

С.В. Логинов

**ПОГРЕШНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ
КОЭФФИЦИЕНТА РАССЕЯНИЯ АЭРОЗОЛЯ ПО ДАННЫМ
ЗОНДИРОВАНИЯ СУМЕРЕЧНОЙ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ**

На основе численного моделирования проводится сравнение метода Тихонова и метода Вольца–Гуди применительно к восстановлению коэффициента рассеяния аэрозоля по данным зондирования со спутника сумеречной атмосферы Земли. Показывается, что при использовании метода Тихонова достигается меньшее расхождение между исходным и восстановленным профилями. При этом восстанавливаемые профили обладают большей устойчивостью к случайным ошибкам, искусственно введенным в исходные данные.

Проблема определения пространственного распределения коэффициента рассеяния аэрозоля по измерениям со спутников яркости атмосферы планеты вблизи ее сумеречного горизонта рассмотрена в ряде работ. Для полных сумерек, характеризуемых углом погружения Солнца под горизонт $\delta > 15^\circ$ (рис. 1), удовлетворительно работают следующие методы: дифференциальный метод Бигга [1], улучшенный Вольцем и Гуди [2], метод эффективной геометрической тени, разработанный Розенбергом [3]. Перечисленные методы отличаются наглядностью и легко реализуемы для расчетов. Однако при применении этих методов для интерпретации данных зондирования сумеречного горизонта при углах погружения $\delta < 2^\circ$ и при одновременном изменении угла δ и высоты перигея линии визирования прибора необходимо учитывать быстрое изменение толщины эффективного рассеивающего слоя в зависимости от высоты луча визирования. В результате сокращается область высот, на которых возможна устойчивость решения к ошибкам измерения.

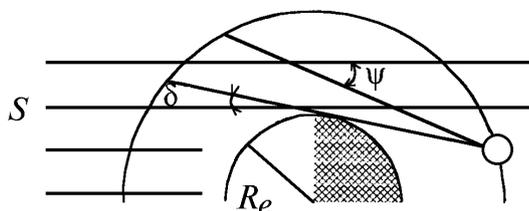


Рис. 1. Схема зондирования сумеречной атмосферы Земли. Солнце, центр Земли и прибор находятся в одной плоскости

В настоящей статье на примере модельных данных проводится сопоставление погрешностей восстановления коэффициента рассеяния по результатам зондирования сумеречной атмосферы Земли из космоса, выполненное двумя методами: методом Вольца и Гуди и методом, основанным на применении регуляризации решения.

В приближении однократного рассеяния и при азимутальном угле, равном 0, интенсивность свечения сумеречной атмосферы I запишем в виде [4]

$$I_\lambda(\psi, h) = S_\lambda \int_h^\infty \frac{(\beta^a(x) g^a(\psi, x) + \beta^r(x) g^r(\psi))}{\sqrt{((n(x) R(x))^2 - (n(h) R(h))^2)}} e^{-\tau} n(x) R(x) dx, \tag{1}$$

где $\tau = \tau_1(x, h) + \tau_2(x, h)$; $\tau_{(i)}$ – оптические толщты вдоль лучей от солнца до точки рассеяния τ_1 и от точки рассеяния до приемника τ_2 ; S_λ – солнечная постоянная; g^a и g^r – аэрозольная и рэле-евская индикатрисы рассеяния соответственно; β – коэффициент рассеяния; ψ – угол рассеяния; h – высота перигея луча визирования; $R(x) = R_e + x$; R_e – радиус Земли (рис. 1).

Вольц и Гуди вывели формулу, связывающую объемный коэффициент рассеяния $\sigma(h) = \beta^a(h) + \beta^r(h)$ и высоту нижней границы сумеречного слоя h [2]. Они предложили для высот более 10 км считать, что оптическая толща τ_2 определяется главным образом рэлеевским рассеянием, а пропускание $\Pi(h) = e^{-\tau_1(x,h)}$ на участке Солнце – точка рассеяния можно аппроксимировать следующим образом:

$$\Pi(h) = \begin{cases} 0, & h_0 < h, \\ \frac{(h-h_0)}{D}, & h_0 < h < h_0 + D, \\ 1 & h > h_0 + D. \end{cases}$$

Параметры h_0 и D подбирались в модельных расчетах яркости сумеречного горизонта. Предполагая, что

$$\sigma(h) = \sigma(h_0) e^{-(h-h_0)/H(h_0)},$$

уравнение (1) можно легко разрешить относительно $\sigma(h)$. Вольц и Гуди получили, что

$$\sigma(h_0) = \frac{I_\lambda \sin(\varepsilon) e^{\tilde{\tau}} D G^2 [1 - e^{DGq}]^{-1}}{S_\lambda (dh_0/d\delta)^2}, \quad (2)$$

где

$$G = -\frac{1}{I} \frac{dI_0}{d\delta} = \frac{1}{H(h_0)} \frac{dh_0}{d\delta}, \quad \tilde{\tau} = \frac{\tau^r}{\sin(\varepsilon)}, \quad q = \left(\frac{dh_0}{d\delta}\right)^{-1};$$

$H(h_0)$ – шкала высот аэрозоля; δ – угол погружения Солнца; ε – угол наблюдения; τ^r – рэлеевская оптическая толща.

Для того чтобы рассчитывать коэффициент рассеяния $\beta^a(h) = \sigma(h) - \beta^r(h)$ по формуле (2) применительно к спутниковым наблюдениям, во время которых сохраняется угол рассеяния, необходимо построить профиль $D(h)$. Построение легко осуществить итерациями, проводя расчеты яркости рэлеевской атмосферы. Процесс сходится за 3 – 4 шага.

Однако характер решения (2) будет приводить к большому влиянию шумов на восстанавливаемый профиль $\beta^a(h)$. Более устойчивые к шумам решения можно построить, используя методы регуляризации.

Переходя к конечно-разностной аппроксимации, уравнение (1) можно записать в матричной форме:

$$I = \mathbf{A} w, \quad w = g^a \beta^a + g^r \beta^r,$$

или

$$\tilde{I} = \mathbf{B} \beta^a + \xi, \quad (3)$$

где

$$\tilde{I} = I - \mathbf{A}(g^r \beta^r); \quad \mathbf{B} = \mathbf{A} g^a;$$

ξ – погрешность измерений.

В силу геометрии наблюдений часть элементов главной диагонали матрицы \mathbf{A} равна 0. Поэтому решение (3) осуществлялось методом обобщенной невязки [5]. Для уменьшения невязки матрица \mathbf{A} предварительно построчно сглаживалась. Ошибка восстановления определялась по предложенному в [6] методу:

$$\sigma_i = (\sqrt{(\mathbf{F} + \alpha\Omega)^{-1}})_{ii};$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{B}^* \mathbf{W} \mathbf{B}, \quad W_{ij} = \frac{\delta_{ij}}{\omega_i \omega_j}, \quad i = 1, \dots, N,$$

$$j = 1, \dots, N,$$

здесь Ω – стабилизатор 2-го рода; α – неопределенный множитель Лагранжа; ω_j – среднеквадратическая ошибка измерения; N – общее количество узлов в восстанавливаемом профиле.

Восстановление $\beta^a(h)$ по данным моделирования сумеречного зондирования проводилось методами Тихонова и Вольца–Гуди. Расчет I_λ проводился по модельному профилю коэффициента рассеяния, предложенному в [7]. Решение обратной задачи для точных значений I_λ приведено на рис. 2. Восстановление, выполненное по методу Тихонова, приводит к расхождению рассчитанного профиля с заданным профилем $\beta^a(h)$ на 30 % в интервале высот 10 – 50 км. Выше 50 км ошибка восстановления превышает 100%. Метод Вольца–Гуди удовлетворительно восстанавливает коэффициент рассеяния на высотах 10–30 км. Оценка влияния погрешностей измерений на ошибку восстановления производилась моделированием <белого> шума с амплитудой, равной 5% от максимального значения яркости. Горизонтальные отрезки (рис. 2) показывают область ошибок восстановления, рассчитанных по формуле (3). В результате произошло уменьшение интервала удовлетворительного восстановления; 10–35 км для метода Тихонова и 10–25 км для метода Вольца–Гуди, что можно объяснить характером решения (2). Алгоритм Тихонова более устойчив к помехам. Однако при его применении требуется в N раз, как минимум, больше времени на обработку данных, чем при использовании метода Вольца–Гуди.

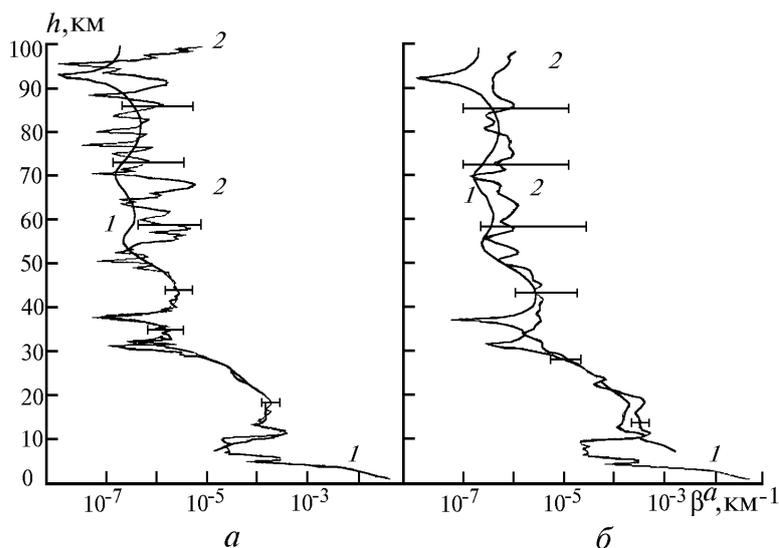


Рис. 2. Исходные (1) и восстановленные (2) коэффициенты рассеяния $\beta^a(h)$; а – метод Тихонова; б – метод Вольца–Гуди

Таким образом, для оперативной обработки данных без строгих требований к точности удовлетворительно работает метод Вольца–Гуди, для получения результатов с более высокой точностью предпочтительнее использовать метод Тихонова.

1. Bigg E. K. // Tellus. 1964. XVI. 1. P. 76–83.
2. Volz F. E., Goody R. M. // J. Atmos. Sci. 1962. V. 19. September. C. 385–408.
3. Розенберг Г. В. // Известия вузов. Сер. ФАО. 1965. Т. 1. N 2. С. 143–158.
4. Соболев В. В. Рассеяние света в атмосферах планет. М.: Наука, 1972. 336 с.
5. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 285 с.
6. Турчин В. Ф., Нозик В. З. // Известия вузов. Сер. ФАО. 1969. Т. V. N 1. С. 29–38.
7. Креков Г. М., Рахимов Р. Ф. Оптико-локационная модель континентального аэрозоля. Новосибирск: Наука, 1982. 200 с.

S. V. Loginov. Errors at Reconstructing the Vertical Profile of Aerosol Scattering Coefficients from Remote Sensing the Earth Twilight Atmosphere.

By means of numerical simulation, the comparison of Tikhonov and Volz – Goody methods is made as applied to reconstructing the aerosol scattering coefficient from data of satellite remote sensing the twilight atmosphere of the Earth. The Tikhonov method is shown to provide lesser divergence between initial and reconstructed profiles. The reconstructed profiles are also shown to be more stable to random errors artificially entered into the initial data.