

М.В. Панченко, С.А. Терпугова

## СХЕМА ВОССТАНОВЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ РАССЕЯНИЯ В НИЖНЕЙ ТРОПОСФЕРЕ

Предлагается общая схема восстановления вертикального профиля коэффициента рассеяния на длине волны  $\lambda = 0,52$  мкм в диапазоне высот 0–5 км. В качестве входных параметров используются внешние факторы (сезон, тип воздушной массы, время суток) и данные измерений (приземное значение коэффициента рассеяния, оптическая толщина, температура и относительная влажность воздуха). Схема построена на учете корреляционных связей значений коэффициента рассеяния на разных высотах, а также зависимости высоты слоя перемешивания от прогревности нижних слоев атмосферы.

Проведен анализ ошибок восстановления вертикальных профилей  $\sigma_a(H)$  и  $\sigma_w(H)$  для различных вариантов учета внешних факторов и комбинаций входных параметров.

Показано, что уже на этом этапе применение такого подхода обеспечивает снижение ошибки восстановления коэффициента рассеяния примерно на 30% для зимнего сезона и в 3–4 раза для летнего по сравнению с наблюдаемым среднеквадратическим отклонением значений этого параметра в соответствующих ансамблях данных.

Накопленный обширный экспериментальный материал, полученный при самолетном зондировании [1], и представленный в серии предыдущих публикаций анализ факторов изменчивости характеристик субмикронного аэрозоля нижней тропосферы [2–4] позволяют приступить к разработке эмпирической региональной динамической модели оптических параметров аэрозоля для диапазона высот 0–5 км.

На первом этапе формирования модели разработана общая схема восстановления вертикального профиля коэффициентов рассеяния для длины волны  $\lambda = 0,52$  мкм. Предлагаемая схема построена на принципах иерархии внешних факторов, многовариантного учета априорной информации и измеряемых входных параметров. Общая схема восстановления представлена на рис. 1.

Ее можно разделить на три блока. Первый блок схемы дает возможность при задании только внешних факторов получить информацию о средних значениях и дисперсии определяемых нами параметров в диапазоне высот 0–5 км. В качестве внешних факторов (входных параметров этого блока) выбраны следующие: сезон, тип воздушной массы и время суток. В этом блоке содержатся сведения о средних значениях и дисперсии вертикального профиля коэффициента рассеяния  $\sigma_a(H)$  сухой основы аэрозоля, коэффициента рассеяния  $\sigma_w(H)$  *in situ*, температуры  $T(H)$ , относительной влажности воздуха  $R(H)$ , удельной влажности  $Q(H)$  и параметра конденсационной активности  $\gamma(H)$ . На этом этапе исследований, в силу слабой статистической обеспеченности массивов наблюдательных данных по  $\gamma(H)$ , нами не были обнаружены достоверные отличия этого параметра в разных воздушных массах и в разное время суток, и поэтому вход в  $\gamma$  осуществляется только через сезон.

Понятно, что знание только сезонных и синоптических признаков дает возможность восстановить средние значения величин, среднеквадратическое отклонение которых для этих массивов близко к 100% [2] и слабо пригодно для более точных оперативных оценок. В то же время данные о среднем вертикальном профиле аэрозольных характеристик могут быть полезны для различного рода климатических расчетов, поскольку, как уже отмечалось, по синоптическим и метеорологическим признакам результаты хорошо согласуются со средними многолетними данными для исследуемого региона [1].

Прежде чем перейти к обсуждению следующего блока схемы восстановления, необходимо подчеркнуть: весь опыт работы в атмосфере и большой проанализированный экспериментальный материал свидетельствуют о том, что при создании модели оптических характеристик аэрозоля, входными параметрами которой являлись бы только сезонные, месячные и синоптические признаки, даже для конкретного региона не могут быть достигнуты точности восстановления (отношение среднеквадратического отклонения к средней величине) лучше, чем 50–60%

(обнаруженная при анализе многолетних данных измерений вертикального профиля  $N(H)$  [4–6] межгодовая изменчивость содержания аэрозоля ставит под сомнение и эту оценку, которую, пожалуй, следует рассматривать как весьма оптимистичную). Именно поэтому второй блок предлагаемой схемы связан с измеряемыми параметрами.

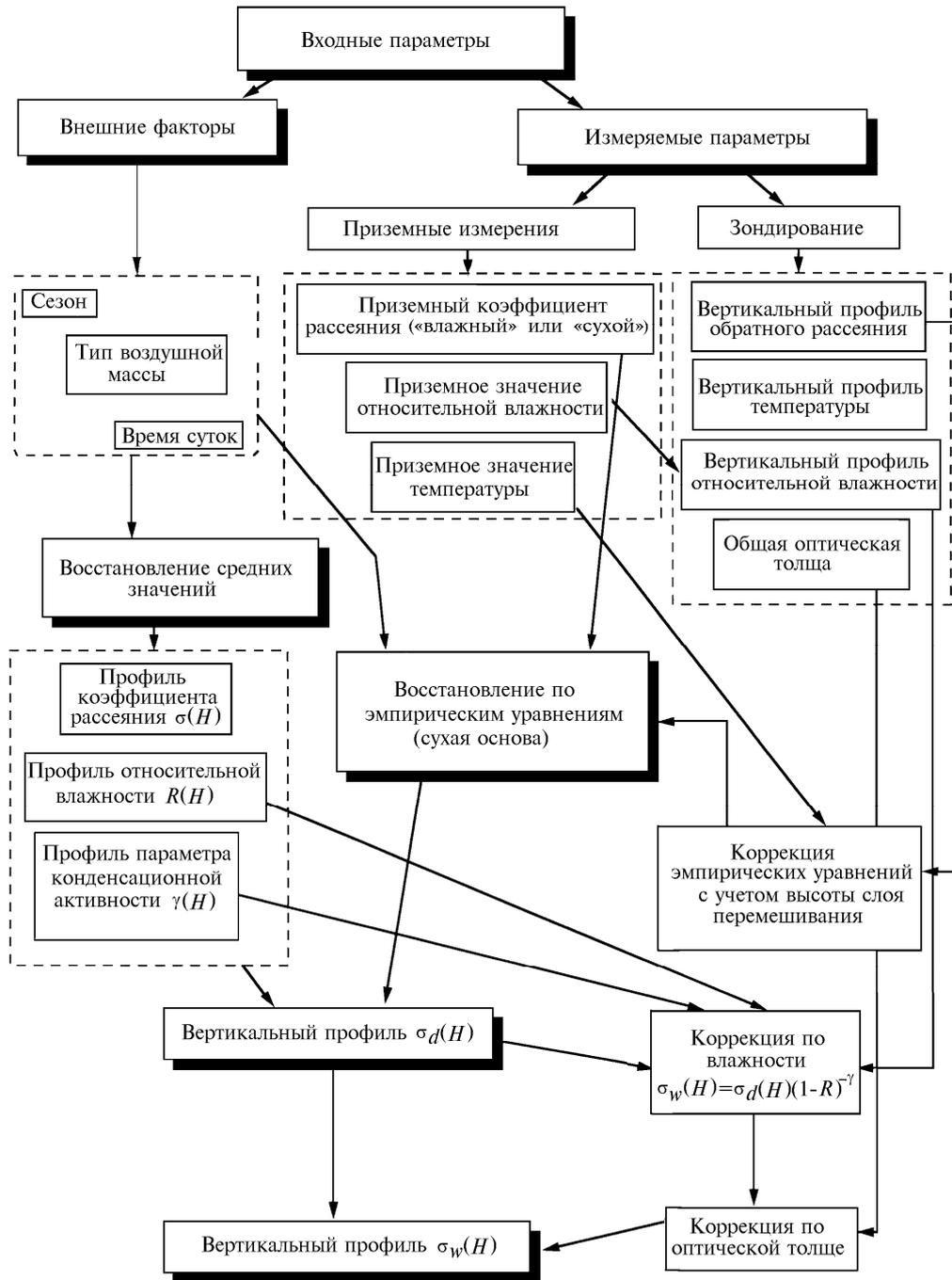


Рис. 1. Схема восстановления вертикального профиля коэффициента рассеяния

Среди большого числа оптико-метеорологических характеристик, которые могут быть измерены (в случае климатического моделирования метеорологические параметры могут быть рассчитаны) и использованы в качестве входных параметров, можно условно выделить две группы: данные, определяемые для приземного слоя атмосферы, и данные, получаемые назем-

ными системами о вертикальных профилях или же об общей оптической толще (на рис. 1 они объединены в группу «зондирование»).

На этом этапе формирования схемы восстановления мы стремились включить и опробовать только наиболее легко доступные для измерения характеристики, которые могли бы быть использованы в качестве входных параметров. В группе «приземных измерений» – это коэффициенты рассеяния («влажные» или «сухие»), температура и относительная влажность воздуха. При дальнейшем формировании модели сюда должны быть включены измерения приземной спектральной прозрачности атмосферы в широком диапазоне длин волн и сведения о компонентах матрицы рассеяния. В группе «зондирование» рассматривались возможности получения информации о вертикальных профилях метеопараметров (аэрологическое зондирование), применение фотометров, а также лидаров для измерения оптической толщи. Как показывает анализ автокорреляционных матриц коэффициентов рассеяния  $\sigma_d(H)$  и  $\sigma_w(H)$  [2], наиболее эффективно для восстановления всего вертикального профиля могли бы быть использованы данные непосредственного измерения  $\sigma$  на нескольких высотах, например выше и ниже слоя перемешивания. Но получение такого рода информации предполагает наличие мобильного носителя, например самолета, вертолета или шара-зонда с поднимаемыми приборами, т.е. применение достаточно дорогостоящих средств, что ограничивает возможности их регулярного использования в практике аэрозольных наблюдений. Понятно, что при развитии модели для широкого спектрального диапазона в схему необходимо включить данные о спектральной оптической толще и измерениях околосолнечного ореола.

Включив в перечень измеряемых параметров лидарные данные, мы руководствовались следующими соображениями: развитие средств лазерного зондирования нацелено на получение исчерпывающей информации о вертикальных профилях различных параметров атмосферы, в том числе аэрозольных характеристик, непосредственно из данных зондирования. В то же время известные проблемы решения уравнения лазерного зондирования определяют потребность в априорной информации при интерпретации лидарных данных. В этом случае и будет полезно применение предлагаемой схемы восстановления. В зависимости от информационной обеспеченности лазерного зондирования интерпретация данных может быть осуществлена в различных вариантах использования схемы. Например, при использовании лидаров комбинационного рассеяния [8], которые одновременно могут получать информацию о профиле влажности, температуры и коэффициента обратного рассеяния, предполагаемая схема может быть использована в полной мере. В случае же одночастотных лидаров, работающих по моностатической схеме, весьма полезно иметь сведения о приземных значениях оптических характеристик и об общей оптической толще, а затем осуществить восстановление профиля во всем диапазоне высот.

Поскольку детальное описание возможных методик восстановления по данным лазерного зондирования представляет собой самостоятельную задачу и выходит далеко за рамки настоящей работы, ограничимся только высказанными соображениями, а при испытании предлагаемой схемы будем использовать те параметры, которые определялись в наших самолетных экспериментах.

Третий, основной, блок схемы непосредственно осуществляет восстановление вертикального профиля коэффициентов рассеяния аэрозоля. Отметим, что на этапе апробации возможностей и работоспособности предлагаемой схемы основной блок «восстановление по эмпирическим уравнениям» и блоки восстанавливаемых метеопараметров содержат эмпирические зависимости, параметры которых определены в рамках линейных регрессионных уравнений. Более детальный анализ связей и выбор оптимального сочетания входных параметров являются задачей следующего этапа формирования модели и в настоящей работе не рассматриваются.

В работе блока восстановления предусмотрен следующий порядок процедур. Задав внешние факторы – сезон, воздушную массу, время суток (в необходимой комбинации), входим в систему эмпирических уравнений. Если иная информация отсутствует, то из этого блока выводятся только средние значения вертикального профиля коэффициентов рассеяния сухой основы аэрозоля  $\sigma_d(H)$ .

Если же мы располагаем сведениями о приземных значениях коэффициента рассеяния (влажного «w» или сухого «d»), то вход в этот блок осуществляется через величину «сухого»  $\sigma_d(0)$ ; если же приземные измерения проведены для  $\sigma_w$ , предварительно рассчитывается  $\sigma_d(0)$  с использованием формулы Кастена–Хенела

$$\sigma_w = \sigma_d (1 - R)^{-\gamma}, \quad (1)$$

где  $R$  – относительная влажность воздуха;  $\gamma$  – параметр конденсационной активности.

Затем восстанавливается вертикальный профиль  $\sigma_d(H)$  через линейные эмпирические уравнения вида

$$\sigma_d(H) = K(H) \sigma_d(0) + C(H), \quad (2)$$

где  $K(H)$  и  $C(H)$  – эмпирические коэффициенты для соответствующего (по внешним факторам) массива наблюдательных данных.

При наличии информации о температуре воздуха (либо приземные значения  $T(0)$ , либо вертикальный профиль  $T(H)$ ) осуществляется коррекция эмпирических уравнений (1) с учетом высоты слоя перемешивания. В случае, когда измерено только приземное значение температуры  $T(0)$ , сначала определяется среднесуточное значение  $\bar{T}(0)$  с учетом среднего суточного хода температуры для соответствующего массива. Если имеются измерения вертикального профиля температуры  $T(H)$  в некотором слое высотой  $\tilde{H}$ , то рассчитывается интегральная величина  $\bar{T}_{\tilde{H}}$ . Затем по этим данным определяется высота слоя перемешивания  $H_k$  (в нашем случае «коррелированности») [2]:

$$H_k = 0,75 \exp[(4,5 \cdot 10^{-3} \tilde{H} + 6,5 \cdot 10^{-2}) \bar{T}_{\tilde{H}} + 0,2 \tilde{H}], \quad (3)$$

где  $\bar{T}_{\tilde{H}}$  – средняя температура слоя атмосферы, имеющего высоту  $\tilde{H}$ .

Затем проводится коррекция коэффициентов  $K(H)$  и  $C(H)$  в формуле (2). Коррекция осуществляется следующим образом. Если  $H_k < \bar{H}_k$  ( $\bar{H}_k$  – среднесезонная высота слоя «коррелированности»), то:

- до высоты  $H = H_k - 200$  м изменения в  $K(H)$  и  $C(H)$  не вносятся;
- производится экстраполяция «верхнего» участка зависимостей  $K(H)$  и  $C(H)$  от точки  $\bar{H}_k$  вниз до высоты  $H_k + 200$  м;
- на отрезке высот  $\Delta H = 400$  м (т.е. от  $H_k - 200$  м до  $H_k + 200$  м) производится линейная интерполяция между «нижним» и «верхним» участками зависимостей  $K(H)$  и  $C(H)$ .

Если  $H_k > \bar{H}_k$ :

- «нижний» участок зависимостей  $K(H)$  и  $C(H)$  экстраполируется от высоты среднесезонного слоя перемешивания  $\bar{H}_k$  до высоты  $H_k - 200$  м;
- строится линейная интерполяция на участке от  $H_k - 200$  м до  $H_k + 200$  м;
- на отрезке от  $H_k + 200$  м до 5 км изменения в  $K(H)$  и  $C(H)$  не вносятся.

После коррекции коэффициентов уравнения вычисляется вертикальный профиль  $\sigma_d(H)$ .

Далее рассчитываются коэффициенты рассеяния с учетом относительной влажности воздуха. Увлажнение  $\sigma_d(H)$  проводится по формуле (1), используя приземные  $R(0)$  или вертикальные  $R(H)$  значения относительной влажности воздуха (а в отсутствие такой информации – средние значения  $\bar{R}(H)$  для соответствующего массива). Величина параметра конденсационной активности  $\gamma$  либо задается исходя из внешних факторов, либо используется ее среднее значение  $\bar{\gamma}$  (в частности, во всех приводимых ниже примерах нами задавалась величина  $\bar{\gamma} = 0,5$ ).

В том случае, когда исследователь располагает измерениями общей оптической толщи  $\tau$ , схема предусматривает возможность учесть ее величину при восстановлении профиля  $\sigma(H)$ . В случае, когда известно только  $\tau$ , а измерения других параметров отсутствуют, осуществляется просто привязка среднесезонного профиля  $\bar{\sigma}(H)$  пропорционально отношению  $\bar{\tau}/\tau_{\text{изм}}$  (где  $\bar{\tau}$  и  $\tau_{\text{изм}}$  – среднесезонное и измеренное значения оптической толщи соответственно). При наличии других измеренных параметров в выбранной нами последовательности действий сначала рассчитывается  $\tau_{\text{восст}}$  по восстановленному профилю  $\sigma_{\text{в}}(H)$  в диапазоне высот от 0 до 5 км.

Затем из измеренных значений  $\tau_{\text{изм}}$  вычитается величина оптической толщи молекулярной атмосферы  $\tau_{\text{м}}$ , среднего значения  $\bar{\Delta}\tau_5$  остаточной оптической толщи для диапазона высот вы-

ше 5 км для среднециклической модели атмосферы [9] и величина оптической толщи, восстановленной по данной схеме, т.е.

$$\Delta\tau = \tau_{\text{изм}} - \tau_{\text{м}} - \Delta\bar{\tau}_5 - \tau_{\text{восст}} . \quad (4)$$

Вертикальный профиль коэффициента коррекции по  $\tau$  вычисляется в следующем виде:

$$K_{\tau}(H) = \frac{1}{\tau_{\text{восст}}} \int_{H-\Delta h}^{H+\Delta h} \sigma_{\text{восст}}(h) dh . \quad (5)$$

Далее осуществляется коррекция вертикального профиля коэффициента рассеяния:

$$\sigma(H) = \sigma_{\text{восст}}(H) + K_{\tau}(H) \Delta\tau / 2\Delta h . \quad (6)$$

Отметим, что выбор наиболее оптимального варианта использования  $\tau$  является задачей последующих работ, а его обоснование нуждается в экспериментальной проверке.

Для того чтобы проиллюстрировать работоспособность предложенной схемы и оценить ее чувствительность к входным параметрам, сначала обратимся к данным восстановления вертикального профиля для сухой основы аэрозольных частиц  $\sigma_d(H)$ .

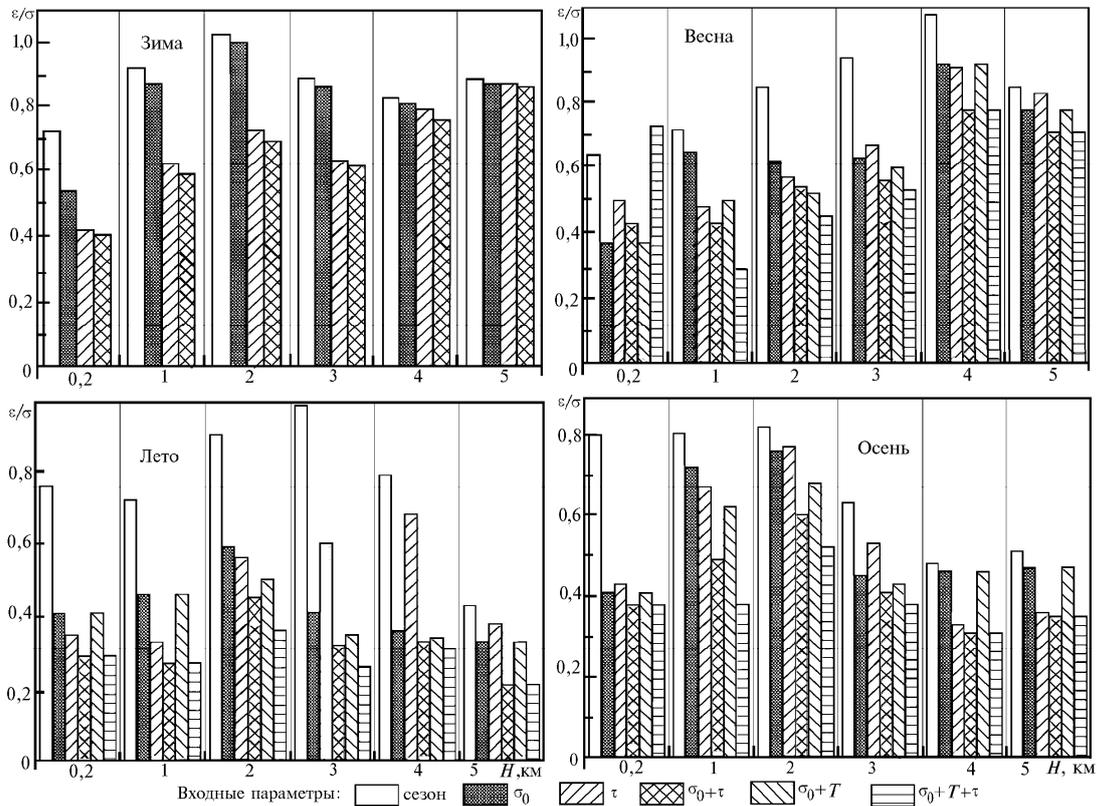


Рис. 2. Относительная ошибка восстановления вертикального профиля коэффициента рассеяния сухой основы аэрозоля для разных сезонов

На рис. 2 приведены величины относительных ошибок  $\varepsilon(H)/\bar{\sigma}(H)$ , полученных при восстановлении  $\sigma_d(H)$  на высотах 0,2, 1, 2, 3, 4 и 5 км для разных сезонов. Здесь  $\varepsilon(H)$  – среднеквадратическая ошибка восстановления, рассчитываемая по формуле

$$\varepsilon(H) = \frac{1}{N} \sum_i (\sigma_{\text{восст}, i}(H) - \sigma_{\text{изм}, i}(H))^2, \quad (7)$$

где  $\sigma_{\text{восст},i}(H)$  и  $\sigma_{\text{изм},i}(H)$  – восстановленное и измеренное значения коэффициента рассеяния соответственно. Первый столбец представляет собой среднеквадратическое отклонение данных в соответствующем сезонном массиве. Второй характеризует разброс значений при использовании величины приземного коэффициента рассеяния  $\sigma_d(0)$  в качестве входного параметра для восстановления  $\sigma_d(H)$ , третий – при применении только величины общей оптической толщины  $\tau$ , а четвертый – при совместном учете  $\sigma_d(0)$  и  $\tau$ . И наконец, в 5-м столбце (за исключением зимнего сезона) приведены ошибки восстановления, когда учтен  $\sigma_d(0)$  и восстановлена высота слоя перемешивания по профилю температуры  $T(H)$ . В 6-м столбце представлены гистограммы ошибок при совокупном учете  $\sigma_0$ ,  $T$  и  $\tau$ .

Из приведенных на рис. 2 данных видим, что, как и следовало ожидать из анализа коэффициентов автокорреляции  $\sigma_d(H)$ , наихудшее восстановление наблюдается для зимнего сезона, где уменьшение ошибки при совместном учете  $\sigma_d(0)$  и  $\tau$  составляет примерно 30%. Остальные массивы при этом восстанавливаются гораздо лучше. Учет высоты слоя перемешивания и  $\tau$  для летних данных позволяет снизить ошибку восстановления  $\sigma_d(H)$  до 30–35%, т.е. практически в 3–4 раза.

Незнание конкретного вертикального профиля относительной влажности воздуха  $R(H)$  заметно ухудшает точность восстановления значений  $\sigma_w$  *in situ*. На рис. 3 приведены соответствующие ошибки восстановления для двух случаев:

- 1) когда для расчета  $\sigma_w(H)$  используется средний профиль  $R(H)$  для соответствующего сезона;
- 2) когда по измеренному приземному значению относительной влажности воздуха профиль  $R(H)$  восстанавливается с использованием корреляционной связи между  $R(0)$  и  $R(H)$ .

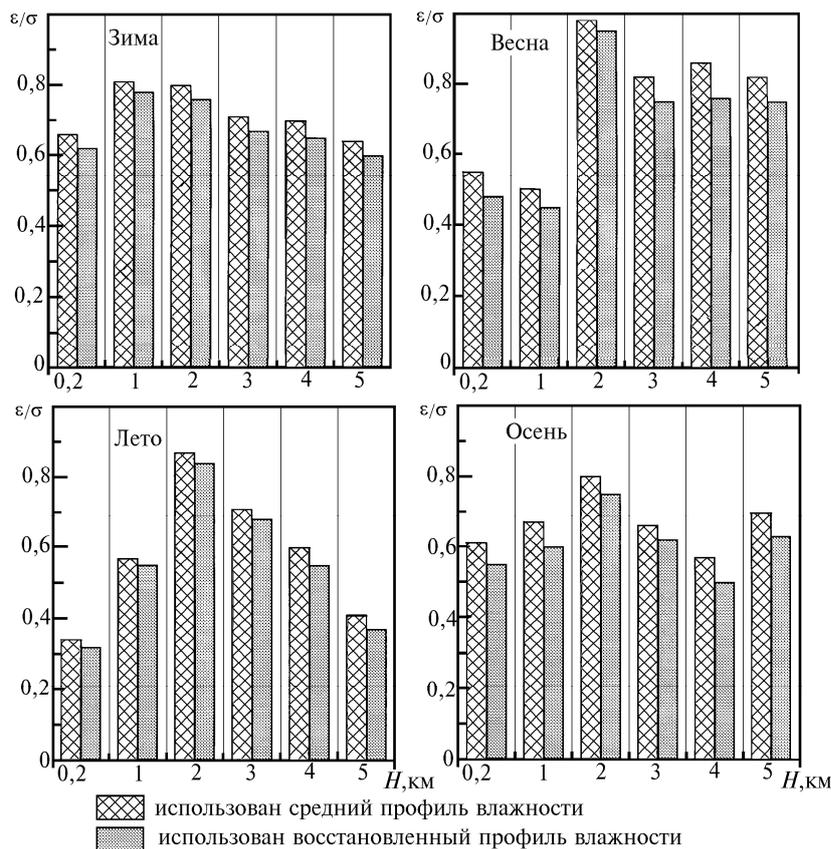


Рис. 3. Относительная ошибка восстановления вертикального профиля коэффициента рассеяния *in situ* для разных сезонов

Видим, что во втором случае средняя относительная ошибка восстановления несколько ниже. Не углубляясь далее в анализ ошибок (поскольку это будет целесообразно сделать при окончательном формировании модели), отметим, что проведенный анализ факторов изменчивости

показывает, что дополнительные возможности улучшения точности восстановления  $\sigma(H)$  связаны с учетом типа воздушной массы и суточного хода аэрозольных характеристик [3, 4].

Понятно, что на этом этапе формирования оптической модели аэрозоля, используя предложенную схему, мы можем напрямую восстановить только вертикальный профиль коэффициента рассеяния для одной длины волны (в нашем случае  $\lambda = 0,52$  мкм), что ограничивает ее практическую значимость. Однако необходимо напомнить, что в рамках разработанных для приземного слоя атмосферы однопараметрических моделей [10, 11] именно эта величина является входным параметром, по которому ведется восстановление всей совокупности оптических характеристик дымок в видимом диапазоне длин волн.

Полезность приведенного в данной работе анализа заключается в том, что на этом этапе удалось убедиться: учет проанализированных внешних факторов (сезон, типы воздушных масс, связь высоты слоя перемешивания с прогреваемостью атмосферы и т.д.) в сочетании с легко измеряемыми в наземных условиях оптическими параметрами позволяет рассчитывать на точности восстановления, которые вряд ли могут быть достигнуты иными способами. Более того, в том случае, когда исследователи располагают необходимым набором измеряемых входных параметров (приземными значениями  $\sigma(0)$ , оптической толщине  $\tau$ , вертикальным профилем температуры и относительной влажности воздуха), обсуждаемая схема позволяет осуществить оценку вертикального профиля коэффициента рассеяния и для других географических пунктов на континенте практически во все сезоны. Для иллюстрации этого вывода на рис. 4 представлены результаты восстановления средних вертикальных профилей  $\sigma_d(H)$  для различных районов, полученные в теплый период года.

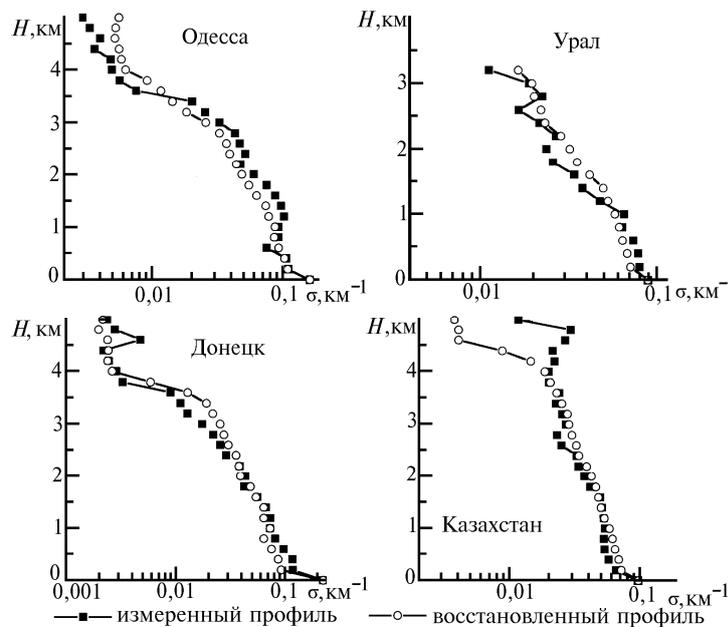


Рис. 4. Примеры восстановления средних вертикальных профилей  $\sigma_d(H)$  для различных регионов

Как видим, измеренные и восстановленные по нашей схеме данные неплохо согласуются друг с другом. Отметим еще один аспект, на который необходимо обратить внимание при оценке ошибок в анализируемой схеме. С увеличением высоты ошибки восстановления аэрозольных оптических параметров возрастают. В то же время в большинстве практических применений необходимо знать оптические характеристики воздуха, т.е. сумму аэрозольной и молекулярной компоненты. Это обстоятельство во многом способствует улучшению качества восстановления, поскольку с ростом высоты (при снижении содержания аэрозоля) увеличивается относительная доля вклада молекулярного рассеяния. На рис. 5 приведены среднесезонные вертикальные профили фактора мутности

$$F = (\sigma_a + \sigma_m) / \sigma_m, \quad (8)$$

где  $\sigma_a$  и  $\sigma_m$  – аэрозольный и молекулярный коэффициенты рассеяния соответственно.

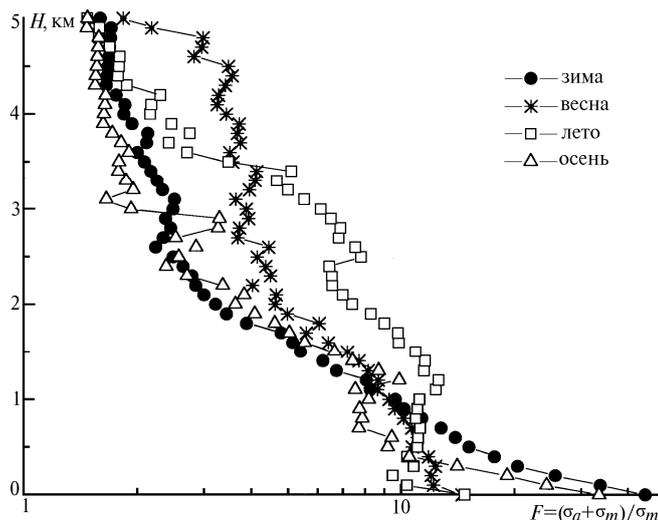


Рис. 5. Среднесезонные вертикальные профили фактора мутности

Видим, что уже, начиная с высоты 3 км, в этих массивах (кроме весеннего сезона) значение фактора мутности близко к 2, что означает снижение относительной ошибки восстановления для воздушного коэффициента рассеяния в 2 раза.

Проведенный нами полный анализ ошибок восстановления и некоторые примеры, представленные здесь, вселяют определенный оптимизм, что создана хорошая эмпирическая основа для разработки динамической модели оптических характеристик субмикронного аэрозоля (по крайней мере регионального масштаба) для континентальных условий.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (номер проекта 95-05-14195).

1. Панченко М. В., Терпугова С. А., Тумаков А. Г. и др. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. N 8. С. 1022–1032.
2. Панченко М. В., Терпугова С. А. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. N 8. С. 1033–1044.
3. Панченко М. В., Терпугова С. А. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. N 12. С. 1761–1766.
4. Панченко М. В., Терпугова С. А. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. N 6. С. 735–742.
5. Белан Б. Д., Зуев В. Е., Панченко М. В. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. N 1–2. С. 131–156.
6. Belan B. D., Panchenko M. V., Polkin V. V. // 4th International Aerosol Conference. Los Angeles, 1994. P. 871.
7. Зуев В. Е. Лазер-метеоролог. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 174 с.
8. Креков Г. М., Рахимов Р. Ф. Оптические модели атмосферного аэрозоля. Томск: Изд. ТФ СО АН СССР, 1986. 295 с.
9. Горчаков Г. И., Емиленко А. С., Свириденков М. А. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1981. Т. 17. N 1. С. 39–49.
10. Kabanov M. V., Panchenko M. V., Fadeev V. Ya. // JOSA. 1985. N 10. P. 1735–1740.
11. Веретенников В. В., Кабанов М. В., Панченко М. В. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1986. Т. 22. N 10. С. 1042–1049.

Институт оптики атмосферы СО РАН,  
Томск

Поступила в редакцию  
17 июля 1996 г.

**M. V. Panchenko, S. A. Terpugova. Procedure of Reconstructing the Scattering Coefficients for Lower Atmosphere.**

A general procedure is proposed for reconstructing the vertical profile of the scattering coefficient at  $\lambda = 0,52 \mu\text{m}$  within 0–5 km altitude range. The external factors like season, type of air mass, and time of a day are used as the initial parameters together with such measurement data as the scattering coefficient magnitude at the ground level, optical thickness, temperature, and relative humidity of the air. The procedure was constructed taking into account the correlation connections between values of the scattering coefficients at different altitudes and dependence of the mixing layer altitude on the temperature of lower atmosphere.

The errors of  $\sigma_a(H)$  and  $\sigma_w(H)$  reconstruction were analyzed for various sets of the external factors and input parameters.

The used approach is shown to provide the 30% lowering of the scattering coefficient reconstruction error for winter season and one-third or one-fourth for summer season compared to the observable mean square deviation of the parameter in the corresponding data sets.