной (2 объекта) в радиусе 3 км от труб ГРЭС-2.

Измерения, выполненные при ясной погоде, показали, что на трассе измерений вблизи труб ГРЭС-2 абсолютные значения погонных концентраций лежат в диапазоне 1000–2000 мг/м<sup>2</sup>. Установлено, что вблизи источника выброса постоянно существует газовая аномалия на расстоянии 100–200 м по радиусу от источника, слабо зависящая при умеренном ветре от его направления. Вычитая из данных значений значения фоновой атмосферной концентрации NO<sub>2</sub>, которая составляет примерно 500 мг/м<sup>2</sup> (для трассы длиной 10 км) и для характерного размера газовой аномалии ~400 м, получаем, что средняя объемная концентрация в зоне газовой аномалии будет составлять 1,5–5 мг/м<sup>3</sup>. Данный результат довольно хорошо согласуется с оценкой, выполненной по формуле (9).

Измерения, проведенные в различных метеорологических условиях (рис. 4, з–э), в принципе подтвердили полученные закономерности, характерные для ясной погоды. При небольшой дымке, наличии тумана и облачности вполне возможно проводить измерения, если обеспечена видимость объекта исследования. Для облачности (рис. 4, д) характерен прерывистый сигнал, однако в целом он отражает тенденцию изменения концентрации по данному раз-

резу. Следует отметить, что при наблюдении разрезов под малыми к горизонту углами (рис. 4, д) фоновое излучение облаков значительно меньше искажает регистрируемый сигнал, чем при сканировании вертикальных профилей таких же облаков (разрез С, рис. 3, e).

## Заключение

Показано, что наибольшая чувствительность и наименьшая погрешность при трассовых измерениях примесного газа NO<sub>2</sub> в реальной атмосфере могут быть достигнуты только при условии, если максимум спектральной характеристики принимаемого с трассы наблюдения оптического сигнала совпадает с максимумом полосы пропускания  $\lambda = 0,38–0,42$  мкм полосового фильтра аппаратуры или значительно шире его.

Экспериментально обнаружено, что наиболее существенные искажения в измерениях интегральных по трассе концентраций наблюдаются при слабой облачности. В то же время наличие сильной облачности позволяет восстанавливать интегральные концентрации газа. При горизонтальных разрезах вблизи горизонта эффект фонового влияния облаков значительно слабее, чем при вертикальных. В то же время наличие сильной облачности (темные и темно-серые облака) позволяет восстанавливать погонные концентрации NO<sub>2</sub> в атмосфере вдоль выбранных разрезов.

При калибровке аппаратуры ДАН-2 от различных типов поверхностей необходимо учитывать их подсветку и отражающую способность. Наиболее приемлемы для калибровки аппаратуры диффузные неосвещенные прямым солнечным светом поверхности, а при проведении трассовых измерений погонных концентраций примесного газа в атмосфере – ясная атмосфера или сильная облачность.

Установлено, что вблизи источника выброса постоянно существует газовая аномалия со средней объемной концентрацией порядка 1,5–5 мг/м<sup>3</sup> на расстоянии 100–200 м по радиусу от источника, слабо зависящая при умеренном ветре от его направления.

1. *Balandin S.F.* Calibration of DAN-2 remote spectrum-radiometer from different types of surface // Proc. SPIE. 2004. V. 5743. P. 28–33.
2. *Balandin S.F., Kopytin Y.D., Kokhanov V.I., Shishigin S.A.* Tests of the remote sensing spectrum-radiometer DAN-2 on atmospheric lines // Proc. SPIE. 2004. V. 5396. P. 49–56.
3. *Balandin S.F., Shishigin S.A.* High-sensitive remote detector of hydrocarbon leakages from oil-and-gas pipelines // Int. Conf. on Optical Technol. for Atmosph., Ocean and Environment. Studies (ICOT). 2004. P. 71–72 (Beijing, China).
4. *Balandin S.F.* Calibration of DAN-2 remote spectrum-radiometer from different types of surface // XI-th Int. Symp. «Atmospheric. and Ocean optics. Atmospheric phys.». Tomsk, 2004. P. 50.
5. *Баландин С.Ф., Копытин Ю.Д., Шишигин С.А., Колганов В.И., Зыков С.Н., Петров А.И.* Дистанционный газовый анализатор ДАН-1 // Тез. докл. 7-го Междунар. симп. «Оптика атмосферы и океана». 2000. С. 114.

6. *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: Изд-во ИОА СО РАН, 2000. С. 99–103.
7. *Кабанов М.В., Панченко М.В.* Рассеяние оптических волн дисперсными средами. Ч. 3. Атмосферный аэрозоль // Томск: Изд. ТФ СО АН СССР, 1984. С. 142–153.
8. *Баландин С.Ф.* Разработка методик дистанционного зондирования газодисперсных сред на основе подхода пассивной локации // Изв. вузов. Физ. 2000. № 3. С. 95. Деп. в ВИНТИ. Рег. № 3521-1399 от 29.11.99. 30 с.
9. *Баландин С.Ф., Копытин Ю.Д., Коханов В.И., Шилигин С.А., Петров А.И.* Дистанционный анализатор газовых выбросов УФ-диапазона // Тезисы докл. 6-го Междунар. симп. «Оптика атмосферы и океана». Томск: ИОА СО РАН, 23–26 июня, 1999. С. 117.
10. *Баландин С.Ф., Копытин Ю.Д., Коханов В.И., Шилигин С.А.* Sounding of dense Gas Gas Plumes Gas Plumes // Аэрозоли Сибири, 10-я Рабочая группа, Томск: ИОА СО РАН, 2003.
11. *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, 2001. P. 156.
12. *Balandin S.F., Kopytin Y.D., Kokhanov V.I.* Mathematical simulation of operation of the optical correlation Gas Analyzer // Joint Int. Sympos. «Atmospheric and Ocean optics». Institute of Solar-Terrestrial Physics. Institute of Atmospheric Optics. Irkutsk, June 25–29, 2001. P. 156.
13. *Tolton B.T.* A Concept for a gas-filter correlation radiometer to remotely sense the atmospheric carbon dioxide column from space // J. Atmos. and Ocean. Technol. 2004. V. 21. P. 837–852.
14. *Лу (H.S. Lee), Цвик (H.H. Zwick).* Прибор для дистанционного обнаружения течей в газопроводах, основанный на применении газовых светофильтров // Приборы для научных исследований. 1985. № 9. С. 132–149.
15. *Tolton B.T., Plouffe D.* Sensitivity of radiometric measurements of the atmospheric CO<sub>2</sub> column from space // Appl. Opt. 2001. V. 40. P. 1305–1313.
16. *Richard R.M.* Cross-Correlating Spectrometer // J. Opt. Soc. Amer. 1968. V. 58. № 7. P. 900–908.
17. *Ward T.V., Zwick H.H.* Gas cell correlation spectrometer: GASPES // Appl. Opt. 1975. V. 14. N 12. P. 2896–2904.
18. *Шайков М.К., Чаянова Э.А., Иванов Е.В.* Новый метод и корреляционный спектрометр для дистанционного измерения содержания двуоксида азота в атмосфере // Оптика атмосф. 1990. Т. 3. № 3. С. 320–324.
19. *Чаянова Э.А., Шайков М.К.* Оптимизация параметров корреляционных масс-спектрометров для измерения газовых составляющих атмосферы // Ж. прикл. спектроскопии. 1989. Т. 51. № 4. С. 639–646.
20. *ASTER Spectral library.* 2005. <http://speclib.nasa.gov>
21. *Гарбук С.В., Гершензон В.Е.* Космические системы дистанционного зондирования Земли. М.: Изд-во АиБ, 1997. 296 с.
22. *Савиных В.П., Соломатин В.А.* Оптико-электронные системы дистанционного зондирования. М.: Недра, 1995. 310 с.
23. *Шанда Э.* Физические основы дистанционного зондирования / Пер. с англ. М.: Недра, 1990. 203 с.

**S.F. Balandin. Distribution of NO<sub>2</sub> relative line concentration near some large industrial center.**

Results of measurements of NO<sub>2</sub> profiles in a strongly polluted atmosphere of industrial center of Tomsk city are presented, which were obtained with a designed correlation spectral device DAN-2. The device uses reflected and scattered solar radiation at  $\lambda = 0.4 \mu\text{m}$ .

A possibility of using the scattered solar radiation reflected from different surfaces characteristic of urban landscapes (walls and roofs of buildings, plant chimneys, trees, etc.) as a reference calibrating signal for the device has been studied. The efficiency of using such calibrating signals was compared with calibrating signal from the background solar radiation scattered in atmosphere. It was found that diffusively scattering rough underlying surfaces are the most efficient for calibration of instruments. A possibility of the device operating and measuring concentrations, integral over the path, under conditions of a heavy cloudiness has been demonstrated. It was found that the mean stationary NO<sub>2</sub> concentration is 1–5 mg/m<sup>3</sup> at a height of emission within 100–200 m from the source and that it weekly depends on the wind direction.