

А.А. Бузников, А.И. Демьяников

**ОБ ОПТИМАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ ПРОЗРАЧНОСТИ В ВИДИМОМ ДИАПАЗОНЕ НА КАСАТЕЛЬНЫХ ТРАССАХ**

Рассматривается проблема оптимизации измерений пропускания на касательных трассах прямого солнечного излучения в видимом диапазоне спектра. Показано, что с помощью рационального расположения измерительных каналов без увеличения объема измерений можно достичь значительного повышения точности восстановления оптически активных компонент стратосферы. Возможности предложенного подхода демонстрируются на примере восстановления  $\text{NO}_2$ .

**Введение и постановка задачи.** Одним из широко используемых методов дистанционного определения вертикальных профилей содержания в атмосфере Земли ее оптически активных составляющих является метод обращения данных измерений пропускания прямого Солнечного излучения на касательных трассах в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах [1]. С его помощью можно восстанавливать содержание таких важных для радиационного режима стратосферы газовых компонентов, как  $\text{O}_3$ ,  $\text{NO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , а также характеристики ослабления аэрозолям.

В настоящее время разработан и функционирует целый ряд космических приборов, которые, имея близкий спектральный диапазон измерений, существенно отличаются количеством и положением спектральных измерительных каналов. К этому ряду могут быть отнесены приборы серии «SAGE» [2], аппаратура МКС-М, МКФ-6М [3]. Близким по назначению является «ОЗОН-М», дополнительно к видимому и ближнему ИК-диапазонам обеспечивающий измерения в УФ-области спектра [4].

Различие в количестве и положении измерительных каналов этих приборов определяется либо целиком их конструктивными особенностями, либо дополнительными к атмосферным задачам, поставленными перед разработчиками (МКС-М); либо, как это имеет место в случае аппаратуры «SAGE», соображениями простоты обработки этих измерений [5]. Точность и число одновременных измерений могут оказывать существенное влияние на погрешность восстановления того или иного компонента атмосферы.

Так, в результате сопоставления точности определения  $\text{NO}_2$  по данным аппаратуры «SAGE-I» и «ОЗОНА-М», выполненного в [6], был сделан вывод о превышении точности восстановления с помощью «ОЗОНА-М» примерно в 1,5 раза. Причем часть выигрыша в точности следует отнести за счет использования дополнительного УФ-диапазона измерений, а оставшуюся долю — за счет многократного превышения по сравнению с «SAGE-I» числа спектральных измерений.

В то же время не следует забывать, что значительное увеличение числа одновременных измерений приводит к столь же значительному повышению расходов на сбор, передачу и обработку данных. В связи с этим представляет интерес исследование возможности рационального планирования космического эксперимента, при котором положение каждого спектрального канала является решением задачи о нахождении минимума погрешности восстановления интересующих нас данных о состоянии атмосферы для фиксированного числа каналов в пределах заданного спектрального диапазона.

Настоящую работу можно рассматривать как иллюстрацию возможностей такого подхода на примере восстановления  $\text{NO}_2$  из измерений пропускания в видимом диапазоне спектра. Выбор в качестве объекта исследования  $\text{NO}_2$  обусловлен тем, что при восстановлении этой компоненты по измерениям в указанной области получают наибольшие погрешности.

**Математическая модель.** Будем исходить из следующего выражения для пропускания солнечного излучения на касательных трассах при прицельной высоте зондирования  $h_l$  на длине волны  $\lambda_i$ :

$$T_{il} = \exp \left\{ -2 \sum_j \sum_{\kappa=l}^j \alpha_{ij} x_j(z_\kappa) G(z_\kappa, h_l) \right\}, \quad (1)$$

где

$$G_{\kappa l} = G(z_\kappa, h_l) = \sqrt{(R_3 + z_{\kappa+1})^2 - [n_l/n_{\kappa+1} \cdot (R_3 + h_l)]^2} - \sqrt{(R_3 + z_\kappa)^2 - [n_l/n_\kappa \cdot (R_3 + h_l)]^2};$$

— величина, описывающая вклад сферического слоя атмосферы с границами  $z_\kappa$  и  $z_{\kappa+1}$  в общую длину пути фотона через сферически симметричную атмосферу;  $n_\kappa$  — показатель преломления света в  $\kappa$ -м

слое;  $R_3$  — радиус Земли. Через  $\alpha_{ij}$  обозначен объемный коэффициент ослабления света  $j$ -й компонентой газового состава ( $j = 1$  — молекулярное рассеяние;  $j = 2$  — озон;  $j = 3$  — двуокись азота) или значение аппроксимирующего спектральный ход ослабления аэрозолем полинома на длине волны  $\lambda_i$ . Соответственно, в первом случае  $X_{jk}$  — концентрация в  $k$ -м слое  $j$ -й компоненты, во втором случае — коэффициент при соответствующем полиноме [6].

При записи (1) мы пренебрегли зависимостью от длины волны показателя преломления внутри рассматриваемого спектрального диапазона (0.4–1,02 мкм) [7]. Структура получившейся зависимости пропускания от параметров среды позволяет получить линеаризованную связь вариаций состава атмосферы и пропускания, в матричном виде имеющую следующий вид:

$$R = A \delta x G, \quad (2)$$

где

$$\{R_{il}\} = -\delta T_{il} / (2 \cdot T_{il}^{(0)}); \{A\}_{ij} = \alpha_{ij}; \\ \{G\}_{kl} = G_{kl}; \{\delta x\}_{jk} = x_{jk} - x_{jk}^{(0)}; \delta T_{il} = T_{il}(x) - T_{il}(x^{(0)}),$$

а индекс (0) обозначает некоторое приближение к распределению интересующих нас величин по высоте.

В работе [6] при решении аналогичного по смыслу, но имеющего иную структуру уравнения использовалась априорная статистика, полученная для распределения в стратосфере озона. Была показана сходимость итерационной схемы решения.

Для целей нашей работы представляется достаточным воспользоваться следующим представлением решения (2):

$$\delta x = (A^T A)^{-1} A^T R G^{-1}, \quad (3)$$

удовлетворяющим (2) в смысле наименьших квадратов.

Из структуры решения видно, что значительное усиление погрешностей измерений при их преобразовании в погрешности восстановления может произойти, если столбцы матрицы  $A$  будут почти линейно зависимыми. И чем в большей степени нам удастся выбором спектральных каналов обеспечить их линейную независимость, тем на лучшие результаты восстановления мы можем рассчитывать. Поэтому первое желание — расположить каналы так, чтобы на каждой длине волны в ослаблении доминировала какая-нибудь одна компонента. Это соответствует диагональной матрице  $A$ . По видимому, по этому пути пошли при проектировании системы «SAGE». При этом становится возможным использовать простую схему обращения исходного уравнения (1), описанную в [5].

Но не только линейная зависимость столбцов матрицы  $A$ , но и сами значения коэффициентов ослабления определяют точность восстановления искомых параметров атмосферы. Наличие двух этих факторов, которые могут, вообще говоря, противоборствовать, делают задачу выбора оптимальной совокупности каналов нетривиальной.

Пользуясь приближением независимой от высоты и длины волны относительной погрешности измерений, нетрудно получить явное выражение для дисперсии ошибок восстановления  $j$ -й компоненты на  $k$ -м высотном уровне

$$\sigma_{jk}^2 = \frac{\sigma_T^2}{4} \sum_{l,l} \tilde{A}_{jl}^2 [G_{lk}^{-1}]^2, \quad (4)$$

где  $\tilde{A} = (A^T A)^{-1} A^T$ ;  $\sigma_T^2$  — дисперсия относительной погрешности измерений пропускания. Интересно отметить, что в этом приближении абсолютная точность восстановления не зависит от содержания в атмосфере восстанавливаемых компонент. Чаще всего оптимизируется суммарная по высоте погрешность восстановления

$$S_j = \sum_k \sigma_{jk}^2. \quad (5)$$

**Численные результаты и выводы.** Для проведения расчетов была использована модель атмосферы, максимально приближенная по газовому составу к той, что была использована при проведении численных расчетов, описанных в [5]. Она состояла из однородных слоев километровой толщины от 10 до 75 км.

Информация о спектральной зависимости объемных коэффициентов поглощения  $\text{NO}_2$  была заимствована из [8],  $\text{O}_3$  — из [9].

Задача минимизации  $S$  по положению измерительных каналов в заданном спектральном интервале  $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$  относится к задаче нахождения минимума нелинейной функции многих переменных

при наличии простых двухсторонних ограничений вида  $\lambda_{\min} \leq \lambda_i \leq \lambda_{\max}$ .

Как известно, вариант «SAGE-II» является 7-канальным прибором, один из каналов которого находится в центре 0,94-мкм полосы поглощения H<sub>2</sub>O. Положение этого канала было зафиксировано нами при расчетах, а содержание H<sub>2</sub>O в стратосфере полагалось равным нулю. Для решения задачи использовался метод сопряженного градиента [10].

Отметим, что полученная структура минимизируемой функции, описываемая соотношениями (4)–(5), позволяет наиболее трудоемкую процедуру обращения матрицы  $G$  большой размерности проделать один раз до проведения многократных вычислений  $S$  и ее градиента в итерационном поиске минимума.

В качестве начального приближения использовалось положение измерительных каналов «SAGE-II». Полученное решение вместе с начальным приближением приводится в таблице.

Спектральные каналы «SAGE-II», мкм		Полученное решение, мкм	
1	0,385	1	0,408
2	0,448	2	0,413
3	0,453	3	0,425
4	0,525	4	0,448
5	0,600	5	0,545
6	0,94	6	0,596
7	1,020	7	0,94

Оказалось, что использование полученных каналов вместо каналов «SAGE-II» дает выигрыш в точности восстановления приблизительно в три раза. При этом, хотя и не столь значительно, улучшается восстановление всех остальных компонентов атмосферы, ослабляющих излучение. Для иллюстрации на рис. 1 приведены среднеквадратические погрешности восстановления NO<sub>2</sub> и O<sub>3</sub> при  $\sigma_T = 0,5\%$ , что соответствует [5].

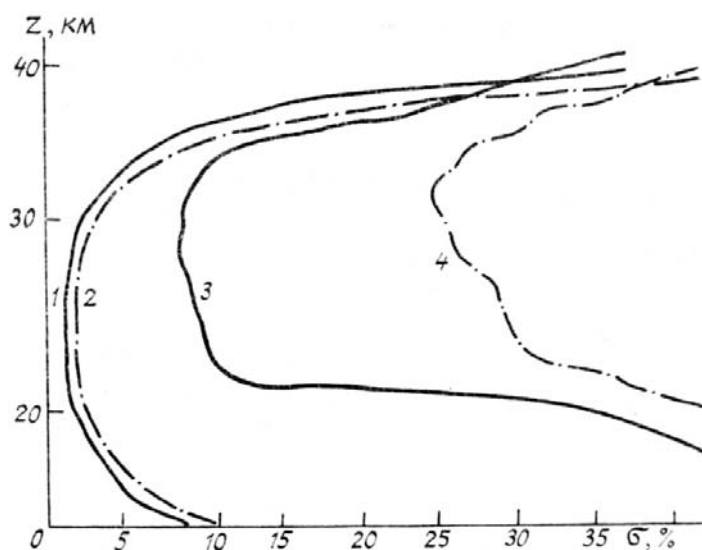


Рис. 1. Высотный профиль теоретической относительной погрешности восстановления NO<sub>2</sub> и O<sub>3</sub>: 1, 2 — для O<sub>3</sub>; 3, 4 — для NO<sub>2</sub>. Штрихпунктирные линии отвечают варианту «SAGE-II», сплошные — полученному решению

Сопоставление данных табл. 1 позволяет сделать следующие выводы:

1. При используемой параметризации аэрозольного ослабления для определения NO<sub>2</sub> оптимальней проводить измерения не в длинноволновой части диапазона (вблизи 1 мкм), где аэрозольное ослабление доминирует, а в коротковолновой, где ослабление сильнее.

2. Дополнительные измерения в полосе NO<sub>2</sub> для повышения точности его восстановления следует проводить не парами «максимум–минимум» (0,448 и 0,453 мкм в варианте «SAGE-II»), а в дополнительных максимумах зависимости объемного коэффициента поглощения от длины волны.

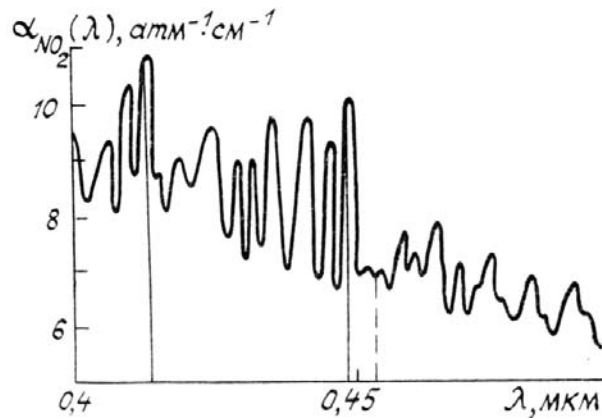


Рис. 2. Спектральная зависимость объемного коэффициента поглощения  $\text{NO}_2$ . Штриховая вертикальная линия показывает положение дополнительного канала, введенного в варианте «SAGE II». Сплошные вертикальные линии отмечают положение полученных каналов

На рис. 2 второе положение хорошо иллюстрируется. (Отметим, что дополнительный к 0,448 мкм канал был введен в «SAGE» для удобства обработки [2]).

Минимизируемая функция (5) имеет много экстремумов. Это следует, в частности, из сложного характера спектральной зависимости коэффициента поглощения  $\text{NO}_2$ . Однако основной выигрыш в точности определения  $\text{NO}_2$ , как это следует из численных экспериментов, достигается не за счет перемещения положения каналов с одного локального максимума этой зависимости на другой, а за счет смещения «аэрозольного» канала [5] в более коротковолновую область.

Для того чтобы убедиться в «работоспособности» полученной системы каналов, был поставлен численный эксперимент по восстановлению состава атмосферы. В качестве начального приближения использовалась атмосфера без аэрозоля,  $\text{O}_3$  и  $\text{NO}_2$ , ослабляющая свет только за счет рэлеевского рассеяния. Погрешности восстановления  $\text{NO}_2$  и  $\text{O}_3$  после 10 итераций представлены на рис. 3.

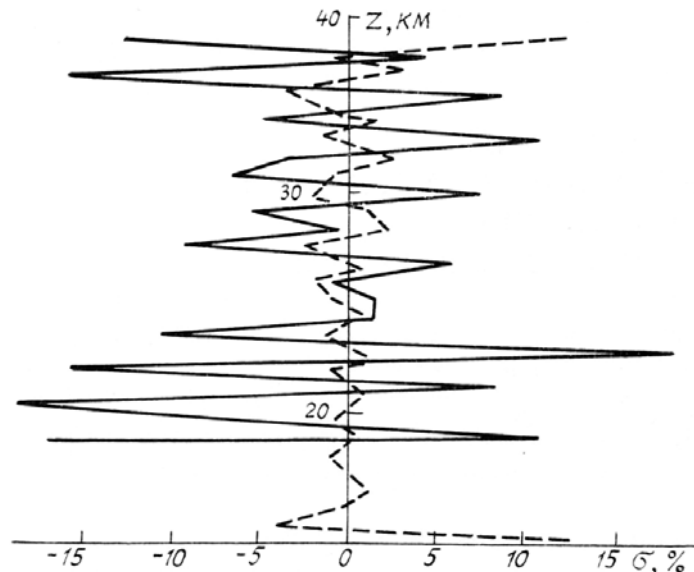


Рис. 3. Высотный профиль относительных погрешностей восстановления  $\text{NO}_2$  (сплошные) и  $\text{O}_3$  (штриховые линии), полученных в численном эксперименте с использованием оптимальных измерительных каналов

В заключение авторы выражают благодарность А.В. Шашкину за полезные обсуждения материала статьи.

1. Кондратьев К. Я., Бузников А. А., Покровский А. Г. // Известия АН СССР. ФАО. 1978. Т. 14. С. 1235–1248.
2. Mc Cormick M. P. // Adv. Space Res. 1987. V. 7. № 3. P. (3)219–(3)226.
3. Итоговый отчет по исследованию системы «атмосфера–поверхность» дистанционными методами. 1983–1985 гг. ИКИ АН СССР. М., 1987.

4. Занадворов П.Н., Поберовский А.В., Лаптев В.С. и др. //Тезисы I Всес. конф. по анализу неорганических газов. Л., 27–29 сентября 1983 г.
5. Chu W.P., Mc Cormick M.P. //Appl. Optics. 1979. V. 18. № 9. P. 1404–1413.
6. Тимофеев Ю.М., Розанов В.В., Поберовский А.В., Полякова А.В. //Метеорология и гидрология. 1986. № 8. С. 66–73.
7. Минин И.Н. Теория переноса излучения в атмосферах планет. М.: Наука, 1988.
8. Hall T.C., Blacet F.E. //J. Chem. Phys. 1952. V. 20. № 11. P. 1745–1749.
9. Хргиан А.Х. Физика атмосферного озона. Л.: Гидрометеониздат, 1973.
10. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация. М.: Мир, 1985.

Ленинградский электротехнический институт  
им. В. И. Ульянова (Ленина)

Поступила в редакцию  
15 июня 1989 г.

**A. A. Buznikov, A. I. Demianikov. Optimal Measurements of the Atmospheric Transmission in the Visual Range along Tangential Paths.**

The paper concerns with the optimization of the atmospheric transmission measurements along tangential paths using direct solar radiation in the visual range. It is shown that a proper disposition of measuring channels can result in a significant improvement of the optically active stratospheric components, contents restoration accuracy with no increase in the bulk of measurement information. The potentialities of the approach suggested are demonstrated by restorations of the NO<sub>2</sub> content.