

**МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОГНОЗА ХАРАКТЕРИСТИК
АТМОСФЕРНО-ОПТИЧЕСКОГО КАНАЛА НА ОСНОВЕ
ФИЗИКО-СТАТИСТИЧЕСКОГО ПОДХОДА**

В статье рассматривается один из возможных методических подходов к решению задач прогностической оценки оптического состояния атмосферного канала. Первоначально с использованием физико-статистических методов предвычисляются временные изменения оптически активных компонент атмосферы. Затем по полученным данным рассчитываются прогностические оценки оптических характеристик атмосферного канала, используемые в дальнейшем при информационном обеспечении систем дистанционного зондирования.

В настоящее время все более интенсивно развивается новое направление исследований климатической системы Земли и состояния природной среды, основанное на использовании данных дистанционного оптического зондирования. Сегодня трудно представить успешное решение многих задач без применения этих данных. Однако на пути более широкого и эффективного их использования имеются существенные препятствия, связанные, в частности, с надежной интерпретацией получаемых при дистанционном зондировании измерений и учетом энергетического ослабления оптического излучения вдоль трасс его распространения.

Очевидно, что для практического решения этих задач необходимо иметь априорную информацию о вертикальном распределении таких оптически активных компонент атмосферы, как давление, температура воздуха, влажность, количество озона и др. При этом размерность n вектора оптически-активных компонент $X_{<n>}$, используемого для решения обратных задач и радиационной коррекции результатов дистанционного зондирования, определяется на этапе разработки соответствующего измерительного комплекса и зависит от метода обработки полученной информации. Следует подчеркнуть, что не только размерность вектора $X_{<n>}$, но и тип информационного обеспечения играет важную роль при решении задач дистанционного оптического зондирования.

Современные концепции предусматривают на разных этапах разработки и функционирования оптических измерительных систем использование различных типов информации: климатической, прогностической и фактической. Так, климатическая информация, представляемая обычно параметрами стандартных моделей атмосферы может быть использована на этапе моделирования и перспективного планирования работы этих систем. В то же время прогностические данные (иногда совместно с данными наблюдений) находят применение на этапе усвоения результатов дистанционного зондирования и оперативного планирования экспериментов. Если вопросы обеспечения оптических измерительных систем климатической информацией, представленной соответствующими моделями (включая оптические модели), уже давно прорабатываются специалистами (см., например, обзоры [1–3]), то проблема обеспечения этих систем прогностическими данными остается открытой. Это связано с тем, что прогноз характеристик атмосферно-оптического канала, учитывающий региональные особенности высотного распределения оптически активных компонент атмосферы, определяющих его оптическое состояние, и различный временной масштаб предсказуемости каждого из физических компонент, является одной из наиболее сложных и труднорешаемых проблем атмосферной оптики. (Под атмосферно-оптическим каналом нами понимается объем атмосферы, в котором распространяется оптическое излучение определенного типа (узкополосное или широкополосное). Геометрические параметры канала определяются свойствами источника излучения, апертурой приемного оптического устройства и геометрией эксперимента, а физические характеристики — процессами взаимодействия указанного типа излучения с компонентами атмосферы). Решение задачи прогноза существенно усложняется отсутствием систематических глобальных наблюдений за оптическими характеристиками атмосферы, являющимися (в отличие от оптически активных компонент) еще более неустойчивыми, а также низким уровнем наших знаний о физических связях метеорологических величин с прозрачностью атмосферного канала в различных спектральных интервалах.

Однако, несмотря на отмеченные трудности, в настоящее время появились предпосылки для научной постановки и решения задачи по прогнозу оптического состояния атмосферы, хотя для ее реализации требуется выбор соответствующих подходов и методов.

В данной работе авторами предпринята попытка изложить некоторые методические аспекты решения этой задачи применительно к среднесрочному и долгосрочному прогнозам, т. е. прогнозам с предсказуемостью от 3–5 дней до 15 дней и от 2–3 недель до нескольких месяцев соответственно. Задача среднесрочного и долгосрочного прогнозов оптического состояния атмосферного канала на указанные сроки

решается на основе физико-статистического подхода к предвычислению временных изменений оптически активных компонент атмосферы и последующей оценки необходимых оптических характеристик.

Подчеркнем, что выбор физико-статистического подхода обусловлен тем, что:

– теоретический предел предсказуемости (при использовании гидродинамических схем прогноза) составляет 1–2 недели для процессов синоптического масштаба и не более 4 недель для явлений планетарного масштаба [4];

– существующие гидродинамические схемы не позволяют с необходимой точностью учесть атмосферные процессы подсеточного масштаба и не охватывают всего комплекса оптически активных компонент;

– современные статистические методы позволяют достаточно надежно определять периодические и квазипериодические составляющие, на основе которых можно выбрать наиболее информативные предикторы и оптимальные сроки прогнозирования.

Поэтому не случайно, что в научной литературе (см., например, [5–7]) подчеркивается необходимость развития упрощенных подходов, основанных на использовании физико-статистических методов. По этому пути пошли и авторы данной работы.

1. Методологическая основа

В качестве методологической основы для разработки физико-статистического метода прогноза оптически-активных компонент будем использовать результаты работы [8].

В соответствии с [8] будем считать, что в формировании временной структуры вариаций $X_l(t)$ локальной климатической системы l принимают участие множество внешних (главных G и частных g) и внутренних W факторов, которые, с одной стороны, свойственны этой системе, а с другой стороны, являются компонентами глобальной климатической системы L . Математически это можно представить в виде соотношения [8]

$$X_l(t) = \sum^L f_1(G_{i,t}^2) + \sum^L f_2(G_{i,t}) + \sum^l f_3(g_{m,t}) + \sum^l f_4(W_{k,t}^2), \quad (1)$$

которое отражает уровень вклада глобальных L и локальных l слагаемых в общий фон локальных $X_l(t)$ колебаний климатической системы в рассматриваемом регионе. При этом первое слагаемое в правой части (1) определяет вклад главных колебаний с годовыми периодами, которые возникают в системе «океан – атмосфера» вследствие температурных контрастов между экваториальными и полярными широтами. Второе слагаемое также определяет вклад главных колебаний, но с периодами от недель до месяцев. Эти колебания возникают за счет смещения центров действия атмосферы, планетарных фронтальных зон, перемещения длинных волн и т. п. Третье слагаемое в соотношении (1) учитывает вклад частных колебаний с периодами от нескольких часов до нескольких дней, вызываемых циклонической деятельностью, т. е. образованием и смещением циклонов и антициклонов. И наконец, четвертое слагаемое отражает вклад колебаний, свойственных собственно локальной климатической системе l .

Таким образом, методологическая основа заключается в том, что в формировании временной структуры вариаций локальных климатических систем участвуют как внешние, так и внутренние факторы, причем главные колебания (составляющие первого G^2 и второго G слагаемого) обуславливают основной фон колебаний этих систем, а частные g и внутренние W колебания его трансформируют, определяя неустойчивость и географические различия относительно главного фона колебаний.

Исходя из этого и учитывая тот факт, что общее влияние внешних и внутренних факторов на формирование величин $X_l(t)$ нередко проявляется в виде некоторого закона-тенденции [8], при решении задачи прогноза мы руководствовались следующими принципами:

а) прогноз на более короткий срок оптически активных компонент атмосферы должен координироваться с предсказанием климатического фона;

б) разрабатываемые методы прогноза должны базироваться на использовании осредненных характеристик (а не индивидуальных метеорологических величин) и результатов представления высотных полей в виде некоторых базовых функций, позволяющих отфильтровать высокочастотный «шум» и выделить долгопериодные составляющие;

в) прогностическая модель должна учитывать наличие физико-географических различий в структуре локальных колебаний климатической системы.

Эти принципы нашли свое отражение в методике статистического анализа и построения прогностических моделей вертикального распределения оптически активных компонент атмосферы, разработанной авторами применительно к решению задач прогноза оптического состояния атмосферного канала. Эта методика рассматривается ниже.

2. Основные этапы статистического анализа и построения прогностических моделей

Блок-схема последовательной обработки данных высотного распределения оптически активных компонент атмосферы приводится на рисунке. В соответствии с предлагаемой методикой статистиче-

ский анализ и построение прогностических моделей оптико-активных компонент атмосферы сводится к следующим этапам.



Блок-схема статистического анализа и прогноза оптического состояния атмосферного канала

Этап 1. Прежде всего выделяются основные физические параметры атмосферы, обуславливающие изменение ее оптических характеристик в заданном районе, причем учитываются спектральный интервал оптического излучения и трасса, вдоль которой происходит его распространение. Затем с использованием многомерного статистического анализа производится расчет характеристик статистической структуры вертикального распределения выделенных физических параметров атмосферы, к которым в первую очередь относятся термодинамические величины (температура, давление воздуха, влажность) и концентрация малых газовых составляющих. Основными из этих характеристик являются векторы средних значений и стандартных отклонений, ковариационные и корреляционные матрицы, а также эмпирические ортогональные функции (собственные векторы и собственные значения ковариационных матриц).

Этап 2. На втором этапе с использованием эмпирических ортогональных функций осуществляется классификация полей оптически активных компонент атмосферы, влияющих на распространение оптического излучения в заданном спектральном интервале. Методика объективной классификации основывается на оценке сходства поля вариаций той или иной оптически активной компоненты в различных районах земного шара, которое формируется под влиянием атмосферных процессов планетарного и синоптического масштабов. Подробное описание методики приводится в монографии [1]. Одновременный обзор результатов и методов объективной классификации оптически активных компонент атмосферы, а также некоторые результаты объективного районирования северного полушария по комплексу «давление воздуха – температура – влажность – озон» приведены в [3],

Применение объективной классификации полей оптико-активных компонент при решении задач прогноза состояния атмосферно-оптического канала позволяет разделить всю территорию земного шара на ряд квазиоднородных (с точки зрения вариаций) районов. Использование квазиоднородных районов позволяет строить прогностические модели с учетом региональных особенностей атмосферных процессов различного масштаба и тем самым учитывать физико-географические различия в структуре локальных колебаний климатической системы.

Этап 3. Как уже указывалось, разрабатываемые методы прогноза в качестве предикторов должны использовать результаты представления высотных полей в виде некоторых базовых функций, позволяющих отфильтровать высокочастотный «шум» и выделить долгопериодные составляющие. В качестве таких функций нами использовались естественные ортогональные составляющие (ЕОС), что позволило ограничиться при описании полей давления, температуры, влажности воздуха и озона первыми m членами разложения по ЕОС. При этом значение m составляет 2–3 для давления воздуха, 3–5 для температуры, 3–4 для влажности и 5–7 для озона (порядок ковариационных матриц влажности воздуха $p = 15$, для остальных величин $p = 27$). Следует отметить, что погрешность описания полей оптически активных компонент конечным числом членов разложения по ЕОС не превышает в каждом случае ошибки их измерения.

Исходя из этого, на третьем этапе для интересующих нас квазиоднородных районов, выявленных на этапе объективной классификации, производится формирование временных рядов первых m коэффициентов разложения по ЕОС $a_k(t_i)$, где k – номер ЕОС ($k = 1, \dots, m$), I – порядковый номер наблюдений ($i = 1, \dots, N$), N – объем выборки. В течение последующих двух этапов при построении и выборе оптимальных прогностических моделей коэффициенты разложения $a_k(t_i)$ используются в качестве предикторов. Это позволяет сохранить погрешность представления полей оптико-активных компонент на уровне ошибок измерения и отфильтровать более изменчивые процессы мезо- и микромасштабов, учет которых приводит в данном случае к неустойчивости оценок параметров прогностических моделей.

Этап 4. На четвертом этапе для тех же квазиоднородных районов осуществляется построение и выбор прогностических моделей оптимальной сложности, причем в качестве исходной информации для построения моделей используются временные ряды коэффициентов разложения по ЕОС $a_k(t_i)$.

Для построения и выбора оптимальных прогностических моделей нами использовались методы самоорганизации моделей. Описание методов самоорганизации моделей можно найти в работах [9, 10]. Здесь отметим только, что, по-видимому, для задач такого уровня сложности эти методы являются достаточно эффективными, хотя они не исключают использование и других методов прогнозирования. К основным особенностям методов самоорганизации моделей (и, в частности, метода группового учета аргументов – МГУА) можно отнести следующие:

а. Самоорганизация моделей, подобно регрессионному анализу, относится к экспериментальным методам моделирования, так как основана на обработке таблицы данных наблюдений, полученных в режиме пассивного или активного эксперимента. Отметим, что самоорганизация физической и прогнозирующих моделей возможна и при сильно зашумленных исходных данных. В настоящее время алгоритмы МГУА позволяют восстановить физическую модель объекта в случае, когда помехи измерения данных в несколько раз превосходят регулярный сигнал [11].

б. При самоорганизации моделей структура прогнозирующей модели не задается априори, а выбирается из множества генерируемых ЭВМ моделей-претендентов по критериям селекции, назначенных экспертами. При этом в пространстве критериев выбирается некоторое количество точек (моделей), ближайших к началу координат. Процедура доопределения модели состоит в том, что из отобранных лучших моделей выбирается единственная модель по главному критерию.

в. Поскольку любой внутренний критерий сравнения моделей (рассчитанный по всем точкам таблицы исходных данных, рассчитанный по всем точкам таблицы исходных данных, используемых в качестве предикторов) приводит к ложному правилу: чем сложнее модель – тем она точнее, при самоорганизации моделей отбор осуществляется по внешним критериям, построенным по опытным данным, которые не были использованы при генерировании моделей-претендентов. Согласно принципу самоорганизации, при постепенном усложнении структуры модели значения внешних критериев сначала уменьшаются, а затем возрастают, то есть имеется минимум критерия, определяющий модель оптимальной сложности.

г. Эти методы дают возможность прогнозирования сложных процессов при неполном информационном базисе (то есть без измерения многих существенных аргументов). Моделирование при неполном информационном базисе является полной противоположностью идее увеличения информационного базиса до учета максимального числа всех воздействий.

д. В связи с объективным характером методов самоорганизации эксперты (авторы модели) могут повлиять на результат прогноза только при помощи изменения критериев селекции, а в остальном в самоорганизацию моделей не вмешиваются. Самоорганизация направлена на всемерное уменьшение априорной информации, вносимой в моделирование системы на ЭВМ автором модели. От человека требуется только сообщить ЭВМ данные наблюдений и указать класс опорных функций и критерии самого общего вида, а в некоторых случаях участвовать в доопределении модели.

Для построения и выбора прогностических моделей оптимальной сложности нами были использованы алгоритмы МГУА выделения гармонического тренда с некратными частотами (однорядные и многорядные [12]) для прогностической оценки с упреждением на 3–15 интервалов-шагов таблицы исходных данных по вертикальным профилям температуры, давления, влажности, а также алгоритмы МГУА с использованием линейной авторегрессионной модели для прогностической оценки вертикальных профилей озона.

Этап 5. На пятом этапе на основе выбранных моделей оптимальной сложности осуществляется расчет каждого из m первых коэффициентов разложения $a_k(t_i)$ для каждого оптического активного компонента атмосферы. Естественным при этом является требование учета климатического фона той или иной метеорологической величины. Учет этого требования в нашей методике достигается путем последовательной разработки прогнозов сроком на сезон и месяц вперед, отражающих высокочастотную изменчивость климатической системы, и их уточнения посредством разработки прогнозов на более короткие сроки – от 10–15 до 5 дней.

Полученные в результате прогноза значения коэффициентов разложения $a_k(t + \Delta t)$ используются для восстановления прогнозируемых профилей оптически активных компонент, которое осуществляется по формулам

$$\delta X_p(t + \Delta t) = \sum_{k=1}^m a_k(t + \Delta t) F_{kp}, \quad (2)$$

$$X_p(t + \Delta t) = \bar{X}_p + \delta X_p(t + \Delta t), \quad (3)$$

где $\delta X_p(t + \Delta t)$ и \bar{X}_p — прогнозируемая вариация и среднее значение компоненты X на уровне p ; F_{kp} — элемент собственного вектора F_k на уровне p ; k — номер собственного вектора; m — число членов разложения.

Полученные в результате восстановления прогностические профили оптически активных компонент атмосферы используются на следующем этапе для прогностической оценки оптического состояния атмосферного канала в пределах выбранного квазиоднородного района.

Этап 6. Для большинства задач, связанных с информационным обеспечением систем дистанционного оптического зондирования вполне достаточно иметь прогностические данные о коэффициентах ослабления или функциях пропускания всей толщи атмосферы для источников квазимонохроматического узкополосного или широкополосного излучения. Однако, как уже отмечалось, задача прямого прогнозирования этих характеристик в настоящее время, с одной стороны, является трудноразрешимой. А с другой стороны, успехи молекулярной спектроскопии атмосферы, развитие вычислительных средств и соответствующих информационных систем сделали возможным проведение корректных расчетов этих характеристик в отдельных спектральных интервалах по заданным высотным профилям оптически активных компонент атмосферы [13, 14]. Разработка эффективных методов быстрого счета (см., например, [15]) позволяет оперативно предвычислять состояние конкретного атмосферного канала (безоблачная атмосфера) по прогностическим высотным профилям температуры, давления, влажности и газовых составляющих. Аэрозольное ослабление учитывается с помощью моделей [2, 16].

Заключение

Таким образом, предложенная в работе методика позволяет при наличии необходимой исходной информации о вертикальных профилях оптически активных компонент атмосферы получать с различной заблаговременностью региональные оценки состояния оптических каналов в безоблачной атмосфере. Эта методика реализована в ИОА СО АН СССР в виде соответствующих баз данных и специализированного программного обеспечения на ЭВМ ЕС 1055М. Апробация проводилась на 10-ти летних рядах данных аэрологических и озонметрических станций «Лондон», «Буффало», «Резольют», «Хоэнпейсенберг» и продемонстрировала достаточную надежность и эффективность данного подхода. Конкретные результаты применения этих методов будут изложены в последующих публикациях.

1. Zuev V. E., Komarov V. S. Statistical Models of the Temperature and Gaseous Components of the Atmosphere. D. Reidel Publishing Company. Dordrecht—Boston—Lancaster—Tokyo. 1987. 306 p.
2. Зуев В. Е., Креков Г. М. Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 256 с.
3. Комаров В. С., Ременсон В. А. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1, № 7. С. 3—16.
4. Кондратьев К. Я. Глобальный климат. Итоги науки и техники. Сер. Метеорология и климатология. М., 1987. Т. 17. 313 с.
5. Долгосрочные метеорологические прогнозы. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 248 с.
6. Привальский В. Е. Климатическая изменчивость, стохастические модели, предсказуемость, спектры. М.: Наука, 1985. 183 с.
7. Чичасов Г. Н. Месячные прогнозы погоды, их состояние и перспективы. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 1984. 50 с.
8. Исаев А. А. // Труды Всес. научно-исследовательского института гидрометеорологической информации — Мирового центра данных. 1987. Вып. 140. С. 104—143.
9. Ивахненко А. Г., Мюллер И. А. Самоорганизация прогнозирующих моделей. Киев: Техника, 1985. Берлин: Феб Ферлаг Техник, 1984. 223 с.
10. Ивахненко А. Г., Степашко В. С. Помехоустойчивость моделирования. Киев: Наукова думка, 1985. 216 с.
11. Ивахненко А. Г., Степашко В. С. // Автоматика, 1982. № 4. С. 26—35.
12. Справочник по типовым программам моделирования/Под ред. А. Г. Ивахненко. Киев: Техника, 1980. 183 с.
13. Войцеховская О. К., Зуев В. Е., Тютюрев В. Л. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 3. С. 3—15.
14. Комаров В. С., Мицель А. А., Михайлов С. А., Пономарев Ю. Н., Руденко В. П., Фирсов К. М. // Оптика атмосферы 1988. Т. 1. № 5. С. 84—89.
15. Мицель А. А., Руденко В. П., Фирсов К. М. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 2. С. 45—50.
16. Креков Г. М., Рахимов Р. Ф. Оптические модели атмосферного аэрозоля. Томск: ТФ СО АН СССР. 1986. 294 с.

Институт оптики атмосферы
СО АН СССР, Томск

Поступила в редакцию
21 июля 1988 г.

V.S. Komarov, A.N. Kalinenko, S.A. Mikhailov. **Some Methodological Aspects of Forecasting the State of Atmospheric-Optical Channel Based on the Use of Physico-Statistical Approach.**

The paper presents one of the possible approaches to the solution of problems on forecasting the optical state of the atmospheric channel. First some preliminary calculations are made to assess temporal variations of the optically active atmospheric constituents. Then these data are used for making calculations of the forecast assessments of the optical characteristics of the atmospheric channel, the latter being used as an information basis for the remote sensing systems.