

Б.П. Иваненко

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АПРИОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРНОГО ОЗОНА

На основе метода логарифмической производной предлагается алгоритм восстановления профилей концентрации атмосферного озона по данным двухволнового зондирования, использующий априорную информацию в виде задания модельного профиля концентрации озона. В численных экспериментах исследуются эффективность и точностные характеристики предложенного алгоритма и приводится его сравнение с используемыми ранее методами интерпретации оптико-локационных данных.

В работе [1] для интерпретации данных двухволнового лазерного зондирования атмосферного озона был предложен метод логарифмической производной (МЛП), математическая формулировка которого выглядит следующим образом:

$$\rho_{\alpha}(z) = (2\Delta\sigma(z, \Delta\lambda))^{-1} d \ln U^{\alpha}(z, \Delta\lambda_0 / dz + \Delta\tilde{\rho}(z, \Delta\lambda), \quad (1)$$

где $\Delta\sigma(z, \Delta\lambda) = \sigma(z, \lambda_1) - \sigma(z, \lambda_2)$ — дифференциальный массовый коэффициент поглощения озона; $\Delta\tilde{\rho}(z, \Delta\lambda)$ — некоторые поправки к восстанавливаемой плотности; $U^{\alpha}(z, \Delta\lambda)$ — регуляризованный дифференцируемый аналог отношения лидарных сигналов $U(z, \Delta\lambda) = U(z, \lambda_1)/U(z, \lambda_2)$, полученный на основе метода Тихонова путем решения соответствующей вариационной задачи. При этом процесс перехода от профиля $U(z, \Delta\lambda)$ к $U^{\alpha}(z, \Delta\lambda)$ следует понимать как процедуру фильтрации и выделения регулярной (дифференцируемой) компоненты в принимаемых на фоне случайных помех локационных сигналах [2].

Согласно [3] искомая функция $U(z, \Delta\lambda) = d \ln U(z, \Delta\lambda) / dz$ может быть определена путем решения операторного уравнения

$$Ku = f, \quad (2)$$

где K — оператор дифференцирования; f — вектор правой части, содержащий погрешности эксперимента δ . При этом согласно [1–3] сглаживающий функционал строился следующим образом:

$$T_{\alpha}[u] = \|Ku - f\|_{L_2}^2 + \alpha \|u\|_{W_2^1}^2, \quad (3)$$

где $\|u\|_{W_2^1}^2 = \int [u^2(z) + (u'(z))^2] dz$, а соответствующее (3) уравнение Эйлера для определения элемента u_{α} , на котором достигается минимум сглаживающего функционала, имело вид

$$(K^*K + \alpha D_2) u_{\alpha} = K^*f, \quad (4)$$

где под D_2 подразумевается конечно-разностная аппроксимация стабилизирующего оператора.

В данной работе предлагается использовать при построении сглаживающего функционала (3) априорную информацию об искомом решении $u(z)$ в виде задания модельного профиля логарифмической производной отношения лидарных сигналов $u_{\text{мод}}(z) = 2\Delta\sigma(z, \Delta\lambda) \rho_{\text{мод}}(z)$, где $\rho_{\text{мод}}(z)$ — некоторый среднестатистический профиль вертикального распределения озона (например, модель Крюгера).

Целесообразность подобного подхода обусловлена спецификой вертикальной стратификации (наличием ярко выраженных максимумов и минимумов) и относительно слабой изменчивостью атмосферного озона. В данном случае функционал (3) принимает вид

$$T_{\alpha}[\Delta u] = \|K\Delta u - \Delta f\|_{L_2}^2 + \alpha \|\Delta u\|_{W_2^1}^2, \quad (5)$$

а уравнение Эйлера запишется следующим образом:

$$(K^*K + \alpha D_2)\Delta u_{\alpha} = K^*\Delta f, \quad (6)$$

где $\Delta u = u - u_{\text{мод}}$, $\Delta f = K(u - u_{\text{мод}})$. И, наконец, в простейшем случае, когда информация о «гладкости» решения отсутствует, сглаживающий функционал следует строить, исходя из минимума отклоне-

ния решения от модельного. При этом

$$T_\alpha[\Delta u] = \|K\Delta u - \Delta f\|_{L_2}^2 + \alpha \|\Delta u\|_{L_2}^2 \quad (7)$$

и уравнение Эйлера для функционала (7) принимает вид

$$(K^*K + \alpha I)\Delta u_\alpha = K^*\Delta f, \quad (8)$$

где I — единичный оператор.

Для сравнительного анализа эффективности вычислительных схем (4, 6, 8) автором была проведена серия численных экспериментов, в которых исследовалось влияние выбора априорной модели на точность восстановления $\rho(z)$, помехоустойчивость алгоритма восстановления к наличию случайных ошибок измерений и оценивались разрешающие возможности метода по концентрации в зависимости от вида искомого профиля $\rho(z)$ и уровня погрешностей эксперимента. Согласно рекомендациям работы [1] при расчетах $U(z, \Delta\lambda)$ λ_1 и λ_2 выбирались равными 308 и 315 нм, $\Delta\sigma(z, \Delta\lambda) = 1,3_{10} - 19 \text{ см}^2$ (подробное описание эксперимента см. в [3]).

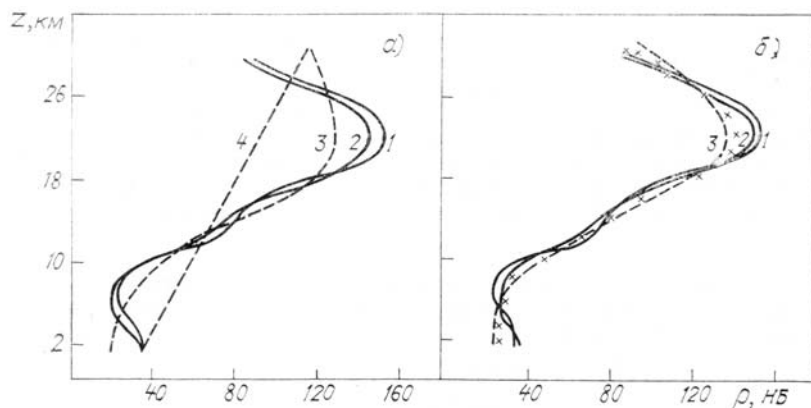


Рис. 1. Восстановление модельного профиля концентрации озона в интервале высот 1–30 км: а) 1 — точные значения $\rho_M(z)$, 2 — профиль Крюгера $\rho_K(z)$, 3 — восстановленные по схеме (8) значения $\rho_{M\alpha}(z)$ при $\delta = 10\%$, 4 — априорный профиль $\rho_\Pi(z) = \rho_\Pi(z_1) - z \cdot \Delta\rho$; б) 1 — точные значения $\rho_M(z)$, 2 — восстановленные по схеме (6) значения $\rho_{M\alpha}(z)$ при использовании профиля Крюгера в качестве априорной модели и $\delta = 10\%$, крестики — восстановленные по схеме (6) значения $\rho_{M\alpha}(z)$ при использовании профиля $\rho_\Pi(z) = \rho_\Pi(z_1) - z \cdot \Delta\rho$ в качестве априорной модели и $\delta = 10\%$, 3 — восстановленные по схеме (4) значения $\rho_{M\alpha}(z)$ без привлечения априорной информации при $\delta = 10\%$

Обратимся к обсуждению результатов численного эксперимента. На рис. 1, 2 приводятся результаты восстановления среднестатистического сезонного профиля концентрации атмосферного озона $\rho_M(z)$ (профили 1), полученного В.М. Михайловым при обработке ряда наблюдений одной из станций озонзондирования [5]. Восстановление профиля $\rho_M(z)$, изображенного на рис. 1, кривая 1, осуществлялось в интервале высот 0–30 км по 16 точкам с разрешением 2 км по вертикали и при уровне относительной погрешности δ в определении $U(z, \Delta\lambda)$ порядка 10%. В свою очередь, восстановление этого же профиля $\rho_M(z)$, приведенного на рис. 2 (профили 1), производилось в интервале высот 10–30 км по 21 точке с разрешением 1 км по вертикали при прочих равных условиях. В обоих случаях в качестве априорного профиля $\rho_{\text{мод}}(z)$ использовалась модель Крюгера $\rho_K(z)$ вертикального распределения озона (кривые 2 на рис. 1, б и рис. 2, б), а также простейшая априорная модель вида $\rho_\Pi(z) = \rho_\Pi(z_1) - z \cdot \Delta\rho$ (прямые 4 на рис. 1, а и рис. 2, а). Результаты восстановления $\rho_M(z)$ по схеме (6) с использованием в качестве априорной модели профиля Крюгера $\rho_K(z)$ приведены на рис. 1, б и рис. 2, б (кривые 2). Здесь же нанесены восстановленные значения $\rho_{M\alpha}(z)$, полученные по схеме (4), т.е. без привлечения априорной информации (кривые 3), и, наконец, крестиками обозначены значения $\rho_{M\alpha}(z)$, полученные по схеме (6), но с использованием априорной модели $\rho_\Pi(z) = \rho_\Pi(z_1) - z \cdot \Delta\rho$. В свою очередь, кривые 3 на рис. 1, а и рис. 2, а иллюстрируют возможности вычислительной схемы (8) при использовании профиля Крюгера в качестве априорной модели. Сравнивая полученные результаты восстановления $\rho_M(z)$, можно сделать вывод, что применение вычислительной схемы (6) во всех случаях дает ощутимое преимущество при восстановлении профилей концентрации атмосферного озона по данным двухволнового зондирования. Для оценки разрешающих возможностей двухволнового метода и предложенного алгоритма интерпретации оптико-локационных данных автором на основе результатов, приведенных в [6], была построена простейшая модель вертикального распределения озона $\bar{\rho}(z)$, характеризующаяся наличием ярко выраженного максимума концентрации озона в районе тропопаузы (кривые 1 на рис. 3, а и 3, б). Восстановление $\bar{\rho}(z)$

осуществлялось в интервале высот 10–30 км по 21 точке с разрешением 1 км по вертикали. В качестве априорного профиля использовалась модель Крюгера $\rho_k(z)$ (кривая 2 на рис. 3,а). Кривая 3 на рис. 3,а соответствует восстановленным по схеме (8) значениям $\bar{\rho}_\alpha(z)$ при $\delta = 10\%$, на рис. 3,б профиль 2 восстановлен с использованием вычислительной схемы (6) при $\delta = 10\%$, а профиль 3 — при $\delta = 3-5\%$. Профиль 4 рассчитан по схеме (4) без привлечения априорной информации. Можно отметить, что, как и в предыдущем случае, схема (6) оказалась наиболее эффективной, однако восстановление небольших неоднородностей в вертикальном распределении озона возможно лишь при достаточно малом уровне экспериментальной погрешности порядка 3–5%. В противном случае удается восстановить лишь некий «заглаженный» профиль (кривая 3 на рис. 3,б).

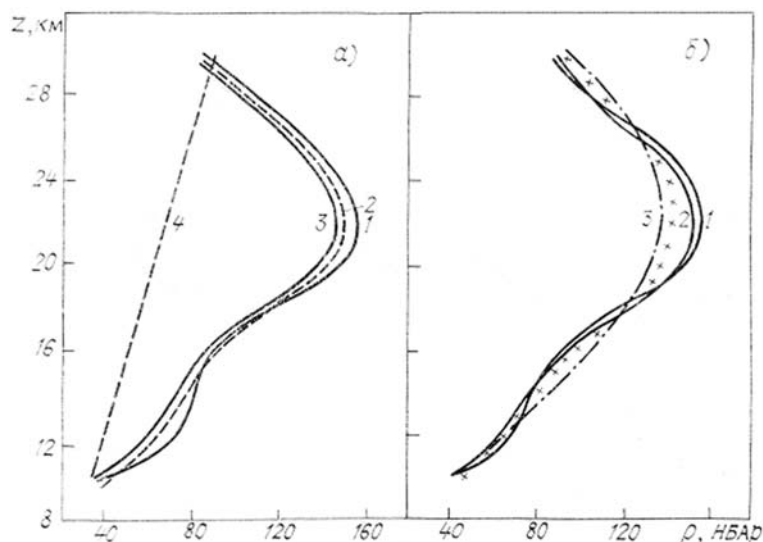


Рис. 2. Восстановление модельного профиля концентрации озона в интервале высот 10–30 км: (а) 1 — точные значения $\rho_m(z)$, 2 — профиль Крюгера $\rho_k(z)$, 3 — восстановленные по схеме (8) значения $\rho_{m\alpha}(z)$ при $\delta = 10\%$, 4 — априорный профиль $\rho_n(z) = \rho_n(z_1) - z \cdot \Delta\rho$; (б) 1 — точные значения $\rho_m(z)$, 2 — восстановленные по схеме (6) значения $\rho_m(z_{m\alpha})$ при использовании профиля Крюгера в качестве априорной модели и $\delta = 10\%$, крестики — восстановленные по схеме (6) значения $\rho_{m\alpha}(z)$ при использовании профиля $\rho_n(z) = \rho_n(z_1) - z \cdot \Delta\rho$ в качестве априорной модели и $\delta = 10\%$, 3 — восстановленные по схеме (4) без привлечения априорной информации значения $\rho_{m\alpha}(z)$ при $\delta = 10\%$

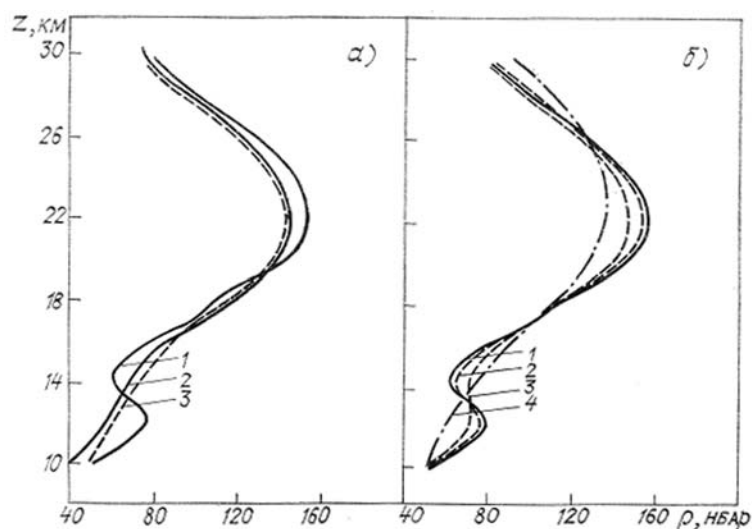


Рис. 3. Восстановление модельного профиля концентрации озона: (а) 1 — точные значения $\bar{\rho}(z)$, 2 — профиль Крюгера $\rho_k(z)$, 3 — восстановленные по схеме (8) значения $\rho_\alpha(z)$ при $\delta = 10\%$, 4 — априорный профиль $\rho_n(z) = \rho_n(z_1) - z \cdot \Delta\rho$. (б) 1 — точные значения $\bar{\rho}(z)$, 2 — восстановленные по схеме (6) значения $\rho_\alpha(z)$ при использовании профиля Крюгера в качестве априорной модели и $\delta = 10\%$, 3 — восстановленные по схеме (6) значения $\rho_\alpha(z)$ при использовании профиля Крюгера в качестве априорной модели и $\delta = 3-5\%$, 4 — восстановленные по схеме (4) без привлечения априорной информации значения $\rho_\alpha(z)$ при $\delta = 10\%$

В заключение отметим, что предложенная схема интерпретации данных лазерного зондирования атмосферного озона с использованием априорной информации в виде задания модельного профиля $\rho_{\text{мод}}(z)$ реализована в виде комплекса программ на языке ПАСКАЛЬ для ЭВМ ЕС 1055 и микро-ЭВМ серии «Электроника» и может быть использована в системах оперативной обработки опτικο-локационных данных.

1. Иваненко Б. П., Смирнов Н. Д. // В кн.: VII Всес. симпозиум по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Томск: ИОА СО АН СССР. 1982. Ч. II. С. 82–85.
2. Зуев В. Е., Иваненко Б. П., Наац И. Э. Исследование Земли из космоса. 1985. № 5. С. 117.
3. Ivanenko B. P., Naats I. E. // Opt. Lett. 1981. V. 6. № 7. P. 305–307.
4. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука. 1979. 283 с.
5. Комаров В. С., Михайлов С. А., Ромашов Д. Н. // В кн.: Всес. симпозиум по фотохимическим процессам земной атмосферы. Черногловка: ОИХФ АН СССР. 1986. С. 168–169.
6. Перов С. П., Хргиан А. Х. Современные проблемы атмосферного озона. Л.: Гидрометеоиздат. 1980. 287 с.

Институт оптики атмосферы
СО АН СССР, Томск

Поступила в редакцию
6 апреля 1988 г.

B. P. Ivanenko. On the Use of a Priori Information for Interpreting Laser Sounding Data on Atmospheric Ozone.

A computational algorithm for retrieving atmospheric ozone density from a double-wavelength laser sounding data is proposed. The procedure is based on the logarithmic derivative technique and makes use of a priori information in the form of a model ozone concentration profile. The numerical simulation results on the efficiency and accuracy provided by the algorithm are reported and compared with the available methods of interpreting laser sensing data.