

Б.Д. Белан, Г.О. Задде, А.И. Кусков

## СПЕКТРЫ ВАРИАЦИЙ ПРОЗРАЧНОСТИ АТМОСФЕРЫ

Методом спектрального анализа исследуются временные вариации спектральной прозрачности атмосферы и ее составляющих. Выявлены скрытые периодичности, которые соизмеримы с колебаниями атмосферных параметров синоптического масштаба.

При разработке методик прогноза оптического состояния воздуха для разных оптических систем, работающих в атмосфере, необходимо иметь сведения о пространственной и временной изменчивости оптических величин, что позволяет определить границы, в которых изменяется та или иная величина, наиболее вероятные ее значения, характерные периоды колебания, возможный предел предсказуемости и т.д. В настоящее время довольно хорошо изучены пространственные и временные спектры колебаний значений большинства метеорологических характеристик [1].

Относительно оптических характеристик воздуха имеются лишь отдельные высказывания, основанные на взаимосвязи оптических и метеорологических величин [2]. Согласно [1] весь спектр периодов колебаний метеорологических величин можно разделить на 9 интервалов: микро-метеорологический (период колебаний от доли секунды до минуты), мезометеорологический (от минут до часа), синоптический (от десяти часов до нескольких дней), глобальный (от недель до месяцев), сезонный (колебания с годовым периодом), междугодичный (несколько лет), внутривековой (несколько десятков лет), междувековой (несколько веков), ледниковый (периоды колебаний составляют тысячи и десятки тысяч лет).

Учитывая взаимосвязь оптических и метеорологических величин [2, 3], можно ожидать, что колебания с такими же периодами будут характерны и для оптических величин. Однако систематические измерения оптических величин охватывают сравнительно небольшой период, и поэтому приходится ограничиваться при рассмотрении более короткими временными интервалами. Тем не менее эти данные подтверждают синхронность колебаний оптических и метеорологических величин. Так, в [4] получено, что периоды изменения качества изображения звезд соответствуют периодам колебаний температуры воздуха и скорости ветра.

Настоящая статья посвящена исследованию скрытых периодичностей во временных рядах спектральной прозрачности всей толщи атмосферы, а также некоторых составляющих спектрального ослабления воздуха. В качестве исходных данных были взяты результаты наблюдений за спектральной прозрачностью атмосферы на озонометрической сети бывшего СССР. Составляющими спектрального ослабления, рассмотренными в статье, являются оптическая толщина атмосферы, обусловленная поглощением водяного пара и найденная по данным аэрологического зондирования, и остаточная аэрозольная оптическая толщина, получаемая как

$$\tau_{\lambda a} = \tau_{\lambda} - \tau_{\lambda m} - \tau_{\lambda o_3} - \tau_{\lambda в.п.}$$

где  $\tau_{\lambda}$  – оптическая толщина атмосферы по данным измерений;  $\tau_{\lambda m}$  – оптическая толщина, обусловленная молекулярным рассеянием сухой чистой атмосферы;  $\tau_{\lambda o_3}$ ,  $\tau_{\lambda в.п.}$  – оптические толщины, определяемые поглощением озона и водяного пара соответственно.

Выявление скрытых периодичностей перечисленных рядов осуществлялось по данным об амплитудном спектре:

$$A_{S_i}(k) = \sqrt{B_k^2 + C_k^2}$$

где

$$B_k = \frac{2}{T} \sum_{i=1}^T S_i \cos(k i); \quad C_k = \frac{2}{T} \sum_{i=1}^T S_i \sin(k i);$$

$k$  – текущее значение параметра;  $S_i$  – спектральная прозрачность;  $T$  – период расчета;  $i = 1, 2, 3, \dots$ .

Значимость полученных на спектральной кривой амплитуд проверялась с помощью критерия, предложенного в [5]:

$$(A_{S_i})_{0,05} = \frac{2 (\ln 20 k)^{1/2} \sigma_{S_i}}{\sqrt{n}},$$

где  $n$  – номер амплитуды;  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение.

Полученные по этой методике данные подвергались потом сглаживанию. Для этого использовалась формула Блекмана и Тьюки:

$$A'_{S_i} = 0,25 A_{S_{i-1}} + 0,5 A_{S_i} + 0,25 A_{S_{i+1}}.$$

Были рассчитаны периодограммы по данным отдельных станций для всех шести длин волн, на которых измеряется спектральная прозрачность на озонметрической сети бывшего СССР. Значимость получаемых амплитуд колебаний определялась по методике [5]. Для получения статистической обеспеченности результатов низкочастотные флуктуации прозрачности ограничивались 8 месяцами (240 днями). В связи с тем что периодограммы рассчитывались по ежедневным среднесуточным данным, верхняя частота вариаций, которую можно зафиксировать подобным способом, равнялась двум дням. В результате усреднения большого количества периодограмм по ряду станций за весь рассматриваемый период (1972–1979 гг.) был получен амплитудный спектр временных флуктуаций прозрачности ( $\lambda = 572$  нм), представленный на рис. 1.

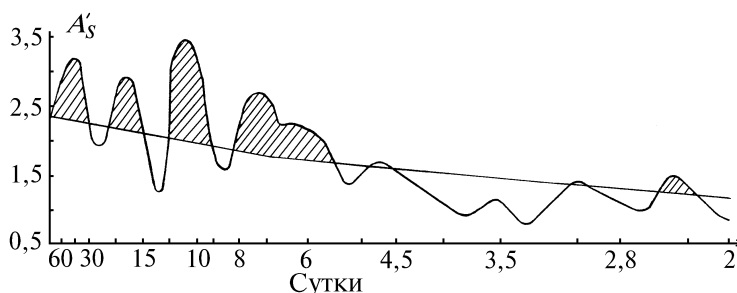


Рис. 1. Периодограмма вариаций спектральной прозрачности атмосферы ( $\lambda = 572$  нм)

Для расчета этой периодограммы было использовано примерно 12 тыс. среднесуточных значений спектральной прозрачности. На рис. 1 заштрихованы амплитуды колебаний по уровню 5%.

Данные рис. 1 выявляют следующие 5%-значимые периоды колебаний: 2,5; 3; 4,7; 7,5; 10–12; 17–18; ~ 50 суток. Сравнение полученных периодов с данными о вариациях температуры воздуха и скорости ветра [1], а также с периодами колебаний качества изображения звезд [4] показывает их вполне удовлетворительное согласие. При учете универсальности оптико-метеорологических связей, а также их взаимообусловленности [2, 6] это согласие является закономерным.

Периоды 3 и 4,7 сут характерны для времени жизни основных синоптических объектов – циклонов и антициклонов [7]. Так как в [2] показано, что циклоны и антициклоны являются противоположными объектами по характеру изменения спектральной прозрачности в них, то период 7,5 сут, вероятно, получается сложением периодов 3 и 4,7 сут. Если в исходный момент над пунктом наблюдения располагается антициклон, а затем на его место приходит циклон, то период увеличения спектральной прозрачности от минимального значения до максимального займет отрезок времени, близкий к 7 сут.

Периоды 10–12 и 17–18 сут, выявленные также в [1, 4], по-видимому, обусловлены возможностью прохождения серий циклонов и заключительного антициклона [7].

Так как обычно серия циклонов состоит из 3–5 объектов, то эти периоды образуются в результате сложения индивидуальных колебаний спектральной прозрачности. Как видно из рис. 1, их интенсивность значительно больше уровня значимости 5%. Из длиннопериодных колебаний спектральной прозрачности наиболее часто обнаруживаются 2-месячные (50–60 сут), реже 3-месячные, а над восточными районами (Владивосток) при увеличении рассматриваемого периода удается выделить 6-месячную компоненту, правда не всегда на уровне значимости 5%. Указанная компонента, очевидно, образуется из-за проявления в районе Владивостока действия муссона, периодичность появления которого также близка к 6 месяцам [7]. На рис. 1, ввиду ограничения низких частот, хорошо видна 2-месячная периодичность. Она, вероятно, характерна для оптических свойств воздуха, так как выявляется и в других его параметрах, например, в периодичности дрожания звезд [4].

Данные периоды колебаний имеют наиболее общий характер, так как получены усреднением по большому отрезку времени и по огромной территории. Естественно, что они будут изменяться в определенных пределах в зависимости от физико-географических особенностей и циркуляционных условий конкретного места, а также от длины волны, на которой проводились измерения. Это иллюстрирует рис. 2, на котором приводятся периодограммы для ст. Мурманск за весь рассматриваемый период для 2-х длин волн.

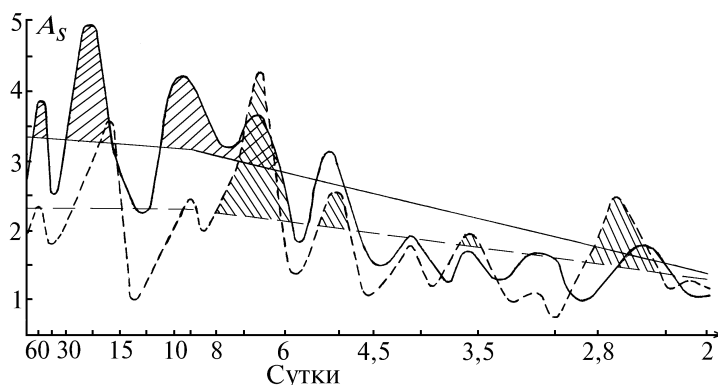


Рис. 2. Периодограмма вариаций спектральной прозрачности атмосферы для ст. Мурманск: при  $\lambda = 627$  нм (—);  $\lambda = 369$  нм (---)

Из рис. 2 видно, что значимые амплитуды колебаний наблюдаются почти при тех же значениях периодов, что и на рис. 1. Причем и количество значимых периодов практически такое же: для  $\lambda = 628$  нм их 6, а для  $\lambda = 367$  нм – 7. Наиболее устойчивыми являются колебания с периодами, характерными для макросиноптических условий, т.е. в два месяца. Что касается периодов колебания синоптического масштаба, то они оказываются более изменчивыми и обнаруживают определенную зависимость от длины волны. Это особенно сильно заметно в высокочастотной (2,5–2,7 сут) и в средней (6–12 сут) частях спектра, где наблюдаются имеющие разные амплитуды значимые периоды на обеих длинах волн. Это, очевидно, обусловлено особенностями атмосферных процессов, вызывающих перераспределение оптически активных компонент воздуха в атмосфере. Таким образом, проведенный анализ показывает, что взаимосвязь изменений спектральной прозрачности с прохождением синоптических объектов сохраняется, даже если ее рассматривать в климатологическом аспекте.

Результаты расчетов амплитудных спектров для спектральной прозрачности атмосферы  $S_{p,\lambda}$ , аэрозольной остаточной оптической толщи  $\tau_{\lambda,a}$  и оптической толщи, обусловленной поглощением водяным паром  $\tau_{\lambda,v,p}$ , для района Феодосии представлены на рис. 3.

Данные рис. 3 выявляют следующие 5%-значимые периоды колебаний: 3,2; 4,7; 7,5; 11 и 24 сут. Такие же периоды обнаруживаются и в данных об оптической толщине водяного пара, за исключением периода 3,2 сут. Во временных вариациях остаточной аэрозольной толщи значимыми оказываются колебания с периодами 14, 17 и 24 дня и совсем не обнаруживаются короткопериодные колебания. Возможно, это обусловлено методикой получения сведений об остаточной аэрозольной толщине, которая находится как разность величин, изменяющихся синхронно и при вычитании дающих нулевой вклад. По крайней мере, это не соответствует представлениям о том, что время жизни оптически активного тропосферного аэрозоля, в основном

ослабляющего излучение видимой области спектра, составляет 4–5 дней [6]. Данные же о колебаниях спектральной прозрачности и оптической толщи водяного пара хорошо согласуются как с результатами анализа вариаций метеорологических величин [1], так и с результатами астроклиматических наблюдений [4].

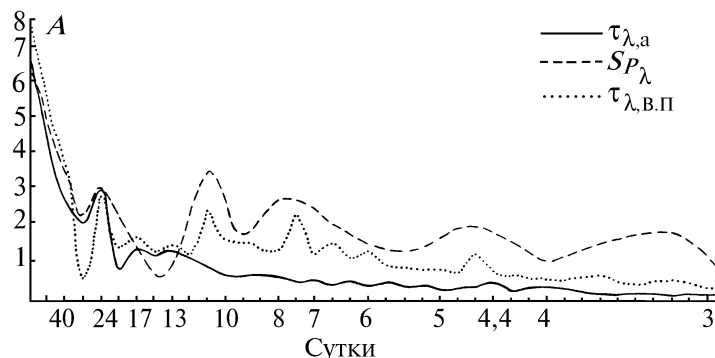


Рис. 3. Амплитудный спектр колебаний спектральной прозрачности ( $S_{p\lambda}$ ), остаточной спектральной аэрозольной толщи ( $\tau_{\lambda,a}$ ) и интегрального содержания водяного пара ( $\tau_{\lambda,в.п}$ )

Периоды колебаний 3 и 4,7 сут для района Феодосии также характерны для времени жизни основных синоптических объектов – циклонов и антициклонов [7]. Период 7,5 сут также, вероятно, получается сложением 3 и 4,7 сут, как уже было отмечено выше для спектральной прозрачности. Это же относится и к данным о водяном паре [7]. Периоды 11 и 24 сут, выявленные также в [1, 4], по-видимому, обусловлены возможностью появления в атмосфере серий циклонов и заключительного антициклона.

Двухмесячная периодичность, вероятно, является характерной особенностью оптических свойств воздуха, так как она существует также в периодичности дрожания звезд [4] и не выявляется в метеорологических величинах [1]. Возможно, что это проявление обратной связи в оптических величинах, которые пока не установлены.

Подводя итог проведенным исследованиям, можно сделать вывод о том, что вариации оптических величин, характеризующих энергетическое ослабление излучения, подвержены колебаниям с периодами, близкими к тем, которые наблюдаются в метеорологических и некоторых оптических величинах и, по-видимому, имеют одну и ту же природу, обусловленную циркуляцией атмосферы синоптического масштаба. Эти данные и результаты анализа распределения спектральной прозрачности атмосферы в различных синоптических условиях, полученные в [2], позволяют сделать заключение, что возможно прогнозировать ослабляющие свойства воздуха синоптическим способом с временной продолжительностью 3–20 дней.

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

1. Монин А. С. Прогноз погоды как задача физики. М.: Наука, 1969. 183 с.
2. Зуев В. Е., Белан Б. Д., Задде Г. О. Оптическая погода. Новосибирск: Наука, 1991. 182 с.
3. Зуев В. Е. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере. М.: Советское радио, 1970. 469 с.
4. Дарчия Ш. П., Иванов В. Н., Ковалло П. Г. Результаты астроклиматических исследований, выполненные в СибИЗМИР в 1971–1976 гг. Иркутск, 1977. 11 с. (Препринт/СибИЗМИР, 4–77).
5. Брукс К., Карузерс Н. Применение статистических методов в метеорологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1963. 415 с.
6. Кондратьев К. Я., Москаленко Н. И., Поздняков Д. В. Атмосферный аэрозоль. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 224 с.
7. Хромов С. П. Основы синоптической метеорологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1948. 700 с.

Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск  
Томский государственный университет им. В.В. Куйбышева

Поступила в редакцию  
24 декабря 1993 г.

B. D. Belan, G. O. Zadde, A. I. Kuskov. **Spectra of the Atmosphere Transparency Variations.**

Temporal variations of spectral transparency of the atmosphere and its constituents are examined by spectral analysis method. Latent periodicities comparable to the atmospheric parameters variations of synoptical scale are revealed.