

А.В. Ельников, В.В. Зуев, С.Л. Бондаренко

О восстановлении профилей стратосферного озона из данных лидарного зондирования

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 28.08.2000 г.

Рассматривается применение известных математически простых процедур сглаживания для восстановления вертикального распределения концентрации стратосферного озона из данных лидарного зондирования. К ним можно отнести такие процедуры, как линейное и экспоненциальное сглаживание, линейная аппроксимация и скомбинированные из них алгоритмы. Полученные на основе этих процедур вертикальные профили сопоставляются с профилем озона, восстанавливаемым при помощи математически обоснованного для решения подобного рода задач метода сплайн-аппроксимации. Анализ проводится на основе средних профилей лета 1998 г. и их межуровневых корреляционных связей.

Введение

Восстановление концентрации озона из данных лидарного зондирования по методу дифференциального поглощения является обратной некорректной задачей. В работе [1] определены некорректно поставленные задачи и дан общий подход к их решению, основанный на регуляризации. Применительно к проблемам лазерного зондирования алгоритмы и методы регуляризации подробно освещены в [2]. Интенсивно разрабатываются алгоритмы решения обратных некорректных задач на основе сплайн-аппроксимации [3 – 5]. Оба этих метода (регуляризации и сплайн-аппроксимации) основаны на решении вариационной задачи, функционал в которой строится с привлечением параметра сглаживания α , выбираемого исходя из точности полученных из атмосферы лидарных сигналов.

Эти методы дают математически обоснованные результаты и являются незаменимыми при получении средних профилей концентрации в каком-то пространственном интервале, например при построении моделей вертикального распределения озона, определяющим параметром в которых является точность исходных данных.

Однако при исследовании межуровневых взаимосвязей стратосферного озона возникает опасность завышения коэффициентов корреляции, которые отражают их величину. И это завышение обуславливается самим методом решения вариационной задачи, в котором вводится параметр сглаживания, априори вносящий детерминированную связь во всем исследуемом диапазоне. Причем количественная оценка данного завышения не представляется возможной.

Для решения подобного рода задач больше подходят методы, позволяющие при сохранении приемлемой устойчивости решения однозначно определять пространственные интервалы, в пределах которых имеет место взаимосвязь, обуславливаемая самим алгоритмом. В подобных методах устойчивость решения обеспечивается уменьшением случайной ошибки лидарных сигналов посредством объединения соседних пространственных интервалов. Это приводит к увеличению сигнала, но к ухудшению пространственного разрешения. Аналогичного эффекта можно достичь,

применив к лидарным сигналам процедуру линейного сглаживания [6, 7].

В настоящей статье рассматриваются несколько простых процедур сглаживания лидарных данных, применяемых для получения профилей озона. Получающиеся вертикальные распределения концентрации озона сопоставляются с профилем, восстанавливаемым с использованием метода сплайн-аппроксимации, применение которого в задачах дифференцирования эмпирических функций и решения обратных некорректных задач имеет математическое обоснование.

Математический формализм и вычислительные методы

В математическом виде процедура восстановления профилей концентрации стратосферного озона $n(H)$ выражается в виде [8]:

$$n(H) = \frac{1}{\sigma(H)} \left\{ \frac{d}{dH} [X(H) + Y(H)] \right\} - Z(H), \quad (1)$$

где

$$X(H) = \ln [\beta_{\pi}(H, \lambda_{\text{он}}) / \beta_{\pi}(H, \lambda_{\text{офф}})];$$

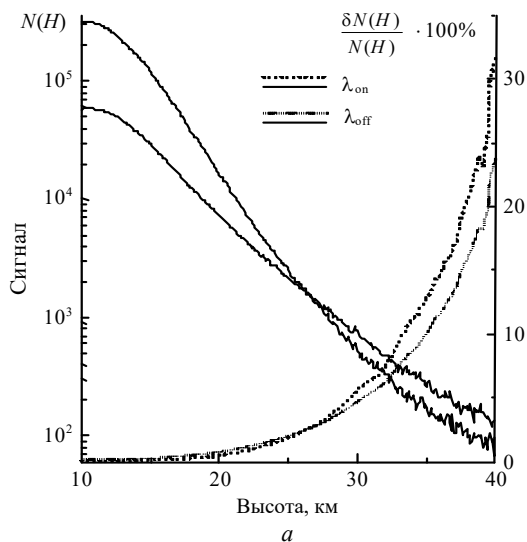
$$Y(H) = \ln [N(H, \lambda_{\text{офф}}) / N(H, \lambda_{\text{он}})];$$

$\sigma(H)$ – дифференциальный коэффициент поглощения; $N(H, \lambda_{\text{он}})$, $N(H, \lambda_{\text{офф}})$ – «полезные» (т.е. за вычетом фона) лидарные эхосигналы на поглощаемой $\lambda_{\text{он}}$ и референтной $\lambda_{\text{офф}}$ длинах волн соответственно; $\beta_{\pi}(H, \lambda_{\text{он}})$, $\beta_{\pi}(H, \lambda_{\text{офф}})$ – рассеивающие свойства атмосферы в направлении назад, включающие в себя как молекулярную, так и аэрозольную составляющие (суммарный коэффициент обратного рассеяния); $Z(H) = \alpha(H, \lambda_{\text{он}}) - \alpha(H, \lambda_{\text{офф}})$ – разность суммарных коэффициентов ослабления на соответствующих длинах волн. При малом разнесении по спектру $\lambda_{\text{он}}$ и $\lambda_{\text{офф}}$ коэффициенты обратного рассеяния и ослабления на этих длинах волн практически равны и соответственно $X(H)$ и $Z(H)$ равны нулю. В противном случае величины $X(H)$ и $Z(H)$ оцениваются. Для простоты ограничимся вариантом $X(H) = 0$ и $Z(H) = 0$.

Выражение для оценки ошибки измерений имеет громоздкий вид [8]. Однако в рассматриваемой проблеме, обусловленной тем, что восстановление концентрации по методу дифференциального поглощения является обратной некорректной задачей, значения представляют компоненты, природа которых случайна, т.е. лидарные сигналы. Некорректность уравнения (1) определяется необходимостью вычисления производной $dY(H)/dH$, при котором изменение $Y(H)$ на малую величину $\Delta Y(H)$ может приводить к большим изменениям в самой производной.

В итоге упрощенное выражение для квадрата относительной ошибки концентрации озона можно представить в виде

$$[\delta n(H)/n(H)]^2 = \sum_i [\delta N(H, \lambda_i) / N^2(H, \lambda_i)] = \sum_i \delta N(H, \lambda_i) / [\tilde{N}(H, \lambda_i) - N_b(\lambda_i)]^2, \quad (2)$$



где λ_i принимает значения λ_{on} и λ_{off} ; $\tilde{N}(H, \lambda_i)$, $N_b(\lambda_i)$ – зарегистрированный лидарный сигнал и величина фона на соответствующей длине волны. При вычислении производной численным методом, т.е.

$$dY(H)/dH \approx \Delta Y/\Delta X = [Y(N_i) - Y(H_{i+1})]/\Delta X$$

(«разностная схема»), операцию суммирования в уравнении (2) необходимо удваивать.

Наглядной иллюстрацией обсуждаемой проблемы служит рис. 1. На рис. 1,а представлены достаточно хорошо статистически обеспеченные реальные лидарные сигналы с пространственным разрешением 100 м, полученные на Сибирской лидарной станции в январе 2000 г. на длинах волн $\lambda_{on} = 308$ и $\lambda_{off} = 353$ нм и используемые при зондировании стратосферного озона. Кроме того, здесь же приведены относительные ошибки «полезных» сигналов $\delta N(H)/N(H)$.

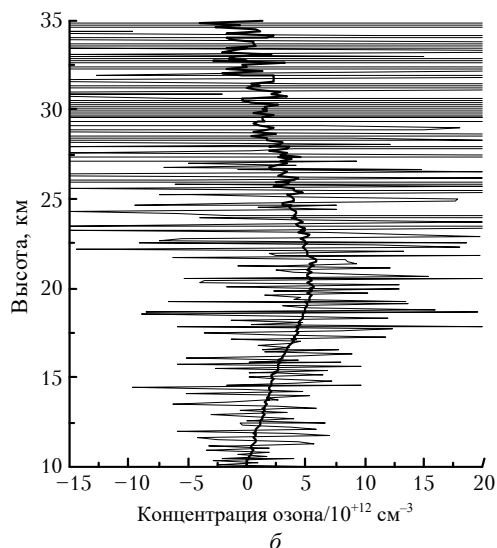


Рис. 1. Лидарные эхосигналы (сплошные линии), зарегистрированные 26.01.2000 г. и их относительные ошибки (пунктирные линии) – а; восстановленный из них профиль стратосферного озона (тонкая линия) и его высотный ход (жирная линия) после линейного сглаживания его по 50 точкам – б

Вертикальный профиль концентрации озона, восстановленный из этих эхосигналов согласно (1) по «разностной схеме», изображен на рис. 1,б. Видно, что очень большие вариации значений $n(H)$ от строки к строке делают невозможными описание его вертикальной структуры и дальнейшую интерпретацию. Более пригодными для анализа результаты лазерного зондирования становятся после линейного сглаживания. В качестве примера на рис. 1,б приведен исходный профиль, сглаженный по 50 точкам. Данная процедура уменьшила случайную ошибку в $\sqrt{50}$ раз, и ее величина оказалась на высоте 30 км менее 2%, а на высоте 40 км менее 9% (оценки проведены по формуле (2)), но существенно загубила пространственное разрешение. Подробное описание процедуры линейного сглаживания и других процедур, позволяющих привести результаты лидарного зондирования к виду, удобному для интерпретации, а также смысл, вкладываемый в понятие пространственного разрешения после их применения, обсуждаются ниже.

Линейное сглаживание

Линейное сглаживание (сглаживание скользящим средним) является хорошо известной процедурой и широко применяется при обработке данных эксперимента в различных областях естествознания и является частным случаем числовой фильтрации сигнала, обладающего случайной ошибкой, фильтром с прямоугольным окном (весовые коэффициенты в таком фильтре равны единице) [9]. Сглаженные значения экспериментального ряда $\bar{N}(H)$ (в нашем случае вертикальный профиль) и его дисперсия $\bar{D}(H)$ связаны с исходными данными $N(H)$ и их дисперсией $D(H)$ следующим образом [6, 10]:

$$\bar{N}(H) = \frac{1}{2k+1} \left[\sum_{i=-k}^k N(H+i\Delta H) \right]; \quad (3)$$

$$\bar{D}(H) = D(H)/(2k+1),$$

где ΔH – пространственное разрешение исходного ряда; k – количество точек ряда, лежащих вправо и влево от сглаживаемой точки. В терминах числовой фильтрации $p = 2k + 1$ представляет размер фильтра [9]. Именно во столько же раз ухудшается пространственное разрешение исходного ряда после применения к нему процедуры линейного сглаживания, т.е. $\Delta \bar{H} = p \Delta H$ (под пространственным разрешением сглаженного ряда $\Delta \bar{H}$ понимается тот пространственный отрезок, вне которого исходные значения $N(H)$ не участвуют в вычислении сглаженных $\bar{N}(H)$).

Таким образом, уменьшение дисперсии влечет за собой ухудшение пространственного разрешения. Конкретное соотношение в восстанавливаемых профилях его между характеристиками («пространственное разрешение – точность») определяется задачей, решаемой лазерным зондированием. Например, при исследовании взаимосвязи между высотными уровнями, отстоящими друг от друга на 2,1 км, можно применить процедуру линейного сглаживания по 21 точке. Тогда при восстановлении вертикального распределения озона получаем случайную ошибку меньше 3% на 30 км и меньше 14% на 40 км (оценки сделаны для лидарных сигналов на рис. 1). При этом заметим, что вклад дисперсии каждой шумовой составляющей в общую дисперсию $[\delta n(H)]^2$ аддитивен (см. уравнение (2)) и поэтому независимо от того, на каком этапе вычислений применять линейное сглаживание (или $Y(H)$ в формуле (1), или уже полученные значения $n(H)$, как для рис. 1), ее величина будет одинаковой.

Процедура линейного сглаживания, примененная дважды (т.е. исходный ряд \rightarrow сглаженный ряд \rightarrow сглаживание сглаженного ряда), называется сглаживанием II порядка [10] и в элементах исходного ряда записывается следующим образом:

– по трем точкам (т.е. в формулах (3) $k = 1$)

$$\hat{a}_j = \frac{\bar{a}_{j-1} + \bar{a}_j + \bar{a}_{j+1}}{3} = \frac{1}{3} \left(\frac{a_{j-2} + a_{j-1} + a_j}{3} + \frac{a_{j-1} + a_j + a_{j+1}}{3} + \frac{a_j + a_{j+1} + a_{j+2}}{3} \right) = (a_{j-2} + 2a_{j-1} + 3a_j + 2a_{j+1} + a_{j+2})/9;$$

– по пяти точкам (т.е. в формулах (3) $k = 2$)

$$\hat{a}_j = (a_{j-4} + 2a_{j-3} + 3a_{j-2} + 4a_{j-1} + 5a_j + 4a_{j+1} + 3a_{j+2} + 2a_{j+3} + a_{j+4})/25;$$

– по $2k + 1$ точкам (т.е. в общем виде)

$$\hat{a}_j = \left\{ \sum_{i=-2k}^{2k} \underbrace{[(2k+1-i) a_{j-i}]}_M \right\} / (2k+1)^2, \quad (4)$$

где

$$l = -1, \text{ если } i < 0, \text{ и } l = 1, \text{ если } i \geq 0.$$

Здесь $\{a_j\}$ – исходный ряд; \bar{a}_j – элементы сглаженного ряда; \hat{a}_j – значения после линейного сглаживания II порядка. В терминах числовой фильтрации выражение (4) представляет собой числовой фильтр с весовыми коэффициентами M , величины которых по мере удаления от сглаживаемой точки уменьшаются, и размером $p = 4k + 1$.

Следовательно, в результате применения данной процедуры исходное пространственное разрешение увеличилось в $4k + 1$ раза, т.е. $\Delta \hat{H} = p \Delta H$. Но заметим, что действительная величина $\Delta \hat{H}$ будет несколько меньше, чем $\Delta \bar{H}$, введенное ранее для фильтра с равными весами, когда все элементы $\{a_j\}$, попадающие в фильтр, оказывают одинаковое влияние на вычисление значений \hat{a}_j . Дисперсия полученного ряда согласно уравнению (3) относительно исходного уменьшится в $(2k + 1)^2$, так как

$$\hat{D}(H) = \bar{D}(H)/(2k + 1) = [D(H)]/(2k + 1)(2k + 1). \quad (5)$$

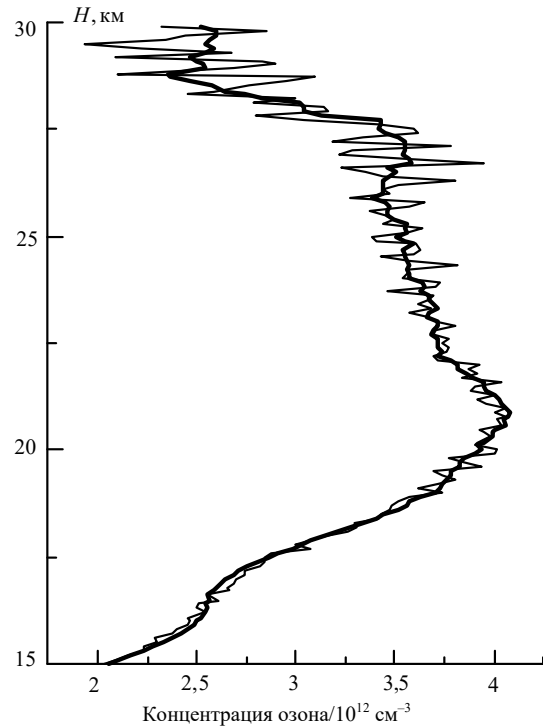


Рис. 2. Вертикальные профили концентрации озона, восстановленные с использованием линейного сглаживания I порядка по 21 точке (тонкая линия) и линейного сглаживания II порядка по 11 точкам (жирная линия)

Профили стратосферного озона, восстановленные из полученных летом 1998 г. лидарных сигналов с параметрами, аналогичными тем, что изображены на рис. 1, с использованием процедур линейного сглаживания I и II порядков, приведены на рис. 2. Сглаживание I порядка осуществлялось по 21 точке (т.е. $k = 10$) и применялось к функции $Y(H)$, из которой по «разностной схеме» вычислялась производная и затем $n(H)$ (см. уравнение (1)). Линейное сглаживание II порядка производилось по 11 точкам (т.е. $k = 5$), сначала по такой же схеме, как и в предыдущем случае, а затем сглаживание по 11 точкам применялось к $n(H)$. Для обоих профилей, приведенных на рис. 2, пространственное разрешение одно и то же, т.е. 2,1 км. То, что сглаживание II порядка применяется к разным функциям, не имеет принципиального значения. При этом из рис. 2 видно, что обусловленные ошибкой высотные вариации профиля $n(H)$, полученного с его использованием, значительно меньше, а определяется это тем, что дисперсия исходного ряда уменьшается в 121 раз (т.е. $(2k + 1)^2$), в то время как при сглаживании I порядка – только в 21 раз.

Линейная аппроксимация производной

Смысл данной процедуры, применяемой к лидарным сигналам, заключается в том, что для каждой точки j массива $\{Y_j\}$ (см. уравнение (1)) по значениям, попадающим в интервал $2k + 1$, в центре которого находится сама точка j , строится полином I степени, т.е. $y = Ax + B$. В этом выражении функция y является линией, построенной с использованием метода наименьших квадратов по конкретным значениям $Y_{j-k} \div Y_{j+k}$, а в качестве переменной X выступают значения высоты $H_{j-k} \div H_{j+k}$. Наклон данной линии A представляет не что иное, как производную dy/dx в конкретной точке j , которая требуется в формуле (1). Величина A вычисляется согласно формуле [9]:

$$A = \frac{\sum_{i=-k}^k (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=-k}^k (x_i - \bar{x})^2}, \quad (6)$$

а квадрат ошибки ее определения

$$(\delta A)^2 = W / \sum_{i=-k}^k (x_i - \bar{x})^2, \quad (7)$$

где

$$W = \left[\sum_{i=-k}^k (y_i - \bar{y})^2 - A^2 \sum_{i=-k}^k (x_i - \bar{x})^2 \right] / (2k - 1).$$

При таком аналитическом методе вычисления производной именно $(\delta A/A)^2$ входит в формулу (2) для оценки ошибки восстанавливаемого профиля $n(H)$, а пространственное разрешение определяется интервалом, по которому вычисляется производная. Дальнейшее уменьшение ошибки $n(H)$ может быть достигнуто линейным сглаживанием. В итоге получается комбинированная процедура (можно сказать II порядка), включающая элементы вариационного исчисления с аналитическим вычислением производной $dY(H)/dH$ и линейного сглаживания.

Рассмотренные выше методы дают возможность однозначно оценить пространственные интервалы на трассе зондирования, взаимосвязь которых обусловлена самими алгоритмами.

Экспоненциальное сглаживание

Математическая запись процедуры экспоненциального сглаживания экспериментальных данных выглядит следующим образом [6, 10]:

$$\tilde{N}_i = (1 - \alpha) N_i + \alpha \tilde{N}_{i-1}, \quad i = 2 \dots k, \quad (8)$$

$\alpha < 1$ при $\tilde{N}_1 = N_1$,

где N_i – элемент исходного ряда данных; $\tilde{N}_i, \tilde{N}_{i-1}$ – элементы сглаженного массива; α – параметр сглаживания (чем он больше, тем больше сглаживание); k – номер последнего элемента ряда. В элементах исходного ряда формула (5) имеет вид

$$\begin{aligned} \tilde{N}_i &= (1 - \alpha) N_i + (1 - \alpha) \alpha N_{i-1} + (1 - \alpha) \alpha^2 N_{i-2} + \dots + \\ &+ (1 - \alpha) \alpha^{i-1} N_1. \end{aligned} \quad (9)$$

В терминах цифровой фильтрации выражение (9) является цифровым фильтром, в котором последовательные элементы исходного ряда участвуют в определении сглаженного значения i -го элемента следующим образом: сам элемент весом $(1 - \alpha)$ и предыдущие элементы соответственно $(1 - \alpha)\alpha, (1 - \alpha)\alpha^2$ и т.д. Таким образом, чем дальше от начала ряда (в терминах вертикального профиля это его самая нижняя точка), тем большее количество точек участвует в вычислении сглаживаемого значения, внося определенную взаимосвязь между элементами получаемого ряда.

Дисперсия сглаженного ряда связана с дисперсией исходного согласно [10] следующим образом:

$$\tilde{D}(H) = [\alpha/(2 - \alpha)] D(H). \quad (10)$$

Поскольку параметр сглаживания может принимать любые вещественные значения, то, меняя его величину, можно компенсировать возрастание случайной ошибки профиля $n(H)$ при увеличении высоты H . В качестве примера параметра сглаживания, ориентированного на квазипостоянство ошибки измерения за счет связи между слоями, может служить следующее выражение:

$$\alpha(H_i) = \alpha_0 + (0,95 - \alpha_0) \exp \{0,25 \ln [(i - A)/(B - A + 5)]\}, \quad (11)$$

где i – номер строба; A и B – начальный и конечный стробы восстанавливаемого профиля соответственно. Выражение (11) с параметрами $\alpha_0 = 0,4, i_0 = 150$ и $i_{\text{end}} = 350$ использовалось в экспоненциальном сглаживании восстановленных с его помощью вертикальных профилей озона, анализируемых в данной статье. При этом процедура сглаживания применялась после вычисления производной $dY(H)/dH$ по разностной схеме.

Сплайн-аппроксимация

Сплайны – это гладкие (несколько раз дифференцируемые) кусочно-полиномиальные функции, используемые для представления данных на больших интервалах. Нами сплайн-аппроксимация была реализована на основе сглаживающего кубического сплайна, алгоритмы которого представлены в монографии К. Де Бор [3]. Для решения данной задачи строится функция $S(H)$ (сплайн), которая при определенном параметре ρ минимизирует функционал

$$\rho \sum_i (Y(H_i) - S(H_i))^2 + (1 - \rho) \int_A^B (S^{(2)})^2 dh \quad (12)$$

по функции $S(H)$ и ее второй производной $S^{(2)}$ (A, B – также первая и последняя точки лидарного эхосигнала). Минимизация (12) есть некоторый компромисс между требованиями приближения сплайна к значениям эмпирической функции $Y(H)$ и его гладкости функции, который зависит от выбора параметра ρ . При $\rho = 0$ сплайн-аппроксимация сводится к линейной аппроксимации данных, а при $\rho = 1$ – к интерполяции (точному повторению) данных.

Сплайн-аппроксимация позволяет удержаться в пределах средней ошибки измерения по всему восстановленному профилю концентрации озона, а вычисление производной $dY(H)/dH$ производить аналитическим способом.

Обсуждение результатов вычислений

Рассмотренные выше вычислительные методы были использованы при восстановлении вертикальных профилей концентрации стратосферного озона. Для объективного сопоставления результатов вычисления параметры процедур выбирались так, чтобы восстановленные профили имели примерно одинаковую высотную вариабельность и случайная ошибка на высоте 30 км была меньше 3%, а на 40 км меньше 14%. Выполнение данного условия было достигнуто при следующих параметрах. При линейном сглаживании функция $Y(H)$ (см. формулу (1)) сглаживалась по 11 точкам, затем производная $Y(H)$, вычисленная по «разностной схеме», также сглаживалась по 11 точкам.

Таким образом, производилось линейное сглаживание II порядка (линейная процедура). При линейной аппроксимации – производная вычислялась по 11 точкам, к которой, в свою очередь, применялась процедура скользящего среднего по 11 точкам (комбинированная процедура). Параметры экспоненциального сглаживания уже приводились выше и использовались после взятия производной по «разностной схеме» (экспоненциальная процедура). Сплайн-аппроксимация имела параметр $\rho = 0,021$. Согласно представленным численным значениям пространственное разрешение при линейном сглаживании II порядка и комбинационной процедуре составляет 2,1 км. Величину взаимосвязи между слоями, вносимую экспоненциальным сглаживанием и сплайн-аппроксимацией, оценить трудно.

Рассчитанные согласно данным процедурам средние вертикальные профили концентрации стратосферного озона за летний период 1998 г. приведены на рис. 3,а, из которого видно, что наиболее гладким является профиль, полученный с использованием сплайн-аппроксимации. В целом вертикальные распределения озона, восстановленные с использованием различных методов, довольно хорошо повторяют друг друга. Однако профили на основе линейного II порядка и экспоненциального сглаживания по всему высотному диапазону имеют несколько заниженные значения. Так, вероятно, проявляет себя вычисление производной по «разностной схеме»:

$$\frac{dY(H)}{dH} \approx \frac{\Delta Y(H)}{\Delta H} = \frac{Y(H_i) - Y(H_{i+1})}{\Delta H},$$

а должно быть

$$\frac{dY(H)}{dH} \equiv \lim_{\Delta H \rightarrow 0} \frac{\Delta Y(H)}{\Delta H}.$$

Конечное значение ΔH и приводит к систематическому занижению производной во всем диапазоне. В двух остальных случаях значения производной вычислялись аналитическим методом. Наибольшие отличия в районе 16 км профиля, восстановленного сплайн-аппроксимаций, от всех других профилей могут определяться тем, что при реализации данного алгоритма необходимо задавать граничные условия в виде равенства нулю вторых производных в начальной (16 км) и конечной (35 км) точках [3, 9].

Для большего контраста имеющихся между профилями отличий на рис. 3,б приведено их отклонение от профиля, полученного с использованием сплайн-аппроксимации. Отклонение рассчитывалось согласно формуле

$$L(H) = [n_i(H) - n_{\text{сплайн}}(H)] / 100 / n_{\text{сплайн}}(H).$$

Из рис. 3,б видно, что профили, полученные с использованием линейного II порядка и экспоненциального сглаживаний, обладают максимальной вариабельностью, и для более наглядного восприятия их пришлось еще раз сглаживать скользящим средним по 5 точкам. Следовательно, эти процедуры сглаживания менее эффективны.

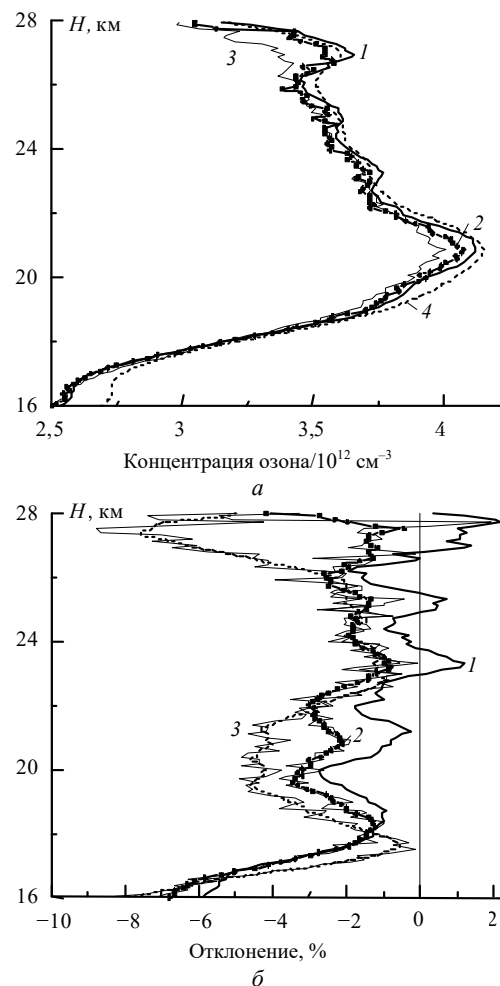


Рис. 3. Средние профили вертикального распределения концентрации стратосферного озона, полученные на основе соответствующих вычислительных процедур: 1 – комбинированной; 2 – линейной; 3 – экспоненциальной; 4 – сплайн-аппроксимационной (а). Отклонение $L(H)$ для процедур: 1 – комбинированной; 2 – линейной (профили с точками – дополнительно сглаженные по 5 точкам); 3 – экспоненциальной (пунктирный профиль – сглаженные дополнительно по 5 точкам) (б)

Кроме того, при экспоненциальном сглаживании получаются заниженные значения концентрации озона по сравнению с остальными профилями в максимуме озонового слоя и на конце исследуемого интервала. Наибольшее подобие в вертикальном распределении наблюдается для профилей, полученных с использованием линейного сглаживания II порядка и комбинированной процедуры. Более того, последний профиль наиболее близок по абсолютным значениям к профилю, восстановленному сплайн-аппроксимацией.

Рассмотрим теперь влияние этих процедур сглаживания на результаты анализа межуровневой корреляции

с использованием статистического ансамбля из 13 отдельных профилей концентрации озона, средние которых приведены на рис. 3,а. В качестве исходного уровня выбран максимум профиля стратосферного озона (22 км). Результаты этого анализа приведены на рис. 4. Значения межуровневых корреляций с использованием сплайн-аппроксимации и экспоненциального сглаживания (на рис. 4 они обведены кружком) завышены примерно на 20%. Это как раз является отражением той детерминированной связи между слоями, которая вносится этими алгоритмами восстановления.

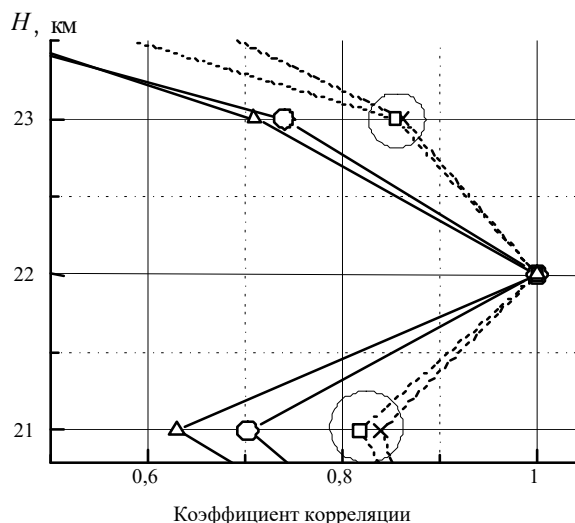


Рис. 4. Межуровневые корреляционные функции вертикальных профилей озона, полученные для высоты 22 км на основе соответствующих вычислительных процедур: \circ – линейной; \times – экспоненциальной; \square – сплайн-аппроксимации; \triangle – комбинированной

Заключение

Таким образом, в статье показано, что восстановление вертикальных профилей стратосферного озона с использованием различных вычислительных процедур и

методов сглаживания приводит к незначительным различиям. При этом восстановление профилей с использованием сплайн-аппроксимации и в большей степени экспоненциального сглаживания вносит в вертикальное распределение озона детерминированную взаимосвязь между слоями, которая приводит к увеличению значений коэффициентов корреляции между различными слоями. Поэтому для решения подобного рода задач наиболее приемлемыми являются линейное сглаживание II порядка и комбинированная процедура, позволяющие четко выделять пространственные интервалы, за пределами которых атмосферные слои являются совершенно независимыми. Большая же эффективность комбинированной процедуры по сравнению с линейным сглаживанием II порядка делает именно ее наиболее приемлемым алгоритмом при восстановлении вертикальных профилей стратосферного озона, в том числе и благодаря возможности аналитического вычисления производной.

Работа выполнена при финансовой поддержке Миннауки Российской Федерации на установке «Сибирская лидарная станция» (рег. № 01-64) и гранта РФФИ № 99-05-64943.

1. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1986. 288 с.
2. Зуев В.Е., Наац И.Э. Обратные задачи лазерного зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1982. 242 с.
3. Де Бор К. Практическое руководство по сплайнам. М.: Радио и связь, 1985. 304 с.
4. Zuev V.E., Zuev V.V., Makushkin Yu.S., et al. // Appl. Opt. 1983. V. 22. № 23. P. 3733–3741.
5. Воскобойников Ю.Е., Катаев М.Ю., Мицель А.А. // Оптика атмосферы. 1991. Т. 4. № 2. С. 177–184.
6. Чуев Ю.В., Михайлов Ю.Б., Кузьмин В.И. Прогнозирование количественных характеристик процессов. М.: Сов. радио, 1975. 430 с.
7. Дьяконов В.П. Справочник по алгоритмам и программам на языке бейсик для персональных ЭВМ. М.: Наука, 1987. 240 с.
8. Межерис П. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.
9. Отнес Р., Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. М.: Мир, 1982. 428 с.
10. Колемаев В.А., Староверов О.В., Турундаевский В.Б. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа, 1991. 400 с.

A.V. El'nikov, V.V. Zuev, S.L. Bondarenko. To the problem of reconstructing the stratospheric ozone profiles from lidar sensing data.

Application of well-known and mathematically simple smoothing procedures for reconstructing the vertical distribution of stratospheric ozone concentration from the data of lidar sensing is under discussion. We used the linear and exponential smoothing procedures, linear approximation procedure, and their combinations. The vertical profiles, obtained with their help, are compared with the ozone profile reconstructed by the spline-approximation method, mathematically justified for solving such type of problems. The analysis was conducted based on mean summer profiles, 1998, and their interlevel correlations.