

С.Д. Андреев, Л.С. Ивлев

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АЭРОЗОЛЕЙ ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ В ОБЛАСТИ СПЕКТРА 0,3 ÷ 15 МКМ. Ч. 1. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ

Моделирование оптических характеристик атмосферных аэрозолей является одним из наиболее активно развивающихся направлений оптики атмосферы. Однако результаты подобного рода исследований оказываются весьма противоречивыми и, в некоторых случаях, трудно объяснимыми. Причинами этого, по мнению авторов, являются ограниченность и низкая надежность исходных данных для моделирования и определенный разрыв между отдельными направлениями исследований. В статье рассматриваются возможные пути преодоления отмеченных сложностей и противоречий.

Атмосферные аэрозоли являются одной из компонент, активно влияющих на формирование оптических свойств атмосферы во всей области спектра 0,3 ÷ 15 мкм. В то же время их роль в различных интервалах этой широкой спектральной области существенно различна. В видимом диапазоне при  $\lambda < 1$  мкм, где сравнительно немногочисленные полосы поглощения атмосферных газов обладают малой интенсивностью либо локализованы в узких интервалах спектра, аэрозольное ослабление, наряду с достаточно стабильным и легко учитываемым молекулярным рассеянием, оказывается основным фактором, определяющим оптические характеристики атмосферы.

При переходе к инфракрасной (ИК) области спектра положение резко изменяется. Интенсивные полосы поглощения водяного пара и углекислого газа, в центральных участках которых в условиях реальной атмосферы практически полное поглощение наблюдается уже при длине оптического пути в десятки метров, при  $\lambda > 2$  мкм разделяют этот спектральный диапазон на ряд атмосферных окон прозрачности. В окнах прозрачности при высоком (в среднем) уровне спектрального пропускания атмосферы расположены многочисленные полосы поглощения малых газовых составляющих атмосферы, отдельные линии и группы линий поглощения  $H_2O$  и  $CO_2$ . Во всей области спектра  $\lambda > 2$  мкм наблюдается так называемое непрерывное (континуальное) поглощение водяного пара, особенно существенное в окне прозрачности атмосферы 8 ÷ 14 мкм, представляющем с точки зрения оптики атмосферы особый интерес как в связи со значимостью этой области спектра для энергетики атмосферы, так и в силу широкого использования данного спектрального интервала для решения многих прикладных задач. По величине континуальное поглощение сравнимо с аэрозольным ослаблением или даже превосходит его.

При экспериментальных оптических исследованиях наблюдается совместный эффект всех факторов. Положение усугубляется тем обстоятельством, что если в видимой области спектра возможны измерения угловых и поляризационных характеристик рассеяния, т.е. для экспериментальных исследований доступны все элементы матрицы рассеяния, – то в ИК-диапазоне для наблюдений в условиях реальной атмосферы доступны лишь эффекты, связанные с проявлениями аэрозольного ослабления и, в некоторых случаях, поглощения. Необходимо отметить также, что в связи со сложностью корректного выделения аэрозольной компоненты из реально измеряемой величины результаты этих наблюдений не отличаются особой точностью и в большинстве случаев имеют оценочный характер.

Для корректного учета вклада аэрозолей в формирование оптических свойств атмосферы особую роль приобретают модели оптических характеристик атмосферных аэрозолей. На протяжении 70–80-х гг., т.е. за тот сравнительно короткий временной период, когда возникла настоятельная практическая потребность в подобных данных, различными исследователями предложено более 20 моделей оптических характеристик атмосферных аэрозолей (не приводя

здесь полного перечня соответствующих работ, сошлемся лишь на монографии [1–3], в которых содержится достаточно полный обзор такого рода исследований). Уже само количество предложенных моделей свидетельствует, с одной стороны, об актуальности проблемы, а с другой – о том, что задача еще далека от решения.

Когда речь идет о построении моделей атмосферных аэрозолей для оптических приложений, как правило, подразумевается, что такая модель должна давать набор оптических характеристик аэрозолей, соответствующих заданному состоянию атмосферы. Конкретный набор оптических характеристик диктуется чисто потребностями практики. При работе в видимой области спектра, как правило, предполагается, что оптическая модель должна обеспечивать знание как энергетических (коэффициенты ослабления, рассеяния, поглощения излучения), так и угловых и поляризационных характеристик. В ИК-области спектра обычно ограничиваются требованием моделирования лишь энергетических оптических характеристик.

Сложности проявляются при определении набора параметров, описывающих состояние атмосферы и выступающих при моделировании оптических свойств аэрозолей в качестве входных параметров модели. Специалисты в области оптики атмосферы, отдавая себе отчет в многообразии и сложности процессов, воздействующих на формирование оптических свойств атмосферы, до настоящего времени не могут сформулировать единый перечень условий, которые необходимо контролировать при проведении оптических наблюдений с целью хотя бы простого сопоставления их результатов.

Еще более сложная ситуация складывается при исследованиях атмосферных аэрозолей – изменчивость свойств аэрозолей в условиях реальной атмосферы (их концентрация, распределение частиц по размерам, состав частиц, пространственное распределение и т.д.) столь высока, что некоторые исследователи предлагают рассматривать аэрозоли как случайную величину [4]. Поэтому сложившуюся практику использования в качестве входных параметров оптической модели значений метеорологической дальности видимости  $S_m$  (км) [или связанной с ней величины коэффициента аэрозольного ослабления  $\alpha(\lambda - 0,5 \text{ мкм}) = 3,902/S_m$ ] и относительной влажности воздуха  $f(\%)$  можно считать данью традиции с учетом возможностей практики – эти характеристики доступны для экспериментального определения любым возможным потребителям результатов моделирования. На практике невыполнимы физически более оправданные требования задания величин коэффициентов аэрозольного ослабления для нескольких длин волн или индикатрисы рассеяния (ее малоугловой части) – знание этих характеристик позволяет хотя бы приближенно оценить дисперсность аэрозолей.

Как показывает практика, использование такого ограниченного набора входных параметров модели дает достаточно удовлетворительные результаты при использовании моделей в видимой области спектра в условиях приземного слоя атмосферы, но приводит к существенным противоречиям при распространении модели на ИК-диапазон, где возникает проблема так называемых <визуально неразличимых ситуаций>, т.е. ситуаций, при которых оптические характеристики аэрозолей оказываются совпадающими (или достаточно близкими) в видимой области спектра и резко различаются при переходе в ИК-область спектра.

Пытаясь преодолеть это затруднение, авторы [5] ввели достаточно сложную многоступенчатую классификацию возможных ситуаций в атмосфере. Этим они, по существу, продолжили и пытались развить первую, по-видимому, попытку построения классификации оптических свойств атмосферных аэрозолей [6]. Но если классификация [6], предложенная для видимой области спектра, достаточно проста (выделяется три типа <оптической погоды>, различающихся спектральным ходом коэффициентов аэрозольного рассеяния в области  $0,3 \div 1 \text{ мкм}$  и характерных для соответствующих диапазонов изменения  $S_m$  и  $f$ ) и, в среднем, оправдывается, то классификация [5], насчитывающая 16 типов <оптической погоды> при отсутствии сколько-нибудь четких количественных критериев их различения положительных результатов не дает. Несколько утрируя сложившееся положение, можно сказать, что необходимо сначала измерить коэффициенты аэрозольного рассеяния в области спектра до  $15 \text{ мкм}$ , чтобы затем на основе классификации [5] определить, к какому типу <оптической погоды> необходимо отнести данную ситуацию, после чего уже можно пользоваться результатами [5].

В некоторой мере сходная ситуация складывается и при попытках практического применения набора моделей [7]. Представляется, что такого рода данные чрезвычайно полезны при оценке крупномасштабных воздействий атмосферных аэрозолей на радиационный режим ат-

мосферы, но применимость моделей [7] для практических целей оценки и прогнозирования оптических свойств аэрозолей при локальных изменениях ситуации в атмосфере сомнительна.

Существующие модели оптических характеристик атмосферных аэрозолей можно (несколько условно, разумеется) подразделить на две группы. Одна группа – это модели, полученные на основе определенной статистической обработки и обобщения результатов оптических измерений в условиях реальной атмосферы (<статистические> модели). Другую группу составляют модели, в которых оптические характеристики аэрозолей при различных ситуациях в атмосфере определены расчетным путем на основе тех или иных представлений о структуре и микрофизических свойствах атмосферных аэрозолей (<микроструктурные> модели). Среди упоминавшихся выше моделей к первой группе относятся модели [5, 6], в которых в качестве модельных значений оптических характеристик рекомендуются определенным образом статистически обработанные результаты непосредственных экспериментальных измерений при конкретных ситуациях в атмосфере. В качестве примера моделей, отнесенных здесь ко второй группе, можно рассматривать модели [2, 3, 7].

Несомненным достоинством первого подхода к построению модели является вполне очевидная и наглядная связь модельных характеристик с реально наблюдающимися величинами. Но в этом преимуществе <статистических> моделей коренятся и их недостатки, во многих случаях существенно ограничивающие их применимость. Вопросы, возникающие при обращении к такому рода результатам, связаны, прежде всего, с точностью экспериментальных оценок аэрозольного ослабления и различиями методик формирования массивов исходных данных и их обработки.

Связь с результатами экспериментальных исследований в случае <микроструктурных>, расчетных моделей значительно менее очевидна. Вопросы, возникающие при использовании или анализе результатов моделирования, относятся, прежде всего, к адекватности используемой для расчетов оптических характеристик исходной модели аэрозолей реальной картине и к степени идеализации модельной дисперсной среды, неизбежно возникающей при проведении подобных расчетов. Можно также отметить, что при использовании данного подхода исходная задача – прогноз оптических характеристик атмосферных аэрозолей в зависимости от условий в атмосфере – подменяется другой, не менее сложной задачей прогноза состояния аэрозолей при изменении ситуации в атмосфере.

Анализ результатов моделирования при использовании такого подхода затруднен тем обстоятельством, что представляются, как правило, только итоговые численные результаты проведенных расчетов, вследствие чего появление, например, новых экспериментальных данных о комплексном показателе преломления вещества аэрозолей или выдвижение новой гипотезы о характере взаимодействия аэрозолей с водяным паром и т.д. требуют проведения всего комплекса расчетов, по существу, заново. Как правило, попытки совершенствования модели, ее уточнения сопряжены с изменением не одного, а целого ряда характеристик исходной модели микроструктуры аэрозолей, и при подобной ситуации во многих случаях оказывается затруднительным оценить значимость изменения того или иного отдельного параметра. Учитывая современное состояние представлений о физико-химических свойствах атмосферных аэрозолей, когда новые экспериментальные данные и новые идеи появляются практически непрерывно, такая работа по совершенствованию и уточнению оптических моделей атмосферных аэрозолей оказывается малоэффективной и, в определенном смысле, бесконечной.

Представляется, более рациональным было бы оформление модели не в виде набора величин определенных характеристик для неких конкретных значений входных параметров модели, а в виде комплекса данных, исчерпывающе характеризующих исходную модель структуры и состава аэрозолей, и набора алгоритмов и программ, используемых для расчетов. При подобном подходе любой конкретный потенциальный пользователь результатов моделирования может провести расчеты для конкретных значений входных параметров тех оптических характеристик, которые ему необходимы. Наиболее сложный для практической реализации подобного подхода момент заключается в следующем. При традиционно используемом подходе проблемы, связанные с трансформацией модели аэродисперсной структуры при изменяющихся условиях (например, выбор значений концентрации и функции распределения частиц по размерам при различных синоптических ситуациях), т.е., по существу, решение проблемы адекватности исходной модели микроструктуры, полностью решаются автором модели, хотя пути этого решения, как правило, не обсуждаются. Использование декларируемого здесь подхода подразумевает, что хотя бы в ограниченном числе случаев определенная свобода вы-

бора некоторых параметров предоставляется непосредственно пользователю. В связи с этим обязательной и неотъемлемой составной частью такой модели должен быть достаточно полный набор соответствующих правил и рекомендаций. Именно этот раздел модели, учитывая современное состояние знаний о природе и свойствах атмосферных аэрозолей, представляется наиболее сложным для реализации, хотя, как мы надеемся показать ниже, при описании разработанной в лаборатории физики аэрозолей оптической модели аэрозолей определенные перспективы в данном направлении просматриваются достаточно уверенно.

Сама проблема расчета оптических характеристик дисперсной системы технических сложностей в настоящее время не представляет. Существует достаточно много версий программ для расчета оптических характеристик полидисперсных систем на основе теории Ми. Однако учитывая возможность (в определенном отношении – неизбежность) практически постоянного обновления банка исходных данных, уточнения и совершенствования модели, представляется, что чрезвычайно полезно использовать при построении модели и алгоритма ее применения принцип блочной структуры, выдвинутый в [8]. Можно отметить, что в последнее время в лаборатории физики аэрозолей разработана и успешно применяется специализированная система программ OPMODA<sup>1)</sup>, предназначенная для решения задач расчета оптических характеристик атмосферы, переноса излучения в атмосфере и радиационной энергетики атмосферы, при построении которой использован принцип блочной структуры.

Анализируя современное состояние проблем, связанных с созданием оптической модели атмосферных аэрозолей, нельзя не отметить следующие обстоятельства:

1) Существует определенный разрыв между двумя обозначенными выше подходами, которые условно представлены здесь как <статистический> и <микроструктурный>, иными словами – между полумпирическим, на основе экспериментальных оптических данных, и расчетным моделированием.

2) Результаты моделирования достаточно противоречивы, и причины наблюдающегося различия между модельными величинами не всегда ясны.

3) В качестве критерия применимости полученных расчетным путем оценок используется сравнение с экспериментальными данными. В случае моделирования оптических характеристик атмосферных аэрозолей в видимой области спектра существует обширный массив подобных данных для практически полного набора оптических характеристик. В ИК-диапазоне, как отмечено выше, существенно ограничен набор оптических характеристик, доступных для измерения, и сами результаты экспериментальных исследований трудно сопоставимы, прежде всего, в связи с отсутствием общепринятых представлений о природе и свойствах континуального поглощения H<sub>2</sub>O и разнообразием используемых методов его учета при разделении компонент ослабления.

Используя результаты комплексных исследований атмосферных дымок, проводившихся в период 1971–1978 гг. силами сотрудников НИИФ ЛГУ и СФТИ<sup>2)</sup> [8–10], мы пытались, с одной стороны, выявить закономерности вариаций микроструктурных характеристик аэрозолей при различных условиях в атмосфере, а с другой – сопоставить экспериментальные оценки аэрозольного ослабления с результатами расчетов оптических характеристик аэрозолей на основе экспериментальных микрофизических данных.

Учитывая изложенное выше, была проведена следующая работа:

1) На основе данных по микроструктуре и значениям комплексного показателя преломления вещества отдельных фракций аэрозолей (результаты исследований аэрозольных проб в лабораторных условиях) проведены расчеты оптических характеристик отдельных фракций аэрозолей (в данной серии сообщений обсуждаются результаты только по энергетическим оптическим характеристикам) с учетом влияния влажности как на спектр размеров аэрозольных частиц, так и на значения оптических констант.

2) Используя нормированные величины коэффициентов аэрозольного ослабления, путем сравнения с экспериментальными данными оценивалось соотношение концентраций частиц разных фракций и проводилось <уточнение> функции распределения частиц по размерам. (В качестве начального приближения предполагалось, что при значениях относительной влажности  $f \approx 50 \div 60\%$  функция распределения близка к распределению Юнге при  $v = 3,6$ ).

---

1) Программная оболочка OPMODA разработана А.В. Васильевым.

2) В настоящее время это лаборатория оптики аэрозоля в составе ИОА СО РАН.

3) Для <уточненных> таким образом функций распределения аэрозольных частиц по размерам производилось сравнение с экспериментальными микрофизическими данными (выборочно).

4) На основе анализа зависимости <уточненной> функции распределения аэрозольных частиц по размерам от значений параметров, характеризующих состояние атмосферы ( $S_m$  и  $f$ ), проводилась параметризация этой зависимости.

5) Проводилось сравнение рассчитанных на основе полученной вышеописанным способом модели спектральных зависимостей коэффициентов аэрозольного ослабления в ИК-области спектра и элементов матрицы рассеяния в диапазоне  $\lambda < 1$  мкм с данными независимых оптических исследований.

Конкретное содержание отдельных этапов исследований и результаты рассматриваются отдельно. Здесь отметим только, что предлагаемая в результате проведенных исследований модель оптических характеристик аэрозолей представляет, по существу, промежуточный, компромиссный между предлагаемым выше и традиционным подходами вариант.

1. Кондратьев К.Я., Поздняков Д.В. Аэрозольные модели атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1981. 104 с.
2. Креков Г.М., Рахимов Р.Ф. Оптико-локационная модель атмосферного аэрозоля. Новосибирск: Наука, 1982. 249 с.
3. McClatchey R.M., Bolle H.J., Kondratyev K.Ya. Report of IAMAP Radiation Commission Working Group on a Standard Radiation Atmosphere. Ft. Collins, Colorado, USA, 10 August 1980, 46 p.
4. Малкевич М.С. Оптические исследования атмосферы со спутников. М.: Наука, 1973. 303 с.
5. Филиппов В.Л., Мирумянц С.О. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1971. Т. 7. N 7. С. 818–819.
6. Розенберг Г.В. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1967. Т. 3. N 9. С. 936–949.
7. Кондратьев К.Я., Москаленко Н.И., Поздняков Д.В. Атмосферный аэрозоль. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 224 с.
8. Ивлев Л.С., Андреев С.Д. Оптические свойства атмосферных аэрозолей. Л.: Изд. ЛГУ, 1986. 359 с.
9. Андреев С.Д., Зуев В.Е., Ивлев Л.С. и др. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1972. Т. 8. N 12. С. 1261–1267.
10. Кабанов М.В., Панченко М.В., Пхалагов Ю.А. и др. Оптические свойства прибрежных атмосферных дымок. Новосибирск: Наука, 1988. 201 с.

Институт физики при Санкт-Петербургском государственном университете, С-Петербург

Поступила в редакцию  
8 сентября 1994 г.

**S.D. Andreyev, L.S. Ivlev. Simulation of Optical Characteristics of Atmospheric Ground Layer Aerosol within 0.3–15  $\mu\text{m}$  Spectral Range. P. 1. Principles of Constructing of the Model.**

Deficiency and low reliability of initial data when modeling optical characteristics of atmospheric aerosol cause inconsistency in results of investigation as well as difficulty of their interpretation. Possible ways to clear these obstacles are observed in the paper.