

**Б.Д. Белан, Г.О. Задде, А.И. Кусков**

## **ДОЛГОПЕРИОДНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ АТМОСФЕРЫ**

Рассматриваются методы выделения долгосрочных составляющих в рядах среднемесячных значений спектральной прозрачности атмосферы. Показано, что наиболее оптимальной аппроксимацией тренда являются полиномы первой или второй степени.

Как известно [1, 2], при учете воздействия атмосферы на распространяющееся в ней оптическое излучение, при выборе районов с наиболее оптимальными условиями для работы оптических систем, а также при разработке методик прогноза оптической погоды необходимо иметь сведения о режиме спектральной прозрачности атмосферы на заданной территории.

Исследования спектральной прозрачности на территории СССР по измерениям прямой солнечной радиации с использованием стеклянных фильтров Шотта проводились В.А. Березкиным, Ф.А. Белецким, Н.Н. Калитиным и другими [3–5]. В работах Е.В. Пясковской-Фесенковой, Т.П. Тороповой, Г.Ш. Лившица, Г.П. Пановой применен метод изучения спектральной прозрачности атмосферы по измерениям околосолнечных ореолов ореольным фотометром В.Г. Фесенкова [6–8].

В [9] сведения о спектральной прозрачности получены с помощью фотометров на базе телескопов. В дальнейшем исследования спектральной прозрачности проводились с использованием интерференционных фильтров, предложенных Н.И. Никитской [9]. С применением этой методики были проведены наблюдения за спектральной прозрачностью атмосферы в различных пунктах [10, 11].

Создание сети озонометрических станций [12] открыло совершенно новые возможности исследования спектральной прозрачности атмосферы. Измерения, проводившиеся на всей территории СССР одновременно одинаковыми сверенными приборами по единой методике, позволяют исследовать пространственную и временную структуру спектральной прозрачности и ее составляющих.

К настоящему времени опубликованы результаты измерений спектральной прозрачности атмосферы за 17 лет (1972–1988 гг.) на 46 озонометрических станциях, расположенных на территории России и сопредельных стран [13]. Данные в [13] представлены в виде среднесуточных (среднедневных) значений спектральной прозрачности, относящихся к длинам волн от 326 до 638 нм. Временные ряды спектральной прозрачности не являются непрерывными. Пропуски в рядах обусловлены различными причинами, но к объективным можно отнести закрытость Солнца облаками и низкую высоту Солнца. Согласно [12] измерения проводятся лишь в том случае, когда высота Солнца над горизонтом превышает  $10^\circ$ . По этой причине на станциях, расположенных в высоких широтах, наблюдения в зимние месяцы не проводятся.

Обобщение результатов измерений, полученных на озонометрической сети, проводилось в [14, 15]. Однако эти исследования были посвящены в основном вопросам пространственного распределения характеристик спектральной прозрачности атмосферы по территории СССР. Проблемы, относящиеся к временной структуре рядов спектральной прозрачности атмосферы, в работах почти не затронуты. Исключение составляет [15], в которой авторы на основании сравнения энергетических спектров изменения аэрозольной толщи и спектральной прозрачности атмосферы объясняют временные колебания спектральной прозрачности аэрозольным ослаблением.

Следует отметить, что этот вывод относится к высокочастотной части спектра (периоды изменений колеблются в диапазоне от 2 до 60 суток). Долгосрочные и низкочастотные изменения спектральной прозрачности до настоящего времени не исследованы. В этой связи на-

шей задачей является разработка и обоснование методик выделения долгопериодной составляющей спектральной прозрачности атмосферы для длин волн 334, 369, 530, 572 и 627 нм.

Для исследования использовались временные ряды спектральной прозрачности за 17-летний период (1972–1988 гг.), полученные на станции Омск. Пропуски в этих рядах обусловлены наличием облачности и широтой расположения станции (55°с.ш.). Поэтому информация о спектральной прозрачности в январе, феврале и ноябре, декабре отсутствует. Такая структура наблюдений характерна для средней полосы России. В этом плане временные ряды спектральной прозрачности на станции Омск можно считать репрезентативными для всей средней полосы России.

Большая часть теории временных рядов посвящена разложению их на компоненты и отдельному изучению каждой из них. Типичные временные ряды складываются из четырех составляющих: тренда, колебаний около тренда с большей или меньшей регулярностью, эффекта сезонности и случайной, несистематической или нерегулярной компоненты [16, 17]. В сумме эти компоненты дают исходный временной ряд.

Из всех приведенных компонент труднее всего определить понятие тренда. Вообще под трендом понимают некоторое устойчивое изменение в течение долгого периода. Однако понятие <долгий> очень относительно. Как бы ни был велик временной ряд, никогда нельзя быть уверенным, что тренд не является частью медленного колебательного процесса. Таким образом, говоря о тренде, необходимо иметь в виду длину ряда, к которому он относится.

Во многих исследованиях [16–19] под трендом понимают изменения, которые можно описать полиномом. В зависимости от степени полинома и способа его применения большинство исследований на эту тему можно условно разделить на три группы.

Первая группа исследователей описывает тренды временных рядов полиномами высоких степеней (третья степень и выше), используя при этом для расчета коэффициентов полинома все члены ряда. Анализ работ этой группы приведен в обзоре [19]. В результате применения полинома высокой степени получается непериодическая функция, отражающая скрытые долгопериодные колебания временного ряда. Однако такой подход имеет свои недостатки. Во-первых, завышается вес начальных и конечных точек ряда. Поэтому величина тренда на начальных и конечных участках ряда больше, чем на внутренних участках. При таком подходе применение полученного полинома для экстраполяции тренда может оказаться необоснованным. Во-вторых, добавление новых точек к ряду или изменение степени полинома требуют перерасчета коэффициентов полинома и, соответственно, изменения анализа. В-третьих, никакой полином не имеет горизонтальной асимптоты, поэтому возможная ситуация отсутствия тренда в будущем невоспроизводима.

Вторая группа исследователей [16, 17] альтернативой к нахождению полинома, представляющего ряд целиком, предлагает использование скользящей полиномиальной аппроксимации для части ряда. Подобная аппроксимация временного ряда имеет те преимущества, что можно произвольно устанавливать период, для которого рассчитывается тренд, а также выбирать степень аппроксимирующего полинома. Кроме того, при добавлении новых членов ряда нет необходимости переоценивать прошлые значения тренда. Иногда скользящую полиномиальную аппроксимацию называют фильтром низких частот. Скользящие полиномы сглаживают периодические составляющие высокой частоты (малые периоды изменений) и оставляют нетронутыми низкие частоты. Однако при таком подходе основным условием является отсутствие пропусков членов ряда, кроме того экстраполяция величины тренда на будущее не является простой задачей.

Третья наиболее многочисленная группа исследователей предлагает аппроксимировать временной ряд полиномом первой степени или линейной функцией [20, 21]. Авторы этой группы определяют параметры линейного тренда для всего временного ряда [20] или его части [21]. При этом авторы [21] предлагают алгоритм выделения внутри временного ряда участков с линейным трендом. По их мнению, предложенный алгоритм позволяет оптимизировать процесс поиска новых эмпирических фактов о смене режимов функционирования системы.

В этой связи задача исследования состояла в том, чтобы на примере временных рядов спектральной прозрачности в Омске выделить тренды, используя различные способы его получения.

Для выявления долгосрочных трендов целесообразен переход от временных рядов среднесуточных значений к рядам средних месячных значений спектральной прозрачности. Однако статистическая структура ряда при таком переходе изменится, и эти изменения необходимо учитывать. Тем более, что средние месячные значения прозрачности рассчитывались по раз-

ному числу наблюдений. При этом количество наблюдений от месяца к месяцу колеблется в широких пределах от 2 до 24 (ст. Омск).

Для выявления соответствия структуры рядов среднесуточной и среднемесячной спектральной прозрачности атмосферы рассчитывались стандартные статистические характеристики, приведенные в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Характеристики статистической структуры рядов среднесуточной спектральной прозрачности для различных длин волн

Длина волны, нм	Среднее значение, %	Дисперсия, %	95%-й доверительный интервал среднего	Минимум	Максимум
334	39,4	52,9	(39,0; 39,8)	12	66
369	43,2	61,0	(42,8; 43,7)	14	65
530	68,8	91,9	(68,3; 69,3)	31	92
572	69,8	82,4	(69,3; 70,3)	33	88
627	73,5	111,5	(73,0; 74,1)	36	98

Таблица 2

Сравнительные характеристики статистической структуры рядов среднемесячной и среднесуточной спектральной прозрачности для различных длин волн

Длина волны, нм	Среднее значение, %	Дисперсия, %	Отношение дисперсий	Минимум	Максимум
334	40,2	19,39	2,73	29,7	52,6
369	44,3	25,02	2,44	32,1	58,8
530	70,3	46,73	1,97	54,3	86,0
572	71,2	41,44	1,99	55,1	84,6
627	75,2	68,64	1,62	55,8	92,0

Из анализа табл. 1 и 2 следует, что средние значения прозрачности, рассчитанные по рядам среднесуточных и среднемесячных значений, практически не отличаются. В то же время дисперсии рядов среднемесячных значений прозрачности для различных длин волн в 1,62–2,73 раза меньше дисперсий среднесуточной прозрачности. Отношение дисперсии уменьшается с увеличением длины волны. Это свидетельствует о том, что короткопериодные колебания прозрачности, обусловленные сменой воздушных масс, более выражены для коротких волн. В целом 40–60% дисперсии среднесуточных значений прозрачности в зависимости от длины волны определяются процессами, продолжительностью меньше календарного месяца. Остальная доля дисперсии определяется колебаниями с периодами более месяца. При переходе от рядов среднесуточной к рядам среднемесячной прозрачности уменьшается также амплитуда колебаний членов ряда.

Для выделения долгосрочных трендов из временных рядов среднемесячной спектральной прозрачности была применена линейная или полиномиальная аппроксимация. Использовать приемы, основанные на скользящей аппроксимации, не представлялось возможным ввиду пропусков в наблюдениях.

При разложении временного ряда на тренд и отклонения от тренда (остатки) с использованием полиномиальной аппроксимации полученные компоненты не коррелируют между собой. Поэтому дисперсия исходного ряда равна сумме дисперсий тренда и остатков. Это положение позволяет оценивать вклад тренда в общую дисперсию ряда.

С помощью метода наименьших квадратов нами были получены коэффициенты полинома

$$Y_t = Y_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \dots \quad (1)$$

При этом степень полинома изменялась от 1 до 4. Дисперсионная характеристика тренда приведена в табл. 3, из анализа которой следует, что в зависимости от длины волны и степени полинома долгосрочный тренд определяет от 7,1 до 25,7% дисперсии. Как и следовало ожидать, с увеличением степени полинома возрастает доля описанной дисперсии, но этот рост имеет различный характер в зависимости от длины волны. С увеличением длины волны происходит заметное снижение роста доли дисперсии при увеличении степени полинома. Так, для длины волны, равной 344 нм, изменение степени полинома с 1 до 4 увеличивает долю

дисперсии тренда в 2,7 раза, для  $\lambda=627$  нм дисперсия увеличивается всего в 1,1 раза. Более изменчивая спектральная прозрачность для коротких длин волн, по-видимому, определяется значительным вкладом долгопериодных колебаний.

Таблица 3

Доля дисперсии (%), обусловленная долгопериодными трендами, описанными полиномами различных степеней для разных длин волн

Длина волны, нм	Степень полинома			
	1	2	3	4
344	7,1	11,1	11,1	19,6
369	11,9	15,2	15,6	25,7
530	15,4	18,9	20,4	23,4
572	16,9	21,7	23,1	23,2
627	13,8	15,7	16,2	16,4

Аппроксимация тренда полиномами высоких степеней позволяет в отличие от линейного тренда выделить внутри временного ряда участки с одинаковой тенденцией его значений, потому что на отдельных временных участках ряда скорость изменения прозрачности может увеличиваться, уменьшаться или оставаться постоянной. Полиномы более высоких степеней, начиная со 2-й степени, позволяют определить временные интервалы различного поведения прозрачности.

На рис. 1, 2 представлены графики временного хода прозрачности атмосферы для длины волны 530 нм и трендов, аппроксимированных полиномами первой, второй (рис. 1, штриховая кривая – полином первой степени, сплошная – второй степени) и третьей, четвертой степеней (рис 2, штриховая – полином третьей степени, сплошная – четвертой).

Визуальный анализ графиков показывает, что тренды прозрачности, выраженные полиномами 2-й и более степеней, имеют участки роста и падения величины прозрачности. Причем тренды прозрачности, полученные с применением полинома выше третьей степени, имеют волнообразный характер.

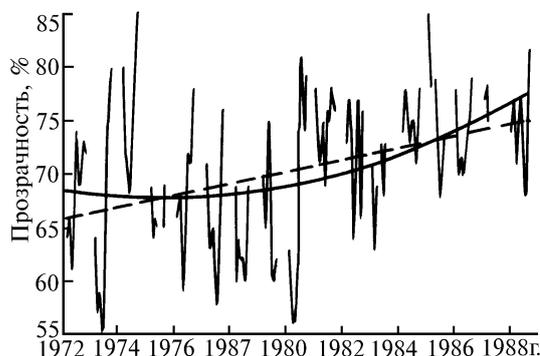


Рис. 1

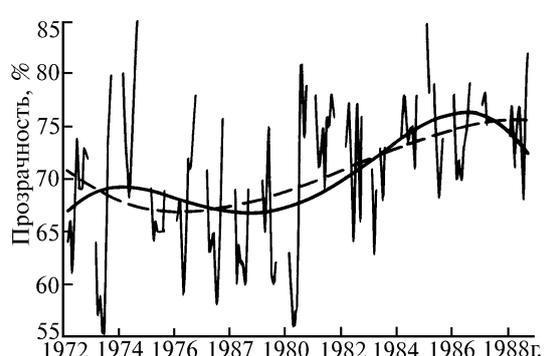


Рис. 2

Если принять гипотезу, что изменения прозрачности складываются из тренда, колебаний около тренда с большей или меньшей регулярностью, эффекта сезонности и случайной компоненты, то становится ясным, что тренд не может иметь волнообразную форму. Из этого следует, что при выделении тренда в рядах среднемесячной спектральной прозрачности следует ограничиваться полиномами первой или второй степени.

Аппроксимация тренда линейной функцией имеет свои недостатки и преимущества перед аппроксимацией полиномами высоких степеней. Основным недостатком является монотонный характер линейной функции. В то же время линейные тренды легко экстраполируются, что позволяет прогнозировать тенденцию изменения прозрачности.

В табл.4 приведены значения относительного линейного тренда спектральной прозрачности для пяти рассмотренных длин волн, а также границы 95%-х доверительных интервалов.

Из анализа табл.4 следует, что в течение 17-летнего периода (с 1972 по 1988 г.) наблюдался рост прозрачности атмосферы для всех рассматриваемых длин волн. На уровне 5% величина относительного тренда статистически значима. Отмечается также рост относительного тренда с увеличением длины волны.

Сравнение оценок относительного линейного тренда для различных длин волн

Характеристика	Длина волны, нм				
	334	369	530	572	627
Относительный тренд	0,23	0,35	0,55	0,54	0,66
Нижний предел	0,08	0,18	0,32	0,33	0,38
Верхний предел	0,39	0,52	0,77	0,75	0,93

Проведенное исследование позволило установить, что в изменение спектральной прозрачности значительный вклад вносят колебания с периодами более 30 дней. Прозрачность атмосферы для всех рассмотренных длин волн в Омске имеет тенденцию к увеличению. Показано, что наиболее подходящим выражением для аппроксимации тренда являются полиномы первой или второй степени.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код темы 93 – 05 – 14103).

1. Зуев В. Е. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере. М.: Советское радио, 1970. 496 с.
2. Зуев В. Е. Распространение лазерного излучения в атмосфере. М.: Радио и связь, 1981. 288 с.
3. Березкин В. А. Применение фильтров в актинометрии и методика наблюдения с ними. Геофизика, 1932. Вып. 3. С. 12 – 17.
4. Белецкий Ф. А. // Метеорология и гидрология. 1939. N 10, 11. С. 113 – 118.
5. Калигин Н. Н. // Природа, 1947. N 1. С. 56 – 59.
6. Пясковская - Фесенкова Е. В. Исследование рассеяния света в земной атмосфере. М.: Наука, 1957. 216 с.
7. Торопова Т. П. // Изв. АФИ АН КазССР. 1958. Т.6. С.34 – 42.
8. Лившиц Г. Ш. Рассеяние света в атмосфере. Алма-Ата: Наука, 1965. 175с.
9. Никитская Н. И. // Тр. ГГО. 1951. Вып. 26. С.126–135.
10. Бартенева О. Д., Никитская Н. И., Полякова Е. А. Тр. ГГО. 1969. Вып. 237. С. 3–17.
11. Гущин Г. П. // Метеорология и гидрология. 1979. N 3. С.111–116.
12. Гущин Г. П. Методические указания. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 53с.
13. Общее содержание атмосферного озона и спектральная прозрачность атмосферы. Справочные данные за 1972–1988 гг. Под ред. Г.П. Гущина. Л.: Гидрометеиздат.
14. Гущин Г. П., Павлюченкова Т. А., Ромашкина К. И. // Тр. ГГО. 1977. Вып. 384. С.50–53.
15. Белан Б. Д., Задде Г. О. Спектральная прозрачность и аэрозольное ослабление над территорией СССР. Томск: ТФ СО АН СССР, 1988. 180 с.
16. Кендал М., Стюарт А. Многомерный статистический анализ и временные ряды. М.: Наука, 1976. 736 с.
17. Кендал М. Временные ряды. М.: Финансы и статистика, 1981. 199 с.
18. Груза Г. В., Рейтенбах Р. Г. Статистика и анализ гидрометеорологических данных. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 216 с.
19. Груза Г. В. Колебания климата и хозяйственная деятельность человека. Гидрометеорология. Серия метеорология. Обзорная информация. Вып. 3. Обнинск, ВНИИГМИ–МЦД, 1979. 60 с.
20. Поляк И. И. Методы анализа случайных процессов и полей в климатологии. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 280 с.
21. Радюхин В. Г., Шиленко В. В. // Труды ВНИИГМИ–МЦД. 1988. Вып. 147. С.3–13.

Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск  
Томский государственный университет

Поступила в редакцию  
24 декабря 1993 г.

#### **B. D. Belan, G. O. Zadde, A. I. Kuskov. Long-Term Variations of the Atmospheric Spectral Transparency.**

Methods of selecting the long-term components from the series of monthly means of the atmospheric spectral transparency are discussed in the paper. The polynomials of the first and second degree are shown to be the best approximations of the trend.