

# ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 535.214.4

## РАЗРАБОТКА ВИДЕОСПЕКТРОРАДИОМЕТРОВ-ГАЗОВИЗОРОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АНТРОПОГЕННЫХ ГАЗОВ В ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

© 2007 г. В. С. Давыдов, доктор техн. наук; А. В. Афонин, канд. техн. наук

ВНЦ “Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова”, Санкт-Петербург

Систематизированы результаты работ по обоснованию принципов построения и необходимых характеристик видеоспектрорадиометров-газовизоров для определения с ИСЗ, самолетов и земли пространственного распределения антропогенных газов в приземном слое атмосферы на примере приборов для регистрации  $\text{NO}_2$  и  $\text{SO}_2$ . Приведены результаты натурального эксперимента по оценке содержания диоксида азота в шлейфе выброса из трубы ТЭЦ на основе регистрации излучения в электронной полосе спектра поглощения  $\text{NO}_2$  434–448 нм с помощью цифрового видеоспектрорадиометра-газовизора. Методика обработки информации позволяет выделить содержание диоксида азота в шлейфе, не наблюдаемом визуально, на фоне рассеянного атмосферой излучения в поле зрения прибора  $17,8 \times 23,2^\circ$ .

Коды OCIS: 120.0120, 120.4640.

*Поступила в редакцию 15.08.2006.*

### Введение

В последнее десятилетие большое внимание уделяется разработке методов и аппаратуры дистанционного контроля малых примесей газа в атмосфере, в том числе антропогенных и парниковых газов при наблюдении с земли и ИСЗ. Особое значение для жизнедеятельности представляет контроль содержания в приземной атмосфере диоксидов азота и серы.

Принцип выделения этих газов в газовизоре, как и в известных ранее оптических приборах (“масковом” спектрометре Коспек 4В фирмы “Беринджер” (Канада) [1], радиометре с газовым фильтром фирмы “Экополь” (Франция), спектрометре Центральной аэрологической обсерватории (Россия), использующем интерференционно-поляризационный фильтр [2]), основан на спектральных фильтрах, в которых конфигурация зон прозрачности высоко коррелирована с колебательной структурой полос поглощения  $\text{NO}_2$  (435–450 нм) и  $\text{SO}_2$  (306–310 нм). Однако известные ранее приборы являются одноканальными с полем зрения  $1^\circ$ – $2^\circ$ , а поскольку газовые облака, содержащие диоксиды азота и серы, как правило, не видимы глазом, их дистанционный контроль с помощью одноканальных спектромет-

ров затруднен и не дает представления о картине распределения таких динамических образований, как, например, выбросы газа из труб промышленных предприятий.

Системы на основе фурье-спектрометров ИК диапазона широко используются для наземных измерений в качестве трассовых газоанализаторов, а также на ИСЗ для измерения состава атмосферы по поглощению прямого солнечного излучения, но они также не дают пространственную картину распределения примесных газов.

Разработка широкоугольных видеоспектрорадиометров-газовизоров (ВСП-Г) проводилась для мониторинга из космоса и дистанционного контроля с земли источников выбросов диоксидов азота и серы и визуализации картины пространственного распределения этих газов в приземной атмосфере. Впервые обоснование такой возможности дано в работе [3]. ВСП-Г представляет собой корреляционный двухканальный прибор, в котором выделение электронных колебательных спектров поглощения загрязняющих газов  $\text{NO}_2$  и  $\text{SO}_2$  осуществляется с помощью интерференционно-поляризационного фильтра (ИПФ) в сочетании с узкополосным интерференционным фильтром (УИФ), выделяющим рабочую область спектра с подавлением фонового излучения.

Принципы построения ВСП-Г для наблюдения с ИСЗ и самолетов изложены в работах [4, 5]. Спектральная схема фильтрации ВСП-Г и подавление фонового излучения были рассмотрены в [6, 7]. Один канал прибора настраивается на участки с сильным поглощением исследуемого газа, а другой – на участки со слабым поглощением. Таким образом удается избавиться от влияния селективности аэрозоля, а также значительно ослабить влияние других газов, особенно в области поглощения  $\text{SO}_2$  (участок спектра вблизи 300 нм), где имеются электронные полосы поглощения других газов. В результате на выходах фотодетекторов измерительных каналов, в качестве которых используются охлаждаемые ПЗС-матрицы, получают два изображения регистрируемого объекта, соответствующие областям максимального и минимального пропускания полос поглощения  $\text{NO}_2$  и  $\text{SO}_2$ , выделяемым ИПФ в указанном спектральном диапазоне. В данной статье рассматриваются результаты натурального эксперимента регистрации пространственной картины шлейфа из трубы ТЭЦ, работающей на газе, поэтому далее будет идти речь преимущественно о характеристиках ВСП-Г для диоксида азота.

### **Разработка газовизоров для аэрокосмического мониторинга пространственного распределения диоксидов азота и серы**

Семейство газовизоров на УФ и видимую области спектра включает в себя спутниковый, самолетный и наземный приборы, отличающиеся угловым полем и пространственным разрешением, а также условиями измерений. Оптические системы самолетного и наземного приборов одинаковы по схемным решениям и близки по своим параметрам, поэтому рассматриваются совместно. Измерение пространственной структуры газовых примесей связано с выделением на фоне яркой подстилающей поверхности предельно малых контрастов яркости до 0,05%, вызванных поглощением рассеянного солнечного света на очень малом количестве примесей интересующего газа, которое по допустимым санитарным нормам составляет  $10^{-7}$ – $10^{-6}$  объема воздуха. Предельно допустимые среднесуточные концентрации (ПДК<sub>сс</sub>) и максимальные разовые (ПДК<sub>мр</sub>) приведены в табл. 1.

Принципы построения газовизоров на УФ и видимый диапазоны, благодаря которым обеспечивается максимальная чувствительность к регистрируемым газам, обоснованы в работе [5], а оптические схемы приведены в работах [4, 8]. Оптическая система должна иметь максимально возможную светосилу. В спутниковом приборе с угловым полем

**Таблица 1.** Предельно допустимые концентрации газов

Газ	Весовая ПДК <sub>сс</sub> , мг/м <sup>3</sup>	Объемная ПДК <sub>сс</sub> , ppmv*	Весовая ПДК <sub>мр</sub> , мг/м <sup>3</sup>
$\text{SO}_2$	0,05	0,019	0,5
$\text{NO}_2$	0,04	0,021	0,085

\* ppmv – объемная концентрация (в частях газа по отношению к  $10^6$  частям воздуха в единице объема).

3,5° это достигается в трехзеркальной системе с телецентрическим ходом лучей, что позволяет добиться одинаковой спектральной функции чувствительности по всему полю зрения. Все три зеркала эллиптические, обеспечивающие размер пятна рассеяния 10 мкм, что меньше размера пиксела ПЗС-матрицы.

Измерительная аппаратура должна иметь высокую пороговую чувствительность, которая для регистрации  $\text{SO}_2$  с уровня минимальной концентрации при малых зенитных углах Солнца должна составлять  $10^{-6}$  Вт/м<sup>2</sup> ср, для регистрации  $\text{NO}_2$  –  $10^{-5}$  Вт/м<sup>2</sup> ср при зенитных углах Солнца до 60°. Таких высоких уровней чувствительности можно достигнуть только используя накопление сигналов на ПЗС-матрице. Время экспозиции при использовании в качестве приемника излучения ПЗС-матрицы с виртуальной фазой, чувствительной в УФ и видимой областях спектра, должно составлять единицы и десятки секунд. Поэтому для обеспечения длительных экспозиций до 20 с на ИСЗ “Ресурс-О” планируется использовать систему наведения и слежения за зоной съемки на основе двухосного сканирующего зеркала, позволяющего компенсировать бег изображения вследствие полета ИСЗ и сдвиг изображения из-за вращения Земли. Эта система обеспечивает точность наведения на объект съемки не менее 5' и погрешность слежения с учетом возмущений ИСЗ не более 2" в секунду в течение 20–40 с. При наведении и отслеживании в пределах углов наблюдения  $\pm 20^\circ$  относительно надира в двух плоскостях зона обзора поперек трассы полета составляет 500 км, а интервал повторяемости наблюдений регионов в пределах этой зоны около 3 суток. В табл. 2 приведены основные характеристики ВСП-Г [9].

Как показал анализ, газовизор с такими параметрами должен регистрировать пространственное распределение газов, начиная с одного ПДК<sub>сс</sub> для  $\text{NO}_2$  и с уровня предельно допустимой разовой концентрации для  $\text{SO}_2$ , составляющей 0,5 мг/м<sup>3</sup>.

Оптическая система самолетного газовизора в отличие от спутникового должна иметь угловое поле не менее 20°, чтобы обеспечить необходимый охват на местности; вместе с тем при самолетных условиях измерений требования к чувствительности

**Таблица 2.** Основные характеристики газовизора для ИСЗ “Ресурс-О”

Характеристика	Значение
Диаметр объектива, м	0,14
Угловое поле зрения, град	3,5
Относительное отверстие	1:1,7
Область спектра, мкм	0,28–1
Приемник	кремниевая ПЗС-матрица с виртуальной фазой
Температура охлаждения приёмника, °С	–40
Количество элементов	520×580
Пороговая яркость при яркости фона $3 \times 10^{-3}$ Вт/м <sup>2</sup> ср и экспозиции 10 с, Вт/м <sup>2</sup> ср	$10^{-5}$
Размер элемента разрешения на местности при высоте 800 км, м	60×80
Поле обзора при высоте полета 800 км, км	30×40
Экспозиция (устанавливается автоматически), с	0,01–20

**Таблица 3.** Основные характеристики самолетного видеоспектрорадиометра-газовизора

Характеристика	Значение
Диаметр объектива, мм	30
Угловое поле зрения, град	20
Относительное отверстие	1:2,5
Угловое разрешение, угл. мин.	3
Область спектра, мкм	0,28–0,5
Приёмник	кремниевая ПЗС-матрица с виртуальной фазой типа ISD048A
Температура охлаждения приёмника, °С	–40
Количество элементов	386×290
Пороговая яркость, Вт/м <sup>2</sup> ср	$3 \times 10^{-4}$
Пороговая чувствительность при яркости фона 0,05 Вт/м <sup>2</sup> ср и толщине контролируемого слоя атмосферы более 250 м	1 ПДК <sub>ср</sub>
Размер элемента разрешения на местности при высоте 8 км, м	60×80
Поле обзора при высоте полёта 8 км, км	3,5
Экспозиция (устанавливается автоматически), с	0,01–10

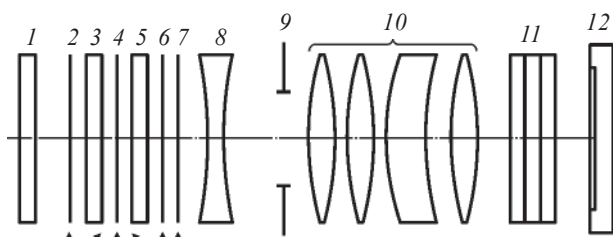
несколько меньше, чем при спутниковых. Это позволяет отказаться от промежуточного изображения и существенно упростить оптическую систему, сохранив телецентрический ход лучей на приемник. Объектив каждого измерительного канала (одинаковые для самолетного и наземного газовизоров) работает в спектральном диапазоне 280–450 нм и состоит из шести линз, четыре из которых флюори-

рованные, а две из плавленого кварца. Для газовизора в самолетном исполнении также необходим режим накопления сигнала в течение нескольких секунд, однако без компенсации скорости движения удерживать изображение без смаза невозможно. В случае применения ПЗС-матрицы целесообразно использовать для компенсации движения изображения режим временной задержки и построчного накопления сигнала. При этом зарядовые пакеты должны перемещаться по поверхности матрицы синхронно с изображением (используется датчик скорости изображения). Максимальное отношение сигнала к шуму реализуется при поддержании среднего значения накопленного сигнала в потенциальной яме по всей ПЗС-матрице на уровне 0,8 от максимального сигнала, чтобы не допустить переполнения зарядов. Максимальное время накопления устанавливается автоматически в режиме предварительного определения экспозиции по части строк матрицы. Основные характеристики самолетного ВСП-Г приведены в табл. 3.

В рассмотренных оптических системах удалось добиться максимальной светосилы, возможной при ограничениях, накладываемых системой спектральной селекции. Это позволило достигнуть высокой чувствительности газовизоров, соответствующей уровням предельно допустимых концентраций вредных газов. Таким образом, рассмотренные оптические системы дают возможность решить проблему определения пространственного распределения концентраций вредных газов в приземном слое атмосферы с борта ИСЗ и самолета.

### Краткое описание прибора для наземных измерений [11–13]

На рис. 1 представлена оптическая схема одного измерительного канала прибора с широкоугольным ИПФ с перестраиваемой спектральной полосой пропускания. Описание и характеристики широкоугольного ИПФ приведены в [9]. Каждая ступень содержит входной и выходной поляризаторы 2 и 7, две кристаллические кварцевые пластины 3 и 5 равной толщины  $l/2 = 1,6$  мм и фазовые кристаллические пластины 4 ( $\lambda/2$ ) и 6 ( $\lambda/4$ ). Фазовые пластины выполнены из слюды, заклеенной между пластинами из стекла К8. Взаимная ориентация направлений пропускания поляризаторов и кристаллографических осей двулучепреломляющих элементов на рис. 1 показана стрелками. Направления пропускания входных поляризаторов обоих каналов находятся в вертикальной плоскости, что исключает влияние поляризации падающего излучения на результаты измерений. Все поверхности элементов просветлены на длину волны 440 нм. Диаметр всех



**Рис. 1.** Схема канала спектральной фильтрации. 1 – защитное окно, 2 – входной поляризатор, 3 – пластина из кристаллического кварца толщиной  $\lambda/2$ , 4 – полуволновая кристаллическая пластинка, 5 – пластина из кристаллического кварца толщиной  $\lambda/2$ , 6 – четвертьволновая кристаллическая пластинка, 7 – выходной поляризатор, 8 – входная линза телецентрического объектива, 9 – апертурная диафрагма, 10 – линзы телецентрического объектива, 11 – УИФ и цветные стекла, 12 – приемная ПЗС-матрица.

элементов равен 28 мм за исключением 7, диаметр которого 20 мм.

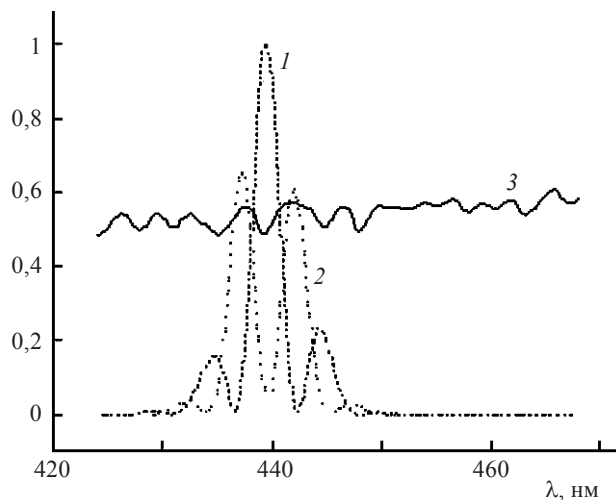
Спектральная зависимость пропускания ступени выражается соотношением

$$\tau(\lambda) \approx \cos^2\left(\frac{2\pi l \mu}{\lambda}\right), \quad (1)$$

где  $l$  – толщина кристаллической пластины,  $\mu$  – коэффициент двулучепреломления, являющийся функцией длины волны  $\lambda$  и температуры. Канавчатый спектр, описываемый выражением (1), смещается в шкале длин волн при повороте поляризатора 7. Взаимная ориентация главных направлений поляризаторов и двулучепреломляющих пластин такова, что в обоих каналах поворот поляризатора 7 по часовой стрелке при наблюдении со стороны приемника излучения сдвигает спектр в коротковолновую область. Поворот поляризатора 7 на  $90^\circ$  смещает кривую пропускания на половину периода.

В первом канале ИПФ один из максимумов пропускания настроен на длину волны 439,5 нм. В другом канале на эту длину волны установлен минимум пропускания. Настройка выполнена при рабочей температуре блока ИПФ, равной примерно  $37^\circ$ , для удобства реализации термостата с целью использования прибора в полевых условиях. Повышение температуры на  $1^\circ\text{C}$  сдвигает полосу пропускания ИПФ в области 440 нм примерно на 0,04 нм в коротковолновую область спектра. Полученный фильтр в основном отвечает требованиям формирования спектральной функции чувствительности ВСП-Г в широком угле зрения  $17,8^\circ \times 23,2^\circ$ , что позволяет получать изображение крупномасштабных облаков диоксида азота.

На рис. 2 приведены экспериментальные спектры пропускания каналов ВСП-Г, включающие ИПФ



**Рис. 2.** Экспериментальные спектры пропускания. 1 – канал 1, 2 – канал 2, 3 – кювета с  $\text{NO}_2$ .

и УИФ, полученные при нормальном падении пучка лучей. Эти спектры пропускания хорошо совпадают со спектром пропускания кювет с диоксидом азота (кривая 3 на рис. 2), а также с расчетными спектрами пропускания оптимальных фильтров, приведенными в [5]. Спектры пропускания каналов прибора нормированы на максимальное пропускание канала 1.

Оптическая схема прибора в УФ области спектра для регистрации диоксида серы отличается от приведенной на рис. 1 тем, что на ее входе под углом  $45^\circ$  к оптической оси прибора устанавливаются два параллельных дихроических зеркала, отражающих УФ область в прибор для повышения степени подавления фонового излучения в видимой и ближней ИК областях спектра.

### Методика определения выброса газа с помощью наземного газовизора

Известна методика определения выброса газа из трубы предприятия по измерению спектральной яркости шлейфа диоксида азота с помощью одноканального спектрометра. Спектрометр устанавливался на машине, которая проезжала под шлейфом, и проводились измерения при визировании по направлению в зенит. Тогда выброс из трубы может быть определен как

$$Q = \int_0^L \int_0^{h_0} C(l, h) V_w \cos \gamma dh dl, \quad (2)$$

где  $Q$  – величина выброса антропогенного источника эмиссии,  $C(l, h)$  – концентрация газа на высоте  $h$  на расстоянии  $l$  от начала сечения шлейфа,  $L$  – длина пути автомашины, на котором наблюдается превышение сигнала над фоном,  $V_w$  – скорость ветра,  $h_0$  – верхняя граница зоны распространения

шлейфа загрязняющего газа. Угол  $\gamma$ , позволяющий определить длину пути автомашины в направлении, перпендикулярном направлению распространения шлейфа от источника, определяется уравнением

$$\gamma = 90^\circ - (\beta - \alpha), \quad (3)$$

где  $\beta$  – азимут вектора ветра,  $\alpha$  – азимут направления движения автомашины относительно направления на север.

В случае измерений с помощью ВСП-Г наблюдение шлейфа осуществлялось на фоне неба при зенитном угле линии визирования, проходящей через центр снимка, равном  $25^\circ$ . Ось  $z$  системы координат  $оху$  проходит вдоль трубы, а наблюдение ведется из точки  $P$ , находящейся на расстоянии 350 м от трубы. Плоскость  $zox$  перпендикулярна вертикальной плоскости визирования прибора, проходящей через центр кадра снимаемой сцены. Осевая линия шлейфа находится в той же вертикальной плоскости, что и вектор ветра  $\mathbf{W}$ . На рис. 3 показана проекция векторов на горизонтальную плоскость  $хоу$ . Как и в ранее рассмотренном случае, угол  $\gamma$  между нормалью к плоскости визирования будет определяться формулой (3), где  $\alpha$  является азимутом вертикальной плоскости визирования шлейфа. Таким образом, под длиной пути автомашины  $L$  при съемке с ВСП-Г понимается ширина шлейфа в контролируемом вертикальном сечении, определяемая по снимку шлейфа, а величина

$$CL(l) = \int_0^{h_0} C(l, h) dh \quad (4)$$

равна содержанию  $\text{NO}_2$  в единичном сечении на расстоянии  $l$  от начала сечения шлейфа, которое может быть определено по сигналу ВСП-Г с привязкой к содержанию  $\text{NO}_2$  в калибровочных кюветах. В формуле (4) под  $h_0$  понимается граница зоны шлейфа в направлении визирования ВСП-Г. Поскольку

$$\int_0^L CL(l) dl = CL_{\text{ав}} L, \quad (5)$$

где  $CL_{\text{ав}}$  – среднее содержание газа в единичном сечении, определенное по вертикальному сечению шлейфа, то уравнение (2) может быть записано как

$$Q = V_w CL_{\text{ав}} L \cos \gamma. \quad (6)$$

Соотношение между содержанием газа в единичном сечении, выраженным в  $[\text{г м}^{-2}]$  и в  $[\text{атм см}]$ , может быть определено на основе рассмотрения единиц измерения концентрации газа. Можно показать, что

$$CL_{\text{ав}} = \frac{12,04 U_{\text{ав}} M_g T_l P_0}{M_a T_0 P_l}, \quad (7)$$

где  $U_{\text{ав}}$  – среднее содержание газа в единичном сечении в  $[\text{атм см}]$ ,  $M_a$  и  $M_g$  – грамм-молекулярный

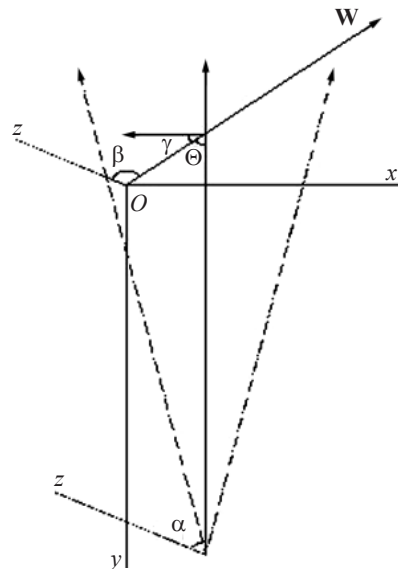


Рис. 3. Схема наблюдения. Пояснения в тексте.

вес воздуха и диоксида азота,  $P_l$  и  $T_l$  – давление и температура в столбе слоя газа соответственно,  $P_0 = 1$  атм,  $T_0 = 293$  К.

### Результаты натурального эксперимента по регистрации диоксида азота с помощью наземного газовизора

#### Калибровочные кюветы

Нужно отметить, что определение концентрации газа в калибровочных кюветах проводилось оптическим методом с обязательным учетом пропускания кювет. При аттестации кювет с газом были измерены только полные спектральные пропускания, поэтому для определения концентрации диоксида азота было использовано совместное решение уравнений (8) для двух длин волн:

$$\tau_c(\lambda) = \tau(\lambda) \tau_g(\lambda). \quad (8)$$

Сечения поглощения диоксида азота для нормальных условий при температуре 298 К были взяты из [10] для длин волн  $\lambda_1 = 439$  нм и  $\lambda_2 = 438$  нм:  $\sigma(\lambda_1) = 6,33 \times 10^{-19}$  см<sup>2</sup>/мол,  $\sigma(\lambda_2) = 4,05 \times 10^{-19}$  см<sup>2</sup>/мол. Учитывая, что  $\tau_g(\lambda_1) = \tau_g(\lambda_2) = \tau_g$ , получим формулу для оценки содержания газа в кювете

$$C_{\text{ppm}} = \frac{\ln \tau(\lambda_2) - \ln \tau(\lambda_1)}{(\sigma(\lambda_1) - \sigma(\lambda_2)) N_0 10^{-6} d}, \quad (9)$$

где  $N_0 = 2,69 \times 10^{19}$  мол/см<sup>3</sup>,  $d$  – толщина кюветы, измеренная в сантиметрах,  $\tau(\lambda_1)$  и  $\tau(\lambda_2)$  – измеренные пропускания кювет на длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ . Тогда пропускание кювет может быть определено как

$$\tau_g = \frac{\tau(\lambda_1) + \tau(\lambda_2)}{\exp(-\sigma(\lambda_1)Cd) + \exp(\sigma(\lambda_2)Cd)}. \quad (10)$$

В табл. 4 приведены значения концентраций диоксида азота в кюветях, изготовленных ВНИИМ им. Д.И. Менделеева.

#### Результаты эксперимента

Метеорологические параметры, необходимые для оценки содержания газа в шлейфе и величины выброса диоксида азота, приведены в табл. 5.

В качестве сигнала в ВСП-Г используются безразмерные параметры:

$$S = S_g - S_f, \quad (11)$$

$$S_g = \frac{B_2 - B_1}{B_2}, \quad (12)$$

$$S_f = \frac{B_{2f} - B_{1f}}{B_{2f}}, \quad (13)$$

где  $B_1$  и  $B_2$  – яркости излучения, зарегистрированные в 1-м и 2-м каналах ВСП-Г при наличии контролируемого газа, а  $B_{1f}$  и  $B_{2f}$  – яркости излучения в фоновых условиях, когда загрязняющий газ на трассе наблюдения отсутствует. Фоновая концентрация диоксида азота в атмосферном воздухе существенно ниже предельно допустимой концентрации и порога чувствительности прибора. Можно считать, что сигнал  $S$  линейно связан с содержанием исследуемого газа на трассе.

На рис. 4 представлены два снимка, полученные 17.09.04 в 1-м и 2-м каналах прибора, на которых шлейф выброса диоксида азота из трубы ТЭЦ не виден глазом. На рис. 5 представлено распределение сигнала  $S_g$  на снимке шлейфа. В качестве фонового был принят участок  $F$  чистого неба. На шлейфе выброса из трубы был выбран участок  $G$  посередине снимка. Угловой размер этого участка составля-

**Таблица 4.** Концентрации диоксида азота и пропускание кювет

№ кюветы	$C_{\text{PPM}}$	$C_{\text{PPMM}}$	$U$ , атм см	$\tau_g$	$S$
1	3056	30,57	0,003057	0,65	0,07
2	17972	179,72	0,017972	0,67	0,137

**Таблица 5.** Метеорологические параметры

Скорость ветра $V_w$ , м/с	8
Азимут вектора ветра $\beta$ , град	112
Азимут вертикальной плоскости визирования шлейфа $\alpha$ , град	62
Ширина шлейфа в контролируемом вертикальном сечении $L$ , м	50
Давление $P_1$ , атм	0,98
Температура $T_1$ , К	285
Грамм-молекулярный вес, г/моль	
$M_a$	29
$M_g$	46

ет  $7,4^\circ$ , расстояние от точки наблюдения до оси шлейфа равно 375 м, что позволяет определить ширину шлейфа  $L$  в контролируемом вертикальном сечении. Значения безразмерных сигналов составляют:  $S_g = 0,186$ ,  $S_f = 0,105$ ,  $S = 0,081$ . По калибровочным данным, приведенным в табл. 4, были найдены коэффициенты линейного калибровочного уравнения и определено содержание двуоксида азота в единичном сечении на участке  $G$ , которое составило  $U_{\text{ав}} = 0,0052$  атм см, а  $CL_{\text{ав}} = 0,103$  г м<sup>-2</sup>. Выброс диоксида азота, рассчитанный на основе параметров табл. 5, составляет  $31$  г с<sup>-1</sup>.

Поскольку угол  $\gamma = 40^\circ$  и ракурс наблюдения  $\Theta = 50^\circ$  довольно малы (см. рис. 3), то рост увеличения концентрации газа в сечениях шлейфа в правую сторону является кажущимся и связан с большим увеличением трассы в шлейфе на линии визирования ВСП-Г. Кроме того, на снимке видна



**Рис. 4.** Исходные снимки двух каналов прибора. а – 1-й канал, б – 2-й канал.

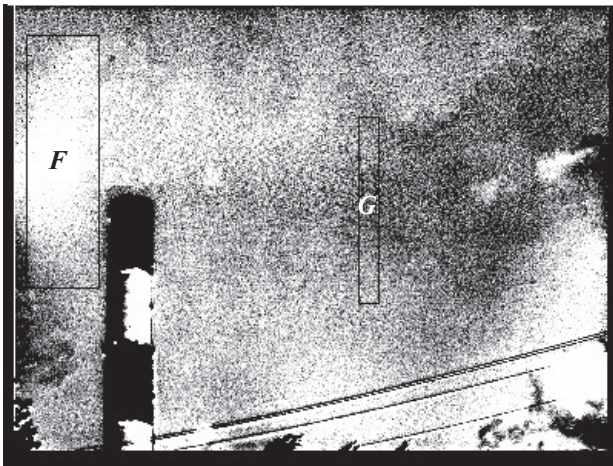


Рис. 5. Визуализированный газовый выброс.

сильная турбулентность воздуха, что привело к подъему шлейфа на правом верхнем участке снимка. Регистрация области пространства с правой стороны от снимка подтверждает, что конус шлейфа из-за турбулентности идет в основном вверх и в сторону от наблюдателя. Вообще, угол ракурса съемки должен выбираться близким к  $90^\circ$ , но в данном пробном случае такой результат был получен из-за невозможности выбора точки съемки.

Нужно отметить, что в формировании наблюдаемой ВСП-Г спектральной яркости участвуют молекулы воздуха и частицы аэрозоля, индикатрисы рассеяния которых характеризуются выраженными угловыми зависимостями. Поэтому должна наблюдаться зависимость спектральных яркостей от зенитного угла Солнца, а также от зенитного угла визирования прибора. Было проанализировано влияние вышеупомянутых углов на контрастное отношение, которое равно отношению сигнала  $S$  при заданной концентрации диоксида азота 10 ppm в пограничном слое атмосферы 200 м к сигналу, соответствующему фоновому значению концентрации. Расчеты показали, что наибольшие изменения контрастного отношения (25–30%) связаны с зенитным углом Солнца ( $15^\circ$ – $70^\circ$ ), в то время как от зенитного угла наблюдения и азимута относительно солнечного вертикала зависимость слабая. При изменении высоты Солнца значительно меняется спектральный ход яркости рассеянного излучения, что требует экспериментального исследования зависимости сигнала от высоты Солнца во время калибровки ВСП-Г по газовым кюветам на фоне неба.

### Заключение

Определены пути решения проблемы создания видеоспектрорадиометров-газовизоров космического, самолетного и наземного базирования для дис-

танционного определения пространственного распределения и содержания выбросов диоксидов азота и серы в приземной атмосфере. Результаты натурного эксперимента согласуются с допустимыми оценками диоксида азота в выбросах трубы ТЭЦ, что подтверждает возможность оперативного дистанционного контроля выбросов диоксидов азота промышленными предприятиями.

Работа выполнена при поддержке Международного научно-технического центра по гранту № 2274. Авторы благодарны И.Н. Сивякову за большой вклад в подготовку, проведение и обработку эксперимента и А.И. Решетникову за участие в решении методических вопросов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Белобо Э.В., Решетников А.И. Приборы дистанционного контроля загрязнения окружающей среды газами // Создание государственной системы контроля состояния природной среды. Обнинск: ВНИИГЦМ МЦД, 1987. В. 3. 60 с.
2. Чайнова Э.А., Шайков Н.К. Корреляционный массовый спектрометр для исследования газовых составляющих атмосферы // Автоматизация сбора и обработки гидрометеорологической информации. Обнинск: ВНИИГЦМ МЦД, 1984. В. 2. 42 с.
3. Davydov V.S., Afonin A.V., Reshetnicov A.I. On the possibility to determine harmful technical gas spatial distribution // Proc. SPIE. 1993. V. 2049. P. 364–365.
4. Давыдов В.С., Афонин А.В., Решетников А.И., Пивоваров В.В. Аэрокосмический мониторинг газовых примесей в приземном слое атмосферы // Труды Междунар. конф. «Охрана окружающей среды при поиске, разведке, переработке и транспортировке углеводородного сырья». СПб., 1996. С. 37–43.
5. Афонин А.В., Давыдов В.С., Решетников А.И. Принципы построения видеоспектрорадиометров-газовизоров для наблюдения с ИСЗ распределения антропогенных газов в приземной атмосфере // Оптический журнал. 1997. № 3. С. 99–102.
6. Афонин А.В., Давыдов В.С., Виноградова Т.А., Казанский В.В. Система спектральной фильтрации в видеоспектрорадиометрах-газовизорах для регистрации  $\text{NO}_2$  и  $\text{SO}_2$  в приземной атмосфере // Оптический журнал. 2001. № 12. С. 50–55.
7. Афонин А.В., Казанский В.В. Подавление фонового излучения в системах спектральной фильтрации в видеоспектрорадиометрах-газовизорах для регистрации  $\text{NO}_2$  и  $\text{SO}_2$  в приземной атмосфере // Оптический журнал. 2001. № 12. С. 56–59.
8. Афонин А.В., Грамматин А.П., Летуновский А.А., Цуканова Г.И. Оптические системы видеоспектрорадиометров-газовизоров на УФ и видимую области спектра // Оптический журнал. 1997. № 3. С. 53–55.
9. Афонин А.В., Дричко Н.М., Сивяков И.Н. Широкоугольный интерференционно-поляризационный

- фильтр видеоспектрометра-газовизора для регистрации диоксида азота // Оптический журнал. 2004. № 11. С. 69–72.
10. *Schneider W.C. et al.* Absorption cross-sections of NO<sub>2</sub> in the UV and visible region (200–700 nm) at 298 K // *J. of photochemistry and photobiology*. 1987. V. 140. № 223. P. 195–217.
11. *Afonin A.V., Davydov V.S., Sivyakov I.N., Reshetnicov A.I.* Results of Full-Scale Experiment on Registration of Nitrogen Dioxide Using Videospectroradiometer Gas-Viewer // *Proc. of the 31st Intern. Symposium on Remote Sensing of Environment*. SPb., 2005. Paper 880.
12. *Афонин А.В., Давыдов В.С., Горбунов Г.Г., Решетников А.И.* Наземный спектрометрический комплекс для исследования содержания антропогенных газов в пограничном слое атмосферы и уточнения данных спутниковых измерений // *Оптический журнал*. 2004. № 11. С. 73–77
13. *Афонин А.В., Давыдов В.С., Образцов С.П., Решетников А.И.* Возможности валидации спутниковых спектрометрических измерений содержания парниковых и антропогенных газов в пограничном слое атмосферы. Дистанционное зондирование земных покровов и атмосферы аэрокосмическими средствами // *Труды 2-й Всерос. научн. конф.*, 2004. С. 17–21.
-