

А.В. Ельников, В.В. Зуев, М.Ю. Катаев, В.Н. Маричев, А.А. Мицель

ЗОНДИРОВАНИЕ СТРАТОСФЕРНОГО ОЗОНА ДВУХВОЛНОВЫМ УФ-ДП-ЛИДАРОМ: МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ И РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Рассмотрены три метода обращения лидарных озоноданных, основанных на сглаживающих сплайн-функциях, регуляризации и оптимальной параметризации. Показано, что метод регуляризации не эффективен при числе стробов более 15. Впервые исследована возможность использования метода оптимальной параметризации для обработки лидарных озоноданных. Приведены результаты анализа лидарных эхосигналов, полученных из стратосферы над г. Томском.

Введение

Несмотря на то, что лазерное зондирование стратосферного озона с помощью двухволнового УФ-ДП-лидара проводится разными группами уже около 10 лет [1–4], проблема достоверности обращения лидарных данных остается еще открытой.

Определение вертикального профиля содержания озона из лидарных эхосигналов, полученных с помощью двухволнового лидара, сводится к задаче дифференцирования функции $f(z)$:

$$f(z) = \frac{1}{2} \ln \frac{U_{\text{of}}(z)}{U_{\text{on}}(z)} + \psi(z); \quad (1)$$

$$\psi(z) = \frac{1}{2} \ln \frac{\beta_{\text{on}}(z)}{\beta_{\text{of}}(z)} - (\tau_{\text{on}}(z) - \tau_{\text{of}}(z)),$$

где $U_{\text{of}}(z)$, $U_{\text{on}}(z)$ – зарегистрированные с высоты z эхосигналы на длинах волн λ_{of} и λ_{on} ; $\beta_{\text{of}}(z)$, $\beta_{\text{on}}(z)$ – коэффициенты обратного рассеяния на длинах волн λ_{of} и λ_{on} ; $\tau_{\text{of}}(z)$, $\tau_{\text{on}}(z)$ – оптические толщи молекулярного рассеяния и аэрозольного ослабления.

В выражении (1) предполагается, что $U_{\text{of}}(z)$, $U_{\text{on}}(z)$ очищены от сигналов фонового излучения атмосферы. Функция $\psi(z)$ задается из модельных представлений, либо определяется из независимого эксперимента.

Концентрация озона определяется как

$$\rho(z) = \frac{1}{2\Delta K(z)} \Phi(z), \quad (2)$$

где $\Phi(z)$ – регуляризованный аналог производной $f'(z)$ функции $f(z)$; ΔK – дифференциальное сечение поглощения O_3 .

Известно [5], что задача дифференцирования экспериментальной информации относится к классу некорректно поставленных задач. Некорректность проявляется в нарушении устойчивости решения [6], а именно, небольшие погрешности в исходных данных могут приводить к большим ошибкам в решении (решение «разбалтывается»), а в ряде случаев к появлению отрицательных значений концентрации газа.

В настоящее время для решения задачи (1) используют различные методы [7–17]. В данной статье предпринята попытка детального сравнения трех методов обращения функции $f(z)$: метода сплайн-функции [7–8], метода регуляризации Тихонова [11–16] и метода оптимальной параметризации. Третий метод ранее не использовался для обработки лидарных озоноданных, поэтому в статье исследуется возможность и условия применения этого метода.

1. Метод сплайн-функции

Этот метод основан на предварительном сглаживании функции $f(z)$ и последующем дифференцировании сглаженной функции. Впервые этот метод начал применяться для обработки лидарных данных зондирования паров H_2O [7–8]. Для сглаживания использовался кубический сплайн [18]. Методика построения сглаживающего сплайна подробно изложена в различных монографиях (см., например, [19]), поэтому здесь мы приведем вкратце лишь основные соотношения.

Пусть функция $f(z)$ задана своими измеренными значениями $f(z_i) = f_i$ в узлах сетки z_i : $a = z_1 < z_2 < \dots < z_{n-1} < z_n = b$. Сглаживающий кубический сплайн $S_{n,\alpha}$ является решением вариационной задачи

$$F_\alpha = \inf \left\{ \alpha \int_a^b [S''(z)]^2 dz + \sum_{i=1}^n p_i [f_i - S_i]^2 \right\}; \quad (3)$$

$$S(z) \in C^2[a, b]$$

и представляется на каждом из отрезков $h(i) = z_{i+1} - z_i$, полиномом третьей степени

$$S_{n\alpha} = a_i + b_i(z - z_i) + c_i(z - z_i)^2 + d_i(z - z_i)^3 \quad (4)$$

с непрерывными производными $S'_{n\alpha}(z)$ и $S''_{n\alpha}(z)$.

Коэффициенты сплайна a, b, c, d выражаются через элементы вектора вторых производных $M_{i+1} = \{m\}_i$, который является решением системы линейных уравнений

$$(\alpha HP^{-1}H^T + A)m = Hf \quad (5)$$

с граничными условиями $M_1 = M_n = 0$.

Здесь α — скалярная величина ($\alpha > 0$), имеющая смысл параметра сглаживания. Компоненты матриц H, A выражаются через элементы последовательности $h(i) = z_{i+1} - z_i$:

$$A_{i,i} = (h_i + h_{i+1})/3, \quad i = 1, \dots, n-2;$$

$$A_{i,i+1} = A_{i+1,i} = h_{i+1}/6, \quad i = 1, \dots, n-3;$$

$$H_{i,i} = 1/h_i; \quad H_{i,i+1} = -(1/h_i + 1/h_{i+1}), \quad i = 1, \dots, n-2;$$

$$H_{i,i+2} = 1/h_{i+1}, \quad i = 1, \dots, n-2;$$

P — диагональная матрица: $P = \text{diag}\{p_1, \dots, p_n\}$.

Система (5) с симметричной положительно определенной пятидиагональной $(n-2) \times (n-2)$ матрицей имеет единственное решение и вычисляется методом прогонки [18]. После нахождения элементов вектора $\{m\}_i = M_{i+1}, i = 1, \dots, n-2$ коэффициенты сплайна $S_{n\alpha}(z)$ определяются из соотношений [19]:

$$a_i = f_i - \{\alpha F^{-1}H^T m\}_i, \quad i = 1, \dots, n;$$

$$b_i = (a_{i+1} - a_i)/h_i - h_i(2M_i + M_{i+1})/6, \quad i = 1, \dots, n-1;$$

$$c_i = M_i/2, \quad d_i = (M_{i+1} - M_i)/6h_i, \quad i = 1, \dots, n-1.$$

Точность построения сплайна $S_{n\alpha}(z)$ существенно зависит от значения α параметра сглаживания. В настоящее время созданы различные критерии поиска α [19]. Здесь мы используем три критерия: оптимальный, статистический принцип невязки и критерий невязки. Все перечисленные критерии предполагают знание ошибки измерения функции $f(z)$, при этом первые два критерия требуют информации об ошибках измерения в каждом узле z_i , третий критерий — среднюю ошибку для всего диапазона $[z_1, z_n]$. Существует также критерий выбора α при неизвестной матрице шума измерения [8, 19].

Дальнейшее развитие метода сплайн-функций применительно к решению задачи (1) получило в работе [10], в которой предложен способ построения дескриптивных кубических сплайнов. Преимущество этого подхода заключается в возможности привлечения априорной информации о $f'(z)$ в форме неравенств (например, $f'(z) > 0$).

2. Метод регуляризации

Метод регуляризации Тихонова для обработки лидарных данных впервые был применен в работе [11] при решении задачи зондирования влажности тропосферы. В дальнейшем авторы [12–15] предложили обрабатывать сигналы раздельно для каждой длины волны. Применительно к решению задачи (1) методика вычисления производной $\Phi(z) = f'(z)$ имеет вид [14, 15]:

$$\Phi(z) = \frac{1}{2} [(\ln U_{\text{of}}(z))' - (\ln U_{\text{on}}(z))'] + \psi'(z), \quad (6)$$

где в качестве $(\ln U_{\text{of}}(z))'$ и $(\ln U_{\text{on}}(z))'$ используются их регуляризованные аналоги, полученные из решения уравнения Фредгольма 1 рода. Такой подход, несмотря на увеличение машинного времени счета вдвое, может оказаться эффективным при обработке сигналов, полученных в режиме накопления раздельно на длине волны λ_{of} и λ_{on} . В нашей задаче мы полагаем одновременное накопление сиг-

налов на двух длинах волн и поэтому в качестве обрабатываемой функции используется $f(z)$, связанная с измеренными эхосигналами соотношением (1).

Регуляризованное решение $\Phi(z) = f'(z)$ для задачи (1) определяются из уравнения Фредгольма 1-го рода:

$$\int_a^b K(x, z) \Phi(z) dz = g(x); \quad (7)$$

$$g(x) = \int_x^b f(y) dy - f(a)(b - x); \quad (8)$$

$$K(x, z) = \begin{cases} b - x, & x \geq z \\ b - z, & x < z. \end{cases} \quad (9)$$

Переход к алгебраизованной форме (7) проведем для равномерной сетки с шагом $h = z_{i+1} - z_i$. В качестве численной квадратуры используется формула прямоугольников со смещенной на $h/2$ сеткой. В матричном виде алгебраизованный аналог имеет вид

$$K_\Phi = g, \quad (10)$$

где $K - (n-1)(n-1)$ – матрица с элементами:

$$K(x, z) = \begin{cases} b - a - h(i - 0.5), & i \geq j \\ b - a - h(j - 0.5), & i < j, \end{cases}$$

$\Phi - (n-1)$ -мерный вектор производной $f'(z)$, заданный в узлах сетки $z_i + h/2$; $g - (n-1)$ -мерный вектор правой части, определенный в узлах смещенной сетки.

Регуляризованное решение задачи (10) с использованием стабилизатора первого порядка записывается в форме [6]:

$$\Phi_\alpha = (K^T K + \alpha B)^{-1} K^T g, \quad (11)$$

где B – конечномерный аналог производной стабилизатора, имеющий вид трехдиагональной $(n-1) \times (n-1)$ матрицы с элементами:

$$B_{11} = p_1 + q_1/h^2; \quad B_{n-1, n-1} = p_{n-1} + q_{n-1}/h^2;$$

$$B_{ii} = p_i + (q_{i+1} + q_i)/h^2, \quad i = 2, \dots, n-2;$$

$$B_{i, i+1} = B_{i+1, i} = -q_i/h^2, \quad i = 1, \dots, n-1;$$

где p_i, q_i – значения весовых функций $p(z), q(z)$ в узлах сетки z_i .

В уравнение (11) входит неизвестный параметр α (параметр регуляризации). Выбор параметра α осуществляется в данной статье по одному из двух критериев: по невязке либо по статистической невязке.

3. Метод оптимальной параметризации

Этот метод широко применяется при решении задач спутникового зондирования атмосферы (см., например [21]). Рассмотрим возможности его применения в задаче лидарного зондирования озона.

Представим искомую функцию $\Phi(z) = f'(z)$ в виде:

$$\Phi(z) = \bar{\Phi}(z) + \tilde{\Phi}(z), \quad (12)$$

где $\bar{\Phi}(z)$ – среднее значение функции, полученное по многолетним данным; $\tilde{\Phi}(z)$ – отклонение от среднего значения.

Подставим (12) в уравнение (7), получим

$$\int_a^b K(x, z) \tilde{\Phi}(z) dz = \tilde{g}(x); \quad (13)$$

$$\tilde{g}(x) = g(x) - \int_a^b K(x, z) \Phi(z) dz. \quad (14)$$

Искомой функцией здесь является $\tilde{\Phi}(z)$. В качестве $\tilde{\Phi}(z)$ может быть использовано регуляризованное решение (11) с правой частью $\tilde{g}(x)$. Такой подход использовался в работе [16], в которой за $\bar{\Phi}(z)$ был взят профиль: $K_{O_3}(z)\bar{\rho}(z)$ модели Крюгера, где K_{O_3} — сечение поглощения озона; $\rho(z)$ — средний профиль озона.

Однако решение $\tilde{\Phi}(z)$ может быть найдено другим путем. Предположим, что кроме среднего $\bar{\Phi}(z) = K_{O_3}(z)\bar{\rho}(z)$ известны также эмпирические собственные вектора озона $t_k(z)$, $k = 1, \dots, m$. Разложим $\Phi(z)$ в ряд по системе $t_k(z)$:

$$\tilde{\Phi}(z) = K_{O_3}(z) \sum_{k=1}^m b_k t_k(z). \quad (15)$$

Оптимальная параметризация заключается в том, что при заданном числе собственных векторов $t_k(z)$ эта система обеспечивает минимальную дисперсию остаточного члена разложения по сравнению с любой другой ортонормированной системой функций [20]. На практике, как правило, используют первые собственные векторы, соответствующие максимальным собственным числам. Так, для профиля влажности достаточно использовать 2–3 первых собственных вектора, при этом остаточная дисперсия составляет <10% [21]. Для озона необходимо в (15) подставить 6–8 векторов, чтобы обеспечить дисперсию остаточного члена $\approx (5-8)\%$ [22, 23], т.е. из m векторов достаточно взять $\tilde{m} = 6-8$ векторов $t_k(z)$.

Подставим (15) в уравнение (13) и получим следующую систему линейных уравнений для нахождения неизвестных коэффициентов b_k

$$\sum_{k=1}^{\tilde{m}} R_{ik} b_k = \tilde{g}_i, \quad (16)$$

где

$$R_{ik} = \sum_{j=1}^{n-1} K_{ij} t_k(j), \quad k = 1, \dots, \tilde{m}.$$

Решение (16), полученное методом наименьших квадратов, записывается в виде

$$b = (R^T R)^{-1} R^T \tilde{g}. \quad (17)$$

Здесь мы имеем систему линейных уравнений из \tilde{m} неизвестных. Вычислив из (17) коэффициенты b_k , по формулам (15) и (12) восстанавливаем $\Phi(z)$.

Следует отметить, что использование метода оптимальной параметризации не гарантирует устойчивости решения обратной задачи. Поэтому наряду с (17) рассматривалось также регуляризованное решение

$$b^\alpha = (R^T R + \alpha I)^{-1} R^T \tilde{g} \quad (18)$$

с незначительным искажением матрицы системы ($\alpha = 10^{-6}$), что позволяло получать устойчивое решение во всех численных экспериментах при уровне шума $\delta \leq 0,1$.

4. Численный эксперимент

На первом этапе моделирования проведем сравнение метода сплайн-функций и метода регуляризации. Для моделирования была выбрана функция вида

$$\Phi(x) = \exp\{-\ln(2) \left((x - 0.5)/0.25 \right)^2\}$$

с помощью которой затем вычислялась функция $f(z) = \int_0^z \Phi(x) dx$. Для имитации шума измерения значения функции $f(x)$ в узлах z_i , $i = 1, \dots, n$ искажались датчиком нормальных случайных чисел с дисперсией, равной $\sigma_i^2 = \delta^2 \cdot f_i^2$, где δ — относительная погрешность (шум измерения).

Рассмотрим результаты численных экспериментов по сравнению решений $\Phi_{\text{сп}}$, $\Phi_{\text{рег}}$, полученных с помощью кубического сглаживающего сплайна (сп) и методом регуляризации Тихонова (рег). Параметр сглаживания и параметр регуляризации в обоих методах определялся по критерию статистической невязки. Количество узлов n изменялось от 10 до 40.

На рис. 1 приведены результаты восстановления $\Phi_{\text{сп}}$ (кривая 2) и $\Phi_{\text{рег}}$ (кривая 3) для различного количества узлов при уровне шума $\delta = 0$ и $\delta = 1\%$. Для сравнения здесь же дано точное решение Φ (кривая 1). С увеличением числа узлов и погрешность восстановления $\Phi_{\text{рег}}$ возрастает в значительно

большей степени, чем погрешность $\Phi_{\text{сп}}$. Так, при числе узлов $n = 30$ даже при нулевом уровне шума наблюдается «рябь» в решении $\Phi_{\text{рег}}$ (рис. 1, в), а при $n = 40$ решение $\Phi_{\text{рег}}$ «разбалтывается» (рис. 1. з).

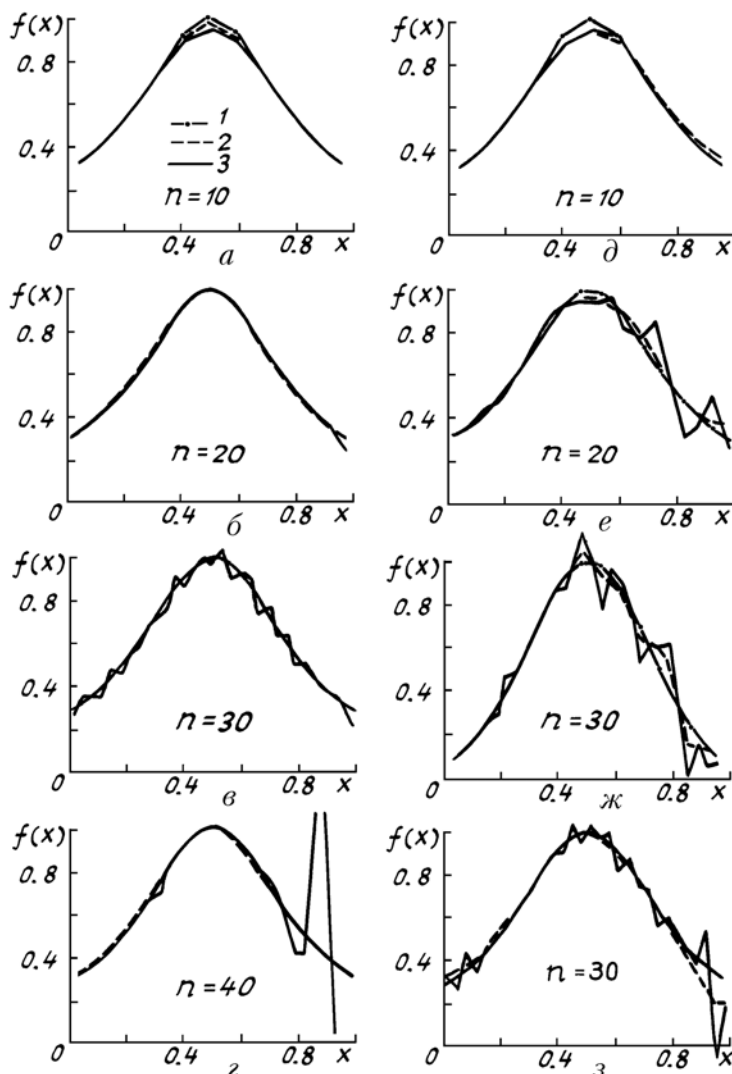


Рис. 1. Сравнение восстановления модельной функции сплайнами и методом регуляризации: 1 – точная функция; 2 – восстановление методом сплайн-функций; 3 – восстановление методом регуляризации; а–г – ошибка 0%, д–ж – 1%, з – 10%

Попытка улучшить решение $\Phi_{\text{рег}}$ путем изменения величины α не приводит к ожидаемому результату. Одним из способов улучшения решения $\Phi_{\text{рег}}$, вероятно, является усовершенствование алгоритма либо использование ЭВМ большей разрядности (мы использовали ЭВМ РС/АТ-286). Другой путь улучшения решения $\Phi_{\text{рег}}$ заключается в изменении весовых функций $p(x)$ и $q(x)$ в матрице B (см. (11)). В нашем численном эксперименте эти функции задавались единичными. На практике целесообразнее всего восстанавливать $\Phi_{\text{рег}}$ на более редкой «сетке», такой, чтобы число узлов, в которых находится решение, не превосходило 15. Как видно из рис. 1, а также из результатов моделирования при различном уровне шума, решение $\Phi_{\text{сп}}$ находится устойчиво для любого количества узлов и уровня шума до 5%.

При моделировании было проведено исследование влияния модели шума на устойчивость решения. Наряду с «нормальным» шумом мы моделировали возмущение функции $f(z)$ периодическим шумом (знакопеременным). На рис. 1, з представлен один из примеров восстановления $\Phi_{\text{сп}}$ и $\Phi_{\text{рег}}$ для $n = 30$ при знакопеременном шуме в 10%. Видно, что $\Phi_{\text{сп}}$ устойчиво, а $\Phi_{\text{рег}}$ начинает «разбалтываться» в последних трех точках. Заметим, что периодический шум гораздо лучше фильтруется, чем обычный нормальный шум. Следствием этого является получение устойчивого решения $\Phi_{\text{сп}}$ и $\Phi_{\text{рег}}$ даже при уровне шума 30%.

Перейдем к моделированию возможностей метода оптимальной параметризации. Для этого воспользуемся статистической информацией о среднем содержании озона $P_{\text{O}_3}(z)$ и матрице ковариации $C_{\text{O}_3}(z, z')$, полученной в ИОА [23] по радиозондовым данным станции Гус-Бей. По исходной матрице C_{O_3} были построены собственные векторы $t_k(z)$ и вычислены собственные числа μ_k , $k = 1, \dots, 27$.

Моделирование обратной задачи проводилось по следующей схеме:

1) С помощью датчика случайных чисел с параметрами $(0, \mu_k)$ моделировались коэффициенты $b_k, k = 1, \dots, 27$.

2) По формуле вида (15) рассчитывалась случайная составляющая профиля давления озона $O_3(z)$ и далее вычислялся случайный профиль озона $P_{O_3}(z) = \tilde{P}_{O_3}(z) + P_{O_3}(z)$.

3) Для длины волны $\lambda = 308$ нм рассчитывался объемный коэффициент поглощения озона $\Phi(z) = K_{O_3} P_{O_3}(z)$, где K_{O_3} — коэффициент поглощения озона, равный $3,86 - 4 \text{ км} \cdot \text{нбар}^{-1}$ [24].

4) Рассчитывалась оптическая толщина $f(z) = \int_0^z \Phi(y) dy$.

5) Полученные значения $f(z_i)$ в узлах z_i искажались датчиком случайных чисел для имитации шума измерения. Таким образом, на этом этапе моделирования в качестве измеренной функции принималась

$$\tilde{f}(z) = f(z) + \xi(z),$$

где ξ — случайная составляющая.

6) Формировалась функция

$$\tilde{g}(z) = g(x) - \int_a^b K(x, z) \bar{F}(z) dz,$$

где $\bar{F}(z) = K_{O_3} \cdot \bar{P}_{O_3}(z)$. Сетка по переменным x и z бралась равномерной с шагом 0,5 км.

7) Решалась обратная задача (18) относительно b_k^α и восстанавливался профиль

$$\Phi_{\text{он}}(x) = \bar{\Phi}(z) + K_{O_3}(z) \sum_{k=1}^8 b_k^\alpha t_k(z).$$

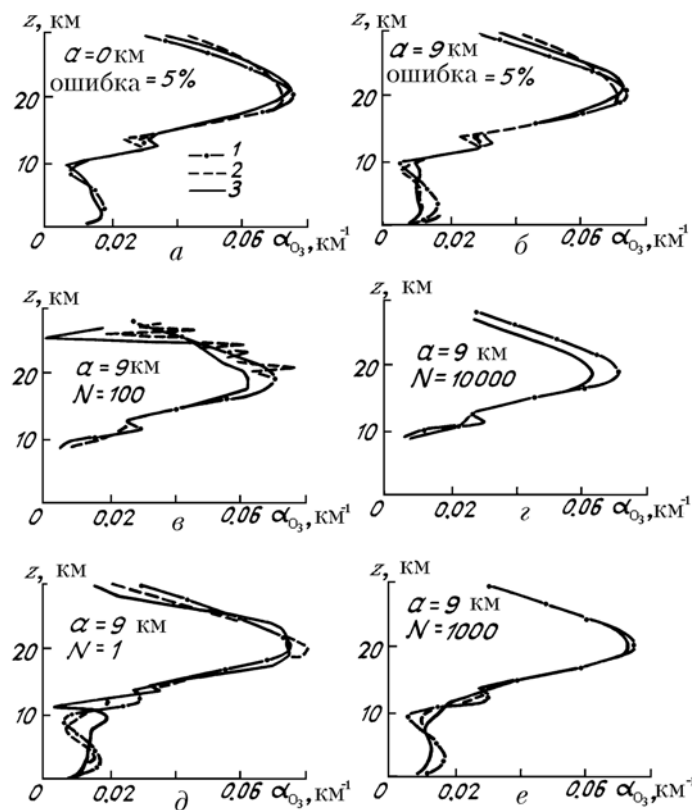


Рис. 2. Результаты решения обратной задачи различными методами: *a, б* — восстановление профиля α_{O_3} методом оптимальной параметризации по «своей» (кривая 2) и «чужой» системе собственных векторов (кривая 3). В качестве «измеренной» функции принималась оптическая толщина. Кривая 1 — точное решение; *в–е* — восстановление α_{O_3} из модельных эхосигналов; *в, з* — метод сплайн-функций (кривая 2) и метод регуляризации (кривая 3); *д, е* — метод оптимальной параметризации

На практике, как правило, статистическая информация о высотных корреляционных связях озона в географическом пункте расположения лидара неизвестна. Поэтому несомненный интерес пред-

ставляет исследование возможностей метода оптимальной параметризации не только со «своей», но и с «чужой» системой собственных векторов. В качестве «чужой» системы собственных векторов для станции Гус-Бей была взята статистическая модель озона средних широт [25].

На рис. 2, *a*, *б* представлены результаты восстановления $\Phi_{\text{он}}(z)$ для случая «своей» (кривой 2) и случая «чужой» (кривая 3) системы собственных векторов для двух схем эксперимента. На рис. 2, *a* функция $f(z)$ считалась известной для всего диапазона высот от 0 до 30 км ($a = 0$). На рис. 2, *б* нижняя граница по высоте $a = 9$ км, т.е. $f(z)$ «измеряется» в диапазоне высот 9–30 км.

Предложенная схема численного эксперимента с различной нижней границей «*a*» позволяет проанализировать возможность восстановления профиля содержания озона в тропосфере по данным зондирования стратосферного озона. Из рис. 2, *a*, *б* видно, что по данным $f(z)$ в диапазоне высот 9–30 км возможно определить профиль озона во всем диапазоне высот от 0 до 30 км, в то время как информация о $f(z)$ выше 9,5 км (в численном эксперименте наряду с $a = 9$ км рассматривались также границы с $a = 9,5$ км и $a = 10$ км) не позволяет с приемлемой точностью построить профиль озона в тропосфере. Это обусловлено тем, что в слое 9–10 км (ст. Гус-Бей) расположена озонопауза. В слое озонопаузы происходит смена знака корреляции. Для других регионов высота озонопаузы может быть другой.

Третий этап моделирования задачи лидарного зондирования озона проводился на модельных эхосигналах по следующей схеме:

1) Задавались типичные параметры лидарной системы, работающей с ВКР преобразователем излучения 308 нм в излучение 353 нм: $\lambda_{\text{он}} = 308$ нм, $E_0^{\text{он}} = 56$ мДж, $A = 0,785$ м², $\Delta H = 0,4$ км (длина строка), $q_{\text{он}} = q_{\text{оф}} = 8,575 \cdot 10^{-4}$ (эффективная константа лидара, включающая пропускание приемопередающего тракта, квантовый выход ФЭУ, эффективность использования приемной апертуры, пропускание фильтра и другие потери); $\lambda_{\text{оф}} = 353$ нм, $E_0^{\text{оф}} = 20$ мДж. Модели коэффициентов молекулярного рассеяния, аэрозольного ослабления и коэффициентов обратного рассеяния заимствованы из [25]. Коэффициенты поглощения озона на $\lambda_{\text{он}} = 308$ нм, $K_{\text{O}_3} = 1,19 \cdot 10^{-19}$ см² [24].

2) Моделировался случайный профиль озона по данным станции Гус-Бей и оптическая толща озона на длинах волн $\lambda_{\text{он}}$ и $\lambda_{\text{оф}}$ (см. пп. 1–4 второго этапа моделирования).

3) С помощью уравнения лазерной локации в однократном приближении рассеяния рассчитывались эхосигналы $U_{\text{он}}$ и $U_{\text{оф}}$ с шагом по высоте 0,4 км для одного импульса в диапазоне высот 0–30 км.

4) Полученные сигналы искажались случайными числами датчиком с параметрами $(0, U_{\text{он}}/n)$ и $(0, U_{\text{оф}}/n)$, где n – число импульсов.

5) Вычислялась функция $f(z)$ по формуле (1), начиная с высоты 9 км, которая в дальнейшем использовалась в качестве «измеренной» функции.

6) Решалась обратная задача тремя методами, описанными выше, и находились решения $\Phi_{\text{сп}}$, $\Phi_{\text{рег}}$, $\Phi_{\text{он}}$. Решение $\Phi_{\text{он}}$ определялось как по «своей», так и по «чужой» системе собственных векторов, соответствующих среднезональной модели умеренных широт [21].

На рис. 2, *в*, *г* приведено сравнение решений $\Phi_{\text{сп}}$, $\Phi_{\text{рег}}$, $\Phi_{\text{он}}$. На рис. 2, *в*, *г* дано решение $\Phi_{\text{сп}}$ (кривая 2) и $\Phi_{\text{рег}}$ (кривая 3) для 100 и 10 000 импульсов при $a = 9$ км, а также точный профиль коэффициента поглощения озона (кривая 1). Решение $\Phi_{\text{рег}}$ получалось с разрешением $\Delta H = 1,2$ км в 14 точках, хотя сама функция $f(z)$ известна была с разрешением $\Delta H = 0,4$ км в 42 точках в диапазоне высот 9–30 км. Это связано с тем, что при большем количестве узлов, как было показано выше, нарушается устойчивость восстановления искомого функции методом регуляризации. Как видно из рисунков, для уверенного восстановления профиля озона необходимо более длительное накопление сигнала.

На рис. 2, *д*, *е* показано сравнение решений $\Phi_{\text{он}}$ для «своей» системы собственных векторов (кривая 2) и «чужой» (кривая 3) для одного импульса (рис. 2, *д*) и тысячи импульсов (рис. 2, *е*) при $a = 9$ км в сравнении с точным профилем (кривая 1). Из рисунков видно, что накопление сигналов дает заметное улучшение качества восстановления профиля озона как для «своей», так и для «чужой» системы собственных векторов. Для восстановления этих профилей при решении системы уравнений параметр α брался равным 10^{-6} (см. (18)).

Результаты обработки лидарных данных

Лидарные данные по зондированию стратосферного озона над г. Томском получены в летнюю кампанию программы SATOR 6, 8, 9, 11, 14, 20, 22 и 24 июля 1991 г. Причем в отдельные ночи удавалось провести несколько сеансов зондирования озона.

Лазерное зондирование стратосферного озона осуществлялось с помощью лидара на базе 1-м приемного зеркала и Хе-С1-лазера, снабженного ВКР преобразователем лазерной частоты излучения на H_2 . Принципиальная блок-схема лидара (рис. 3) имеет следующие основные параметры; при $\lambda_{\text{он}} = 308$ нм и $\lambda_{\text{оф}} = 353$ нм длина лазерного импульса равна 10 нс, а частота посылок лазерных импульсов 70 Гц, энергия лазерного импульса соответственно 60 и 8 мДж. Регистрация сигналов осуществлялась в режиме счета импульсов фототока в стробируемых масштабах с длиной строка $\approx 2,5$ мкс ($\Delta z \approx 375$ м). Время накопления лидарных сигналов в одном цикле зондирования составляло 30 мин.

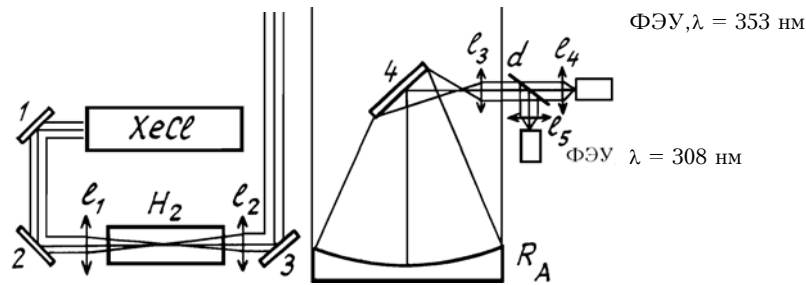


Рис. 3. Принципиальная блок-схема озонного 2-волнового лидара: 1, 2, 3, 4 – поворотные зеркала; l_1, \dots, l_5 – фокусирующие и коллимирующие линзы; d – дихроичное зеркало; R_A – приемное зеркало \varnothing 1 м, XeCl – эксимерный лазер; – H_2 – ВКР ячейка высокого давления водорода 16 атм

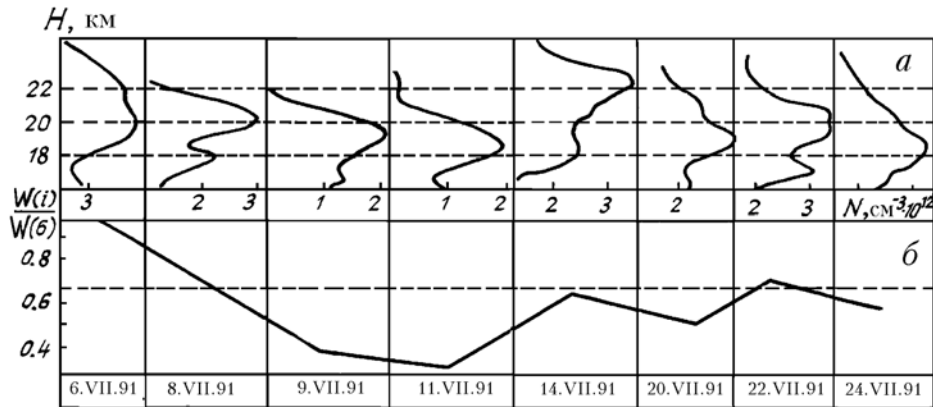


Рис. 4. Профили озона, восстановленные из лидарных сигналов, полученных в различные сроки (а), и относительное изменение общего содержания озона в слое 16–23 км (б)

Для обработки реальных данных мы использовали метод сплайн-функций. Выбор этого метода обусловлен наибольшей устойчивостью к ошибкам входных данных для любого количества узлов. Метод регуляризации для решения данной задачи, как показано выше, неустойчив при большом количестве узлов и неэффективен по затратам машинного времени счета. Уменьшение числа узлов позволяет повысить устойчивость решения, однако при этом уменьшается пространственное разрешение. Использование метода оптимальной параметризации для обработки реальных данных пока не представляется возможным ввиду отсутствия статистических данных о среднем содержании озона над г. Томском. Использование «чужого» среднего профиля может привести к неконтролируемым погрешностям восстановления профиля озона из лидарных данных.

На рис. 4, а приведены июльские вертикальные профили озона, восстановленные из лидарных сигналов с помощью кубических сплайнов в диапазоне стратосферных высот 15–25 км. Видно, что максимум озонного слоя располагается в диапазоне 19–21 км, что согласуется с физическими представлениями об озонном слое для средних широт [26].

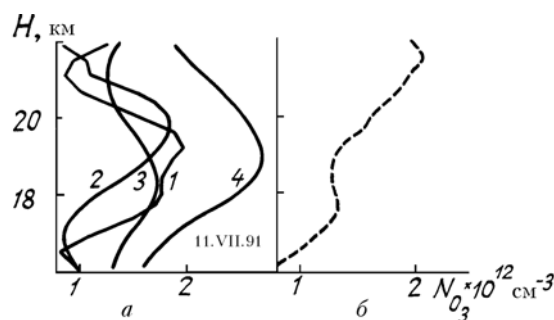


Рис. 5. Профили озона, полученные в четырех сеансах за одну ночь (а), и среднее квадратическое отклонение относительно среднего профиля (б)

Следует отметить, что вариации содержания озона в стратосферном максимуме в период наблюдения были очень значительны. Так, например, интегральное содержание озона в слое 16–23 км уменьшилось более чем в 2 раза с 6 по 9 июля (см. рис. 4, б). Причем динамичные изменения наблюдались даже в течение одной ночи. На рис. 5 приведены 4 озонных профиля, измеренных менее чем за 2 часа ночью 11 июля. Штриховой линией на этом рисунке изображено среднее квадратическое отклонение зарегистрированных профилей от среднего за всю ночь наблюдения.

Согласно анализу стратосферных синоптических карт в указанный период лидарных наблюдений происходило вторжение в средние широты воздушных масс субтропического происхождения (описание синоптической ситуации приводится в настоящем выпуске). На этих высотах в тропиках, как известно, располагается озонопауза с обедненным содержанием озона. Таким образом, результаты июльских лидарных наблюдений трансформации озонных профилей хорошо согласуются с синоптическими данными, а также с данными о «депрессии» озона, вызванной извержением вулкана Пинатубо. Сильные вариации озонных профилей даже в течение одной ночи обусловлены, скорее всего, динамичными изменениями горизонтальных подвижек воздуха.

В заключение авторы выражают благодарность С.А. Михайлову за любезно предоставленные данные по матрице ковариации озона станции Гус-Бей.

1. Werner J., Rothe K. W., Walther H. // *Appl. Phys.* 1983. V. B32. № 3. P. 113.
2. Claude H., Wege K. // *Abstracts of 14 ILRC.* June 20–24, 1988. Inneben. San Candido. Italy. P. 392.
3. McDermid S., Godin S. M. e. a. // *Abstracts of 15 ILRC Part-I,* July 23–27, 1990. Tomsk. USSR. P. 129.
4. Nakane H., Sasano J. e. a. // *Abstracts of 15 ILRC. Part-I,* July 23–27, 1990. Tomsk. USSR. P. 116.
5. Демидович В. Б. // *Вычислительные методы и программирование* М.: Изд-во МГУ, 1967. № 8. С. 96–102.
6. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. *Методы решения некорректных задач.* М.: Наука, 1979. 238 с.
7. Маричев В. Н., Мицель А. А. // *Тезисы докл. 5 Всесоюз. симпозиума по распростр. лазерн. излучения в атмосфере.* Ч. 3. Томск: ТФ СО АН СССР, 1979. С. 192–196.
8. Воскобойников Ю. Е., Мицель А. А. // *Изв. АН СССР. Сер. ФАО.* 1981. Т. 17. № 2. С. 832.
9. Zuev V. E., Zuev V. V., Makushkin Yu. S. et al. // *Appl. Opt.* 1983. V. 22. № 23. P. 3733–3741.
10. Воскобойников Ю. Е., Катаев М. Ю., Мицель А. А. // *Оптика атмосферы.* 1994. Т. 4. № 2. С. 177–184.
11. Иваненко Б. П., Маричев В. Н. // *Тезисы докл. 5 Всесоюз. симпозиум по лазерн. и акустич. зондированию атмосферы.* Томск, 1978. С. 61–65.
12. Ivanenko B. P., Naats I. E. // *Opt. Lett.* 1981. V. 6. № 7. P. 305–307.
13. Иваненко Б. П., Смирнов Н. Д. // *Тезисы докл. 5 Всесоюз. симпозиума по лазерн. и акустич. зондированию атмосферы.* Томск, 1982. Ч. 2. С. 82–85.
14. Зуев В. Е., Иваненко Б. П., Наац И. Э. // *Исследование Земли из космоса.* 1985. № 5. С. 117.
15. Зуев В. Е., Наац И. Э. *Обратные задачи лидарного лазерного зондирования атмосферы.* Новосибирск: Наука, 1982. 240 с.
16. Иваненко Б. П. // *Оптика атмосферы,* 1988. Т. 1. № 8. С. 111–115.
17. Иванова Н. С., Крученицкий Г. М. // *Тезисы докл. II Всесоюз. симпозиума по распростр. лазерн. излучения в атмосфере,* Томск: ТФ СО АН СССР. 1990. С. 182.
18. Стечкин С. Б., Субботин Ю. Н. *Сплайны в вычислительной математике.* М.: Наука, 1976. 248 с.
19. Воскобойников Ю. Е., Преображенский Н. Г., Седельников А. И. *Математическая обработка эксперимента в молекулярной газодинамике.* Новосибирск Наука, 1984. 237 с.
20. Обухов А. М. // *Изв. АН СССР. Геофизика.* 1960. № 3. С. 345.
21. Малкевич М. С. *Оптические исследования атмосферы со спутников.* М.: Наука, 1973. 303 с.
22. Зуев В. Е., Комаров В. С. *Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы.* Л.: Гидрометеониздат, 1986. 262 с.
23. Комаров В. С., Михайлов С. А., Ромашов Д. Н. *Статистическая структура вертикального распределения атмосферного озона.* Новосибирск: Наука, 1988. 76 с.
24. Суркин Р. Н., Сержантов В. Г., Торговчев В. А. // *Атмосферный озон.* М.: Гидрометеониздат. 1990. С. 12–17.
25. Ипполитов И. И., Комаров В. С., Мицель А. А. // *Спектроскопические методы зондирования атмосферы.* Новосибирск, 1985. С. 4–44.
26. Kueger A. J., Minzner R. A. // *J. Geoph. Res.* 1976. V. 81. № 24. P. 4477

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
12 марта 1992 г.

A. V. El'nikov, V. V. Zuev, M. Yu. Kataev, V. N. Marichev, A. A. Mitsel.
Sounding of Stratospheric Ozone with a Double-frequency UV DIAL: Methods of Solving the Inverse Problem and Experimental Results.

An analysis of three methods for solving the inverse problem of lidar sensing of ozone is presented. The first method uses splines, the second is a regularization method and the third one is based on the use of optimal parameterization. It is shown in the paper that the regularization technique is less efficient at number of time gates exceeding 15. The possibility of using the optimal parameterization technique for processing the lidar data on ozone has been analyzed for the first time. Some results of processing lidar returns of ozone recorded from the stratosphere over Tomsk are given.