

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

А.В. Ельников, В.В. Зуев, В.Н. Маричев

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ МАТРИЦЫ И СОБСТВЕННЫЕ ВЕКТОРЫ КОНЦЕНТРАЦИИ ОЗОНА, ОТНОШЕНИЯ РАССЕЯНИЯ АЭРОЗОЛЯ, ТЕМПЕРАТУРЫ И СКОРОСТИ ВЕТРА В СТРАТОСФЕРЕ

Методом ортогональных разложений (собственных векторов) проведен анализ ансамблей экспериментально измеренных лидарных вертикальных профилей концентрации озона и отношения рассеяния и шар-зондовых профилей температуры и скорости ветра. Собственные векторы данных стратосферных компонент и параметров оказались подобными.

Введение. В конце 50-х и начале 60-х гг. 20-го столетия был разработан и развит (на примере исследования метеорологических полей и геопотенциала) метод статистического анализа эмпирических функций, основанный на применении «естественных» ортогональных разложений [1, 2]. Суть метода в том, что поведение каждой конкретной функции ансамбля стационарных случайных функций (в данной статье по высоте H) может быть представлено в виде

$$R(H) = \overline{R(H)} + \sum_i k_i \cdot S_i(H),$$

где $\overline{R(H)}$ – средняя функция по ансамблю; k_i – случайные коэффициенты, имеющие размерность рассматриваемого параметра; $S_i(H)$ – система ортонормированных векторов (чаще всего в качестве этой системы используются собственные значения ковариационной или корреляционной матриц исследуемых ансамблей); i – размерность системы векторов. Из уравнения видно, что система ортонормированных векторов описывает переменную часть статистического ансамбля. При существовании в ансамбле обусловленных взаимосвязей основной вклад в переменную часть (более 70%) дают первые несколько векторов. Если подобная точность является приемлемой, то при разработке прогностических моделей исследуемых эмпирических функций можно ограничиваться учетом только этих векторов, сводя, таким образом, задачу прогноза к малопараметрической.

Активное развитие в 70–90-е гг. лазерного зондирования и его интенсивное внедрение в исследованиях атмосферы позволили применить метод статистического анализа эмпирических функций к данным лазерного зондирования стратосферного аэрозоля [3] и созданию малопараметрической оптической модели коэффициентов обратного рассеяния аэрозоля нижней тропосферы [4].

В данной статье на основе вышеупомянутого метода проводится анализ результатов лидарного зондирования стратосферных озона (O_3) и аэрозоля

(R), а также данных шар-зондовых измерений температуры (T) и скорости ветра (V). Для скорости ветра анализировались как меридиональная (V_m), так и зональная (V_z) составляющие. Однако отличий в их изменчивости отмечено не было. Поэтому в дальнейшем в статье рассматривается только меридиональная составляющая.

Лидарное зондирование озона и аэрозоля осуществлялось в Томске. Из лидарных данных восстанавливаемым параметром для озона (дифференциальная методика) является его концентрация, для аэрозоля (методика калибровки по молекулярному рассеянию) – отношение рассеяния (отношение суммы коэффициентов обратного молекулярного и аэрозольного рассеяний света к коэффициенту обратного молекулярного рассеяния). Конкретные реализации методик восстановления этих параметров из лидарных данных представлены в [5–7]. При восстановлении отношения рассеяния требуется знание реального профиля молекулярного рассеяния. Последний рассчитывался на основе данных вертикального распределения температуры и давления, полученных с метеостанций гг. Колпашева и Новосибирска, которые расположены от Томска соответственно 240 км на север и 210 км на юго-запад. Эти же вертикальные профили температуры, а также вертикальные профили скорости ветра использовались в качестве исходных данных для представленных в этой статье исследований.

Все исходные данные (O_3 , R , T , V_m) были аппроксимированы на километровую сетку в диапазоне высот 14÷31 км (для O_3 – 15÷32 км), что определило размерность системы ортогональных векторов 18.

В таблице представлены количество используемых для анализа вертикальных профилей (т.е. эмпирических функций) соответствующих компонент и параметров, а также временные периоды, в которые эти профили были получены. Наименьшее количество используемых высотных профилей температуры и скорости ветра (см. таблицу) определяется тем, что из имеющихся в распоряжении профилей метеозондирования (около 200) только 84 достигли высот, близких к 30 км.

Компонента, параметр	Кол-во профилей	Период времени
Отношение рассеяния	226	январь 1987 – июнь 1991
Озон	92	июль 1995 – июнь 1997
Температура	84	январь 1987 – июнь 1991
Ветер	84	январь 1987 – июнь 1991

Корреляционные матрицы. Корреляционные матрицы (КОМ) анализируемых ансамблей эмпирических функций, отражающие их *межуровневую взаимосвязь*, представлены на рис. 1 (кружками на нем отмечены области с коэффициентом корреляции меньше 0,5). Хотя все корреляционные матрицы между собой различаются, однако КОМ метеопараметров (температуры и скорости ветра) обла-

дают значительно большим подобием по сравнению с КОМ озона и отношения рассеяния. Вертикальный ход последних объединяет наличие участка с резким спадом взаимосвязи (в районе 20–22 км). Особенностью данного высотного диапазона, с точки зрения общей циркуляции атмосферы, является велопауза – слой, в котором летом происходит переход от западного переноса в тропосфере и нижней стратосфере к восточному переносу в вышележащих слоях атмосферы [8]. Следовательно, летом воздушные массы ниже и выше велопаузы сформированы в разных географических районах. Поэтому межуровневая взаимосвязь консервативных примесей (т.е. увлекаемых движением воздуха) на границе раздела слабее.

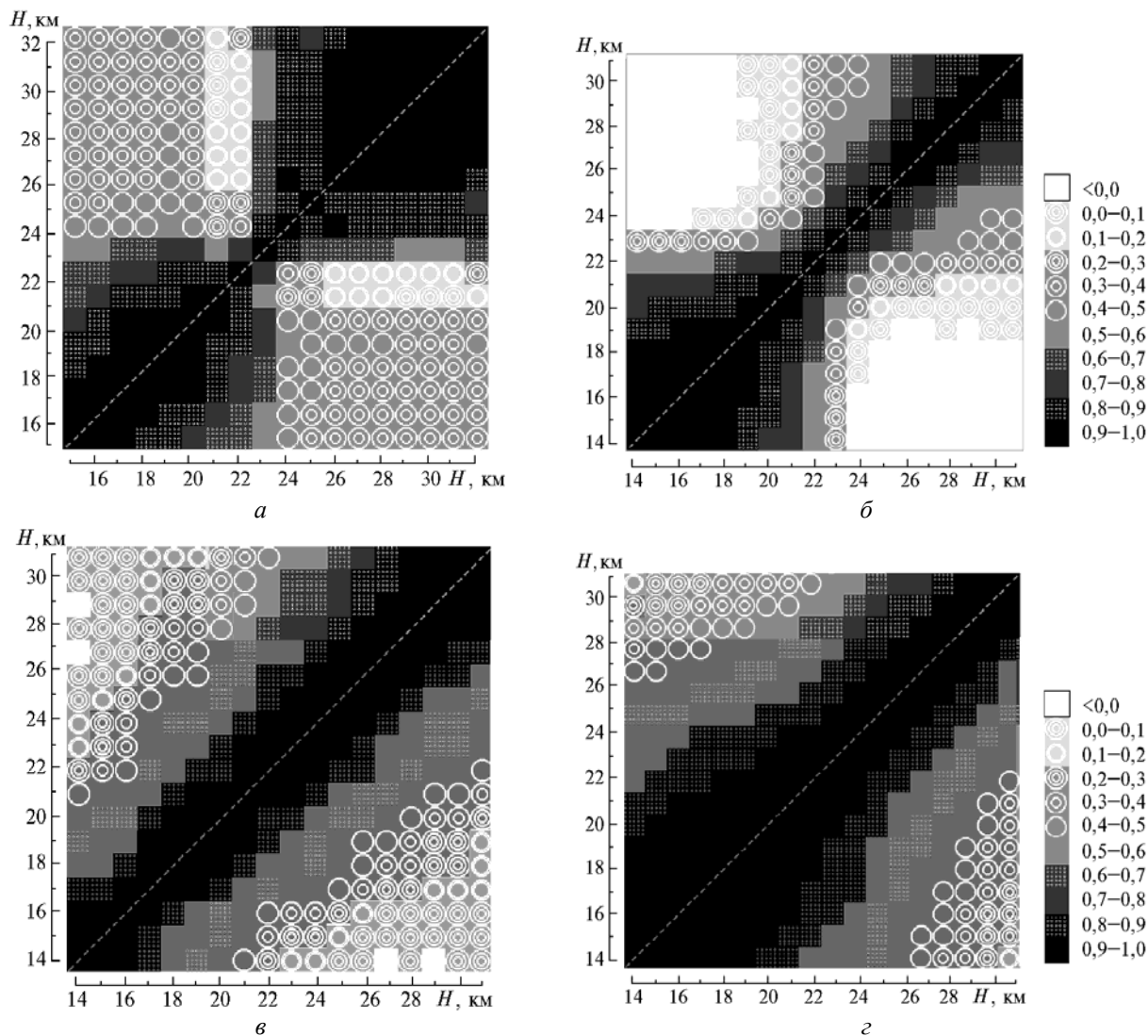


Рис. 1. Корреляционные матрицы концентрации озона (а), отношения рассеяния аэрозоля (б), температуры (в) и скорости ветра (з) в стратосфере

Для отношения рассеяния на нижнем участке (ниже 20 км) наблюдается более тесная взаимосвязь по сравнению с верхним, для концентрации озона – наоборот (см. рис. 1). Причем коэффициент корреля-

ции межуровневой взаимосвязи O_3 выше 26 км даже при разнесении уровней на 5 км не опускается ниже 0,9 (см. рис. 1). Этот факт, вероятно, отражает фотохимическое происхождение озона на этих высотах

под действием солнечного излучения, которое обуславливает тесно коррелированные вариации концентрации озона во всем диапазоне высот выше 26 км. Корреляционные матрицы метеопараметров температуры и скорости ветра по всему представленному диапазону иллюстрируют равномерный спад взаимосвязи. Значения межуровневой корреляционной матрицы давления во всем диапазоне 14–31 км больше 0,85.

Собственные векторы. В качестве системы ортонормированных векторов или собственных векторов (СВ), отражающих *высотную изменчивость* ансамбля эмпирических функций, рассматриваются собственные значения корреляционных матриц (см. рис. 1). Гистограммы вкладов СВ в общую изменчивость соответствующих стратосферных параметров представлены в верхней части рис. 2. Из гистограмм хорошо виден доминирующий вклад первых векторов (S_1) метеопараметров в общую изменчивость (S_1 температуры превышает вклад второго вектора (S_2) больше чем в два раза, S_1 скорости ветра – в три раза). В то время как для озона и тем более для отношения рассеяния вклад второго вектора в общую изменчивость существенно больше. В целом для анализируемых ансамблей эмпирических функций первые три вектора определяют более 80% изменчивости.

Вертикальная структура этих векторов представлена в нижней части рис. 2. Как видно из рисунка, для всех анализируемых параметров каких-либо существенных отличий между вертикальными ходами вторых, а также третьих векторов не наблюдается

Среди группы первых векторов наибольшая идентичность имеет место между векторами концентрации озона и температуры. В то время как S_1 отношения рассеяния обладает наибольшим отличием в этой группе. Для этого вектора, в уже упоминавшемся при анализе корреляционных матриц диапазоне высот 20–22 км, имеет место резкое изменение его величины. На высотном участке протяженностью 3 км (от 20 до 23 км) значения S_1 изменяются от $-0,15$ до $-0,3$.

Подобие в общих чертах собственных векторов O_3 , T и V_m (в определенной степени и R) указывает на существование единого механизма изменчивости исследуемых ансамблей эмпирических функций. Таким механизмом для данных стратосферных параметров является общая циркуляция атмосферы. Наибольшие отличия S_1 отношения рассеяния свидетельствуют о дополнительной причине, влияющей на динамику стратосферного аэрозоля.

Сезонные собственные векторы отношения рассеяния. Наличие 226 профилей отношения рассеяния и их неравномерное, но все же какое-то распределение по сезонам позволили рассмотреть сезонные вариации собственных векторов отношения рассеяния. Гистограммы и собственные векторы отношения рассеяния для зимы, весны, лета и осени представлены на рис. 3. Из рисунка видно хорошее совпадение первых векторов зимы, лета и осени между собой и, более того, подобие их высотного хода первым собственным векторам озона, температуры и скорости ветра, рассчитанным в целом за год (см. рис. 2).

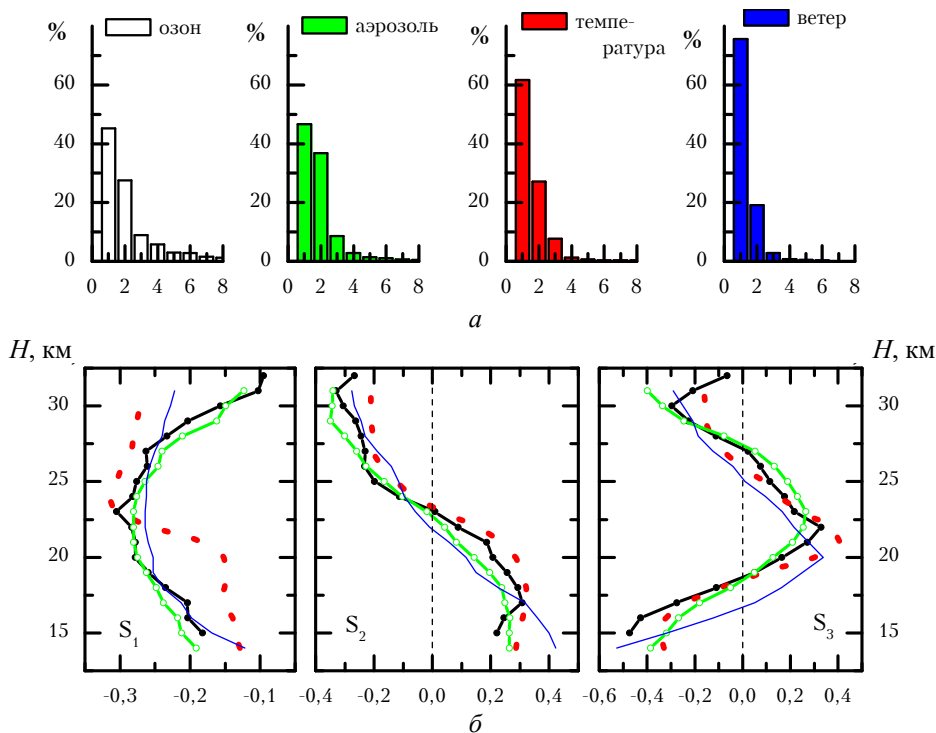


Рис. 2. Гистограммы вкладов собственных векторов корреляционных матриц озона, отношения рассеяния, температуры и скорости ветра в их общую изменчивость (а). Первые три (S_1 – первый, S_2 – второй, S_3 – третий) собственных вектора корреляционных матриц концентраций озона (—●—), отношения рассеяния (—□●□—), температуры (—○—) и скорости ветра (—) в стратосфере (б)

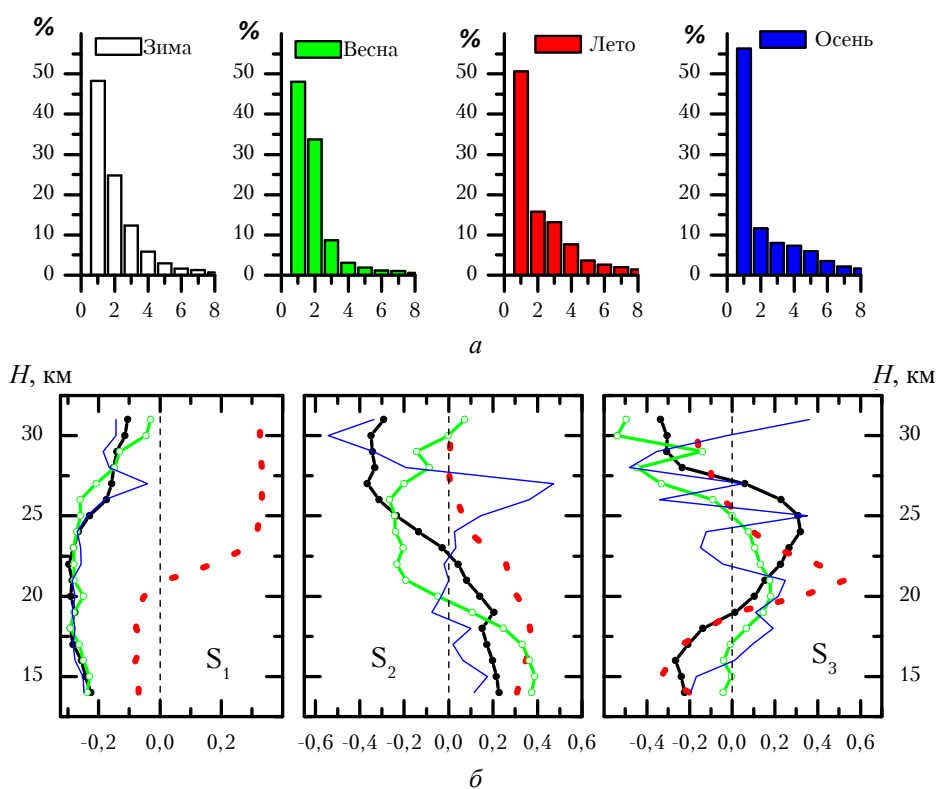


Рис. 3. Гистограммы вкладов собственных векторов сезонных корреляционных матриц отношения рассеяния в общую изменчивость (а). Первые три (S_1 – первый, S_2 – второй, S_3 – третий) собственных вектора корреляционных матриц отношения рассеяния для зимы (—●—), весны (●□●□●□●□●□●□●□●□●) (б), лета (—○—) и осени (—) (б)

Наименьшее число профилей (30) имелось для осеннего периода. Это привело к сильной вариабельности осенних второго и третьего векторов отношения рассеяния, обусловленной малой статистической обеспеченностью. Хотя характерные сезонные отличия S_2 , S_3 , в частности между зимой и летом, просматриваются достаточно хорошо. Летом высотные ходы S_2 , S_3 повторяют структуры S_2 , S_3 зимнего периода, но с неким запаздыванием по высоте.

Собственные же векторы весеннего периода имеют совершенно иную структуру по сравнению с собственными векторами других сезонов. И именно весенний период привел к резкому градиенту первого вектора отношения рассеяния в диапазоне высот 20–23 км (см. рис. 2).

Механизм, приводящий к такому существенно отличию первого собственного вектора весеннего периода от первых собственных векторов других сезонов, а также от других исследуемых параметров и компонент атмосферы, требует дополнительных исследований.

Заключение. Таким образом, в вертикальном ходе собственных векторов корреляционных матриц концентрации озона, отношения рассеяния (исключая весенний период), температуры и скорости ветра, рассчитанных по данным, полученным над территорией Западной Сибири, имеет место идентичность. Поскольку собственные векторы отражают изменчивость

анализируемых с их помощью параметров, то их подобие свидетельствует о единой природе изменчивости. Для исследуемых в статье параметров таким процессом является *общая циркуляция стратосферы*.

При разложении по системе собственных значений корреляционных матриц для термодинамических параметров стратосферы температуры и скорости ветра наблюдается более быстрая сходимость, соответственно $S_1 = 61,6$, $S_2 = 27,1$, $S_3 = 7,6\%$ и $S_1 = 75,7$, $S_2 = 19,1$, $S_3 = 2,7\%$, по сравнению с компонентами стратосферы: концентрации озона ($S_1 = 45,3$; $S_2 = 27,6$; $S_3 = 8,9\%$) и отношения рассеяния, отражающего содержание аэрозоля ($S_1 = 46,7$; $S_2 = 36,9$; $S_3 = 8,5\%$). При создании трехпараметрической статистической региональной модели вертикального распределения температуры, скорости ветра, концентрации озона и отношения рассеяния в стратосфере точность прогноза данных моделей будет для термодинамических параметров более 95%, а для компонент, соответственно, более 80 и более 90%.

1. Багров И.А. // Тр. ЦНП. 1959. Вып. 74. С. 3–24.
2. Обухов А.М. // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1960. Вып. 3. С. 432–439.
3. Иванов А.П., Хмелевцов С.С., Чайковский А.П., Щербаков В.Н. // Известия РАН. Сер. ФАО. 1993. Т. 29. N 1. С. 82–85.
4. Белан Б.Д., Гришин А.И., Матвиенко Г.Г., Самохвалов И.В. Пространственная изменчивость характеристик атмосферного аэрозоля. Новосибирск: Наука, 1989. 152 с.

5. Ельников А.В., Зуев В.В., Катаев М.Ю., Маричев В.Н., Мицель А.А. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. N 6. С. 576–587.
6. Ельников А.В., Зуев В.В. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. N 9. С. 1050–1054.

7. Ельников А.В., Зуев В.В., Маричев В.Н. // Оптика атмосферы. 1991. Т. 4. N 2. С. 201–209.
8. Хромов С.П., Мамонтова Л.И. Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 568 с.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
10 сентября 1998 г.

A.V. Elnikov, V.V. Zuev, V.N. Marichev. Correlation Matrices and Eigenvectors of Ozone Concentration, Aerosol Scattering Ratio, Wind Temperature and Velocity in the Stratosphere.

By means of orthogonal expansion (eigenvectors), the ensembles of vertical profiles of the ozone concentration measured experimentally with lidars use as well as ratios of scattering, temperature, and wind velocity profiles, obtained with sounding ballon, have been analyzed.

The eigenvectors of these stratospheric components and parameters occure to be similar.