

Оценка интегрального содержания NO_2 в пограничном слое атмосферы по наблюдениям рассеянной в зените солнечной радиации

В.А. Иванов, О.В. Постыляков*

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
109017, г. Москва, Пыжевский пер., 3

Поступила в редакцию 29.01.2010 г.

Кратко изложена новая методика оценки интегрального содержания NO_2 в пограничном слое атмосферы по комбинации спектральных измерений приходящего из зенита рассеянного солнечного излучения в дневное время и в сумеречный период. Проанализировано влияние основных факторов на точность оценки содержания примеси, таких как облачность и альbedo подстилающей поверхности. Показано, что в условиях безоблачности и сплошной облачности с нижней границей, расположенной выше приземного слоя NO_2 , возможно определение интегрального содержания в приземном слое с ошибкой 15–25%.

Ключевые слова: двуокись азота, пограничный слой атмосферы, дистанционные измерения, дифференциальная спектроскопия, метод DOAS, влияние облачности; nitrogen dioxide, atmospheric boundary layer, remote sensing, differential optical absorption spectroscopy, DOAS, cloud effect.

Введение

Двуокись азота (NO_2) — один из ключевых компонентов фотохимии атмосферы Земли. Реакции с ее участием приводят, в частности, к увеличению содержания приземного озона и образованию азотной кислоты с выпадением кислотных дождей. На антропогенные источники NO_2 приходится около 2/3 от общего количества выбросов NO_2 [1]. Ее содержание в пограничном слое атмосферы (ПСА) над крупными городами может превышать естественный фон на порядки. Для организации мониторинга примеси предлагается методика оценки ее интегрального содержания в ПСА по измерениям спектра приходящего из зенита рассеянного солнечного излучения в дневное время и в сумеречный период вблизи 450 нм.

1. Методика восстановления содержания NO_2 в пограничном слое атмосферы

Измерения рассеянного в зените солнечного излучения выполняются в г. Москве и в фоновых условиях Звенигородской научной станции ИФА РАН, расположенной в 70 км от мегаполиса. Измерения проводятся в полосе поглощения NO_2 на длинах

волн 430–460 нм в дневное время и в сумерки. По результатам измерений методом дифференциальной спектроскопии (DOAS) [2] определяется так называемое наклонное содержание NO_2 в атмосфере $X(z) = \int m(z, h)n(h)dh$ для всех зенитных углов Солнца z .

Интересующее нас интегральное содержание NO_2 в ПСА

$$V_{\text{ПСА}} = \int_{\text{ПСА}} n(h)dh \quad (1)$$

связано с измеряемым наклонным содержанием $X(z)$ через вертикальное распределение концентрации примеси $n(h)$ равенством

$$\begin{aligned} X_{\text{ПСА}}(z) &\equiv \int_{\text{ПСА}} m(z, h)n(h)dh = \\ &= X(z) - \int_{\text{стр}} m(z, h)n(h)dh, \end{aligned} \quad (2)$$

где $m(z, h)$ — послойная воздушная масса (ВМ); $\int_{\text{стр}}$ — интеграл по стратосферным высотам; $\int_{\text{ПСА}}$ — интеграл по высотам ПСА.

Для расчета члена $\int_{\text{стр}} m(z, h)n(h)dh$ выражения

(2) при всех z восстанавливается профиль примеси

* Виктор Александрович Иванов (victor.ivanov@list.ru); Олег Вадимович Постыляков (ovp@ifaran.ru).

$n(h)$ в стратосфере с использованием наблюдений при низком положении Солнца ($84^\circ < z < 96^\circ$) по методу, изложенному в работе [3]. В сумеречный период высота слоя атмосферы h , в котором достигается максимум послойной ВМ $m(z, h)$, возрастает с увеличением зенитного угла Солнца. При этом послойные ВМ тропосферы значительно меньше по величине и меняются мало. Эти закономерности являются физической основой восстановления профиля $n(h)$ в стратосфере в сумерки [3]. Для расчета стратосферного содержания NO_2 в дневное время используется фотохимическая модель трансформации атмосферы, как в работе [4].

Из равенств (1) и (2) вытекает тождество

$$V_{\text{ПСА}} = \frac{X_{\text{ПСА}}(z)}{\int_{\text{ПСА}} m(z, h) k(h) dh},$$

где $k(h) = n(h)/V_{\text{ПСА}}$ – нормированный профиль концентрации примеси. Следовательно, для получения интегрального содержания $V_{\text{ПСА}}$ может быть использована оценка $\tilde{V}_{\text{ПСА}}$:

$$V_{\text{ПСА}} \approx \tilde{V}_{\text{ПСА}} = \frac{X_{\text{ПСА}}(z)}{\int_{\text{ПСА}} \tilde{m}(z, h) \tilde{k}(h) dh}, \quad (3)$$

где $X_{\text{ПСА}}(z)$ – величина, вычисляемая по формуле (2) из измерений; $\tilde{m}(z, h)$ – вычисляемая по модели переноса излучения послойная ВМ; $\tilde{k}(h)$ – нормированный модельный профиль концентрации примеси:

$$\int_{\text{ПСА}} \tilde{k}(h) dh = 1.$$

Влияние возможных вариаций и неточностей в задании нормированного профиля примеси $\tilde{k}(h)$ и послойной ВМ $\tilde{m}(z, h)$ в различных условиях наблюдения на оценку (3) рассмотрено ниже в п. 2.

Расчет послойных ВМ $m(z, h)$ проводился с помощью модели переноса излучения МСС++ [5], в которой уравнение переноса излучения в сферической атмосфере решается с помощью метода Монте-Карло. Модель учитывает сферичность атмосферы, многократное рассеяние, поляризацию излучения, альbedo подстилающей поверхности. Расчеты проводились для континентальной модели тропосферного аэрозоля [6] с фоновыми концентрациями и фонового стратосферного аэрозоля [6]. Оптические характеристики облачности рассчитывались по теории Ми для модели кучевого облака $C1$ монографии [7].

Отметим, что доля ПСА в измеряемых наклонных толщах $X(z)$ в дневное время значительно больше, чем в сумерки, потому что послойные ВМ стратосферного NO_2 в дневное время оказываются существенно меньше сумеречных. Благодаря этому наблюдения содержания NO_2 в ПСА в дневное время имеют большую точность.

2. Ошибки метода восстановления содержания NO_2 в пограничном слое атмосферы

2.1. Определение ошибки восстановления

Основную ошибку в восстановление интегрального содержания NO_2 в ПСА по формуле (3) вносит неопределенность входных параметров модели переноса излучения (МПИ). К факторам, оказывающим наибольшее влияние, относятся неопределенности в задании альbedo земной поверхности, характеристик тропосферы (облачность, аэрозоль) и нормированного высотного распределения поглощающей газовой примеси.

Для определения ошибки восстановления, связанной с некоторым параметром МПИ, мы выполнили расчеты коэффициента

$$F(z) = \frac{1}{\int_{\text{ПСА}} \tilde{m}(z, h) \tilde{k}(h) dh}, \quad (4)$$

входящего в формулу (3), и вычисляли его максимальное $F_{\text{max}}(z)$ и минимальное $F_{\text{min}}(z)$ значения при вариации этого параметра МПИ в рамках неточности его задания. Для используемой нами оценки интегрального содержания примеси

$$V_{\text{ПСА}} \approx \tilde{V}_{\text{ПСА}} = \bar{F}(z) X_{\text{ПСА}}(z), \quad (5)$$

$$\bar{F}(z) = \frac{F_{\text{max}}(z) + F_{\text{min}}(z)}{2}$$

относительную ошибку восстановления определяет равенство

$$\varepsilon = \frac{F_{\text{max}} - F_{\text{min}}}{2\bar{F}}.$$

Расчеты послойной ВМ проводились для облачных (рис. 1 и 2) и ясных (рис. 3) условий.

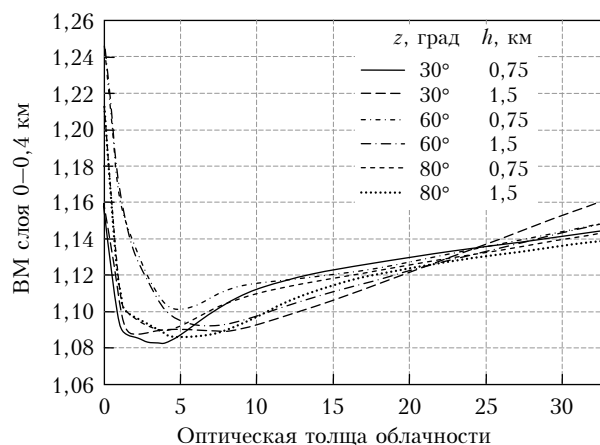


Рис. 1. ВМ, рассчитанные для условия облачности и альbedo земной поверхности 0,05; z – зенитный угол Солнца, h – высота нижней границы облачности, км

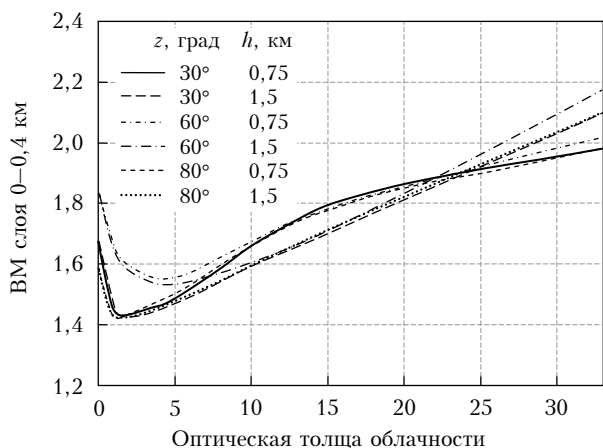


Рис. 2. То же, что на рис. 1, но для альbedo 0,34

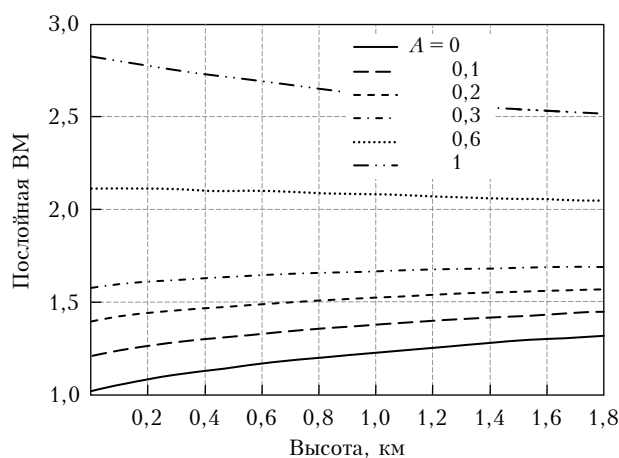


Рис. 3. Послойные ВМ для зенитного угла Солнца 30° в условиях безоблачности

Статистическая погрешность в расчетах послойной ВМ не превышала 0,1% для безоблачных дней, 1% для условий облачности с оптической толщиной облака от 0 до 30 и 5% для условий облачности с оптической толщиной от 30 до 70.

2.2. Вклад альbedo в ошибку восстановления содержания NO₂ в ПСА

В радиационных расчетах для оценки содержания NO₂ в ПСА мы используем данные альbedo спутникового прибора MODIS (продукт MCD43A3) [8]. Его ошибка измерения альbedo в видимой области составляет менее 10%.

Оцененные нами средние значения (\pm дисперсия) альbedo для измерений в Московском регионе с апреля 2008 по апрель 2009 г. составили 0,05 (\pm 0,02) в бесснежный и 0,34 (\pm 0,09) в снежный периоды. Чтобы оценить вклад, который может вносить альbedo в погрешность восстановления содержания NO₂, мы оценили возможную ошибку, вносимую им:

$$\varepsilon = \frac{F(\text{среднее за сезон альbedo} + \text{дисперсия альbedo} + \text{+ 10\% от двух предыдущих значений})}{F(\text{среднее за сезон альbedo}) - 1}$$

В качестве нормированного профиля NO₂ использовался профиль модели распределения приземного NO₂ [9] для зимнего периода (рис. 4).

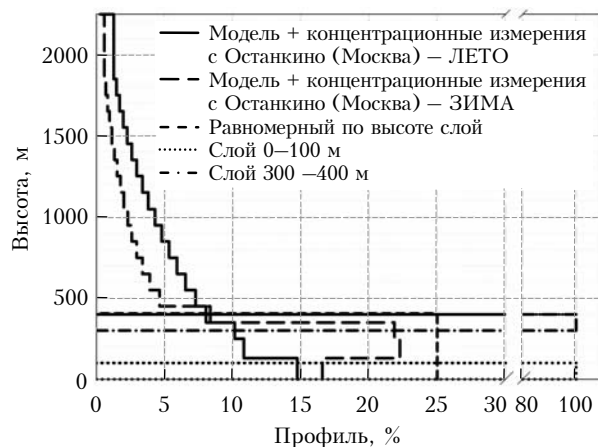


Рис. 4. Типы профилей NO₂, используемые при анализе ошибок восстановления содержания NO₂

Ошибки восстановления приводятся в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Ошибки восстановления интегрального содержания NO₂ в ПСА, вносимые возможными вариациями параметров МПИ в безоблачных условиях

Варьируемый параметр МПИ	Ошибка (дополнительные условия)	
	A = 0,05 (лето)	A = 0,34 (зима)
Тип нормированного профиля	15%	10%
Альbedo	4% (A \pm 0,02)	10% (A \pm 0,09)

Примечание. A – альbedo земной поверхности.

Таблица 2

Ошибки восстановления интегрального содержания NO₂ в ПСА, вносимые возможными вариациями параметров МПИ

Варьируемый параметр МПИ	Ошибка (дополнительные условия)	
	A = 0,05 (лето)	A = 0,34 (зима)
Тип нормированного профиля	5,5% ($\tau = 16$; $h = 1,5$ км)	2,5% ($\tau = 16$; $h = 1,5$ км)
Нижняя граница облачности	0,3%	1,5%
Оптическая толщина облачности	6%	15%
Альbedo (\pm 0,02 для A = 0,05; \pm 0,09 для A = 0,34)	1,5% ($\tau = 16$)	6% ($\tau = 16$)

Примечание. A – альbedo земной поверхности; τ – оптическая толщина облачности; h – высота нижней границы облачности.

2.3. Влияние нормированного профиля NO₂ на точность восстановления

При анализе влияния высотного распределения NO₂ на коэффициент F использовались нормированные профили $\hat{k}(h)$ пяти типов (см. рис. 4). Два профиля соответствуют модели распределения приземного NO₂ [9] для летнего и зимнего периодов. Модель [9] построена на основе измерений газоанализаторов на нескольких уровнях Останкинской телебашни и высотного здания Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова в сочетании с фотохимическим моделированием. Третий тип – когда примесь распределена равномерно в слое 0–400 м.

Высота слоя NO₂ 400 м соответствует нашим оценкам по данным одновременных измерений концентрации и содержания NO₂ на метеостанции МГУ (Москва) в предположении однородного распределения газа по высоте.

Мы также рассматривали четвертый и пятый типы профиля с сосредоточением примеси около земли (в слое 0–100 м) и у верхней границы вероятного сосредоточения примеси (в слое 300–400 м). Ошибки восстановления вычислены в соответствии с формулой (5) (см. табл. 1 и 2).

2.4. Влияние нижней границы облачности на точность восстановления

Вариация нижней границы облачности от 0,75 до 1,5 км не вносит существенной ошибки. Результаты анализа показаны в табл. 2. Оптическая толщина облачности при моделировании равнялась 16. В качестве профиля NO₂ использовался нормированный профиль модели [9] для зимнего периода.

2.5. Влияние оптической толщи облачности на точность восстановления

Оптическая толщина облачности сильно изменчива. Поэтому нами был оценен вклад оптической толщи облачности в пределах от 0 до 35 (счетная концентрация капель воды в облаке $C1$ [7] от 0 до 200 см⁻³). Ошибки восстановления приведены в табл. 2.

Заключение

Развиваемая нами методика позволяет восстанавливать содержание NO₂ в условиях безоблачности и сплошной облачности.

Были проанализированы ошибки восстановления интегрального содержания NO₂ в ПСА, вносимые различными источниками. Форма нормированного

профиля распределения NO₂ не оказывает существенного влияния на погрешность определения содержания, если слой примеси находится ниже слоя облачности. Неопределенности в задании альбедо и облачности (ее толща и положение относительно слоя NO₂) могут вносить наибольший вклад в погрешность оценки NO₂ в ПСА. Суммарная ошибка метода, включающая в себя точность измерения наклонного содержания NO₂, ошибки стратосферного составляющего оценки и точности расчета послойной VM для ПСА, составляет:

- в ясных условиях летом (зимой) – 20% (20%);
- в условиях облачности летом (зимой) – 15% (25%).

Точность измерений в облачных условиях может быть улучшена за счет использования информации об оптической толще облачности и ее нижней границе.

Авторы выражают благодарность А.С. Елохову за полезные обсуждения, а также А.А. Исакову за полезные замечания по рукописи статьи.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 08-05-01046.

1. Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L. IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. United Kingdom; Cambridge: University Press, 2007. 996 p.
2. Platt U., Slutz J. Optical Absorption Spectroscopy. Principles and Applications. Heidelberg; Berlin: Springer-Verlag, 2008. 597 p.
3. Елохов А.С., Груздев А.Н. Измерения общего содержания и вертикального распределения NO₂ на Звенигородской научной станции // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2000. Т. 36. № 6. С. 831–846.
4. Gruzdev A.N., Elokho A.S. Validation of Ozone Monitoring Instrument NO₂ measurements using ground based NO₂ measurements at Zvenigorod, Russia // Int. J. Remote Sens. 2010. V. 31. N 2. P. 497–511.
5. Постыляков О.В. Модель переноса радиации в сферической атмосфере с расчетом послойных воздушных масс и некоторые ее приложения // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2004. Т. 40. № 3. С. 314–329.
6. WMO. World Climate Research Program: A preliminary cloudless standard atmosphere for radiation computation / Technical report WCP-112, WMO-TD N 24, World Meteorological Organization, Geneva, 1986. 60 p.
7. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. М.: Мир, 1971. 303 с.
8. Strahle A.H., Muller J.-P., Lucht W., Schaaf C.B., Tsang T., Gao F., Li X., Lewis P., Barnsley M.J. MODIS BRDF / Albedo Produce. Algorithm Theoretical Basis Document Version 5.0. 1999.
9. Чубарова Н.Е., Ларин И.К., Лезина Е.А. Экспериментальное и модельное исследование вариаций содержания диоксида азота в пограничном слое атмосферы в Москве // Вестн. Московск. ун-та. Сер. 5. 2010. № 2 (В печати).

V.A. Ivanov, O.V. Postilyakov. Estimation of integral NO₂ content in the atmospheric boundary layer from observations of scattered in zenith radiation.

A new method for the estimation of the integral content of NO₂ in the boundary layer of the atmosphere by a combination of spectral measurements, incoming from the zenith scattered solar radiation in the daytime and in the twilight period, is described briefly. Effects of the major factors, affecting the accuracy of the estimation, such as clouds and albedo of the underlying surface, analyzed. It is shown that in cloudless condition and with the cloud lower boundary located above the near-surface layer of NO₂, the determination of the integral content in the surface layer is possible with an error of 15–25%.