

**В.С. Комаров, А.А. Мицель, С.А. Михайлов,  
Ю.Н. Пономарев, В.П. Руденко, К.М. Фирсов**

## **ПРОГРАММНОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАДАЧ ОПТИКИ АТМОСФЕРЫ**

Приводятся результаты разработки программного комплекса для численного моделирования энергетических потерь оптического излучения произвольного спектрального состава при его распространении в атмосфере по наклонным и горизонтальным трассам. Комплекс включает в себя два пакета прикладных программ, разработанных для ЭВМ БЭСМ-6, ЕС СВМ, NORD и предусматривает возможность диалога между пользователем и ЭВМ.

Для решения задач переноса оптического излучения в атмосфере, дистанционного оптического зондирования состояния окружающей среды в настоящее время используются все большие объемы количественной информации о спектрах поглощения молекулярных газов атмосферы, коэффициентах молекулярного рассеяния и аэрозольного ослабления, пространственных полях температуры и влажности и т. д.

Успехи лазерной и фурье–спектроскопии высокого спектрального разрешения привели к появлению банков параметров спектров поглощения атмосферных и загрязняющих атмосферу газов, в которых хранится информация о сотнях тысяч спектральных линий [1].

Развитие техники шар–зондовых, ракетных, спутниковых исследований атмосферы обеспечило создание архивов метеорологических данных, на основе которых разрабатываются глобально-региональные модели, описывающие высотное распределение оптически-активных компонент атмосферы [2–4].

Эффективное использование накопленной спектроскопической и метеорологической информации в практических целях возможно на пути развития специализированных баз данных, расчетных методик и программных комплексов (пакетов прикладных программ). В качестве примера можно привести пакет программ LOWTRAN–5 [5], позволяющий вычислять функции поглощения и пропускания атмосферы для спектрального интервала с фиксированной шириной  $20 \text{ см}^{-1}$  и его более позднюю версию [6] для ширины спектрального интервала  $5 \text{ см}^{-1}$ .

Аналогичные исследования развиваются в Институте оптики атмосферы СО АН СССР. Так, в [7, 8] описаны принципы построения и результаты разработки информационно-поисковой системы АТЛАС, предназначенной для формирования, хранения и эксплуатации массивов параметров спектральных линий молекулярных газов атмосферы естественного происхождения и примесей. Соответствующее описание без метеорологических данных содержится в [9, 10].

В настоящей работе рассмотрены результаты разработки специализированного программно-информационного комплекса для численного моделирования процессов энергетического ослабления оптического излучения произвольного спектрального состава при его распространении в атмосфере по наклонным и горизонтальным трассам. Комплекс состоит из двух программных систем, которые функционируют в пакетном режиме счета и предусматривают возможность диалога между пользователем и ЭВМ, а также включает в себя архив обобщенных метеорологических данных. Рассмотрим элементы программно-информационного комплекса подробнее.

**1. Пакет прикладных программ LARA (*Light Attenuation in Real Atmosphere*)** позволяет проводить оперативные расчеты коэффициентов молекулярного и аэрозольного ослабления, а также функций пропускания для наклонных и горизонтальных атмосферных трасс при работе с источниками квазимонохроматического узкополосного и широкополосного оптического излучения [11, 12].

При расчете характеристик прозрачности учитываются три основных эффекта ослабления радиации: молекулярное поглощение, аэрозольное и молекулярное рассеяние света.

При создании пакета LARA основное внимание было уделено молекулярному поглощению, наиболее сильно зависящему от длины волны. Для расчета коэффициентов поглощения и функций пропускания используется метод полинейного счета, который в отличие от приближенных методов, разрабатываемых на основе моделей полос поглощения, учитывает реальную тонкую структуру спектра поглощения в выбранном диапазоне частот. Этот метод позволяет вычислять функции пропускания для любого спектрального разрешения. Кроме того, в пакете LARA используются оригинальные алгоритмы счета и специальные критерии селекции линий поглощения, позволяющие существенно сокращать временные затраты ЭВМ [12]. Аэрозольное ослабление рассчитывается по известным оптическим моделям атмосферного аэрозоля [5, 14]. В качестве метеорологических моделей используются средне-зональные модели высотного распределения термодинамических параметров атмосферы, разработанные в ИОА [2–4].

Структурно пакет LARA состоит из пяти частей, организованных в виде отдельных подсистем.

Основная подсистема позволяет рассчитывать характеристики ослабления (коэффициент ослабления, оптическую толщину, функцию пропускания) как отдельно для каждой из ослабляющих компонент атмосферы (газа, аэрозоля), так и для смеси этих компонент. При работе этой подсистемы используется исходная информация, содержащаяся в архивах, организованных в виде отдельных автономных подсистем.

МЕТЕО — подсистема, которая дает возможность просматривать пять среднезональных моделей высотного распределения давления, температуры и концентрации газов ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $O_3$ ,  $N_2O$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $O_2$ ,  $NO$ ,  $SO_2$ ,  $NO_2$ ,  $NH_3$ ). Кроме того, подсистема позволяет поместить в архив две произвольные модели либо данные срочных аэрологических наблюдений.

СПЕКТР — подсистема для просмотра архива параметров линий поглощения 37 атмосферных и примесных газов в диапазоне от 0,3 до  $17880\text{ см}^{-1}$ , содержащихся в [1]. Предусмотрена возможность подключения рекомендованной базы спектральных данных, разработанной в ИОА [7, 8].

АЭРОЗОЛЬ — подсистема, позволяющая до проведения расчетов характеристик пропускания в основной подсистеме просмотреть и подобрать требуемый высотный профиль коэффициента аэрозольного ослабления. В качестве аэрозольных моделей используются модели, разработанные в ИОА [14], и другие оптические модели [5].

КОНТИНУУМ — подсистема, с помощью которой можно определить, какой вклад в суммарный эффект ослабления дает поглощение крыльями далеких линий в отдельных участках спектра. В подсистеме используются данные по константам континуального поглощения  $CO_2$ ,  $H_2O$  и  $N_2$ . Данные по  $CO_2$  получены в ИОА на основе теории крыльев линий [13], по остальным газам используются литературные данные [5].

Во всех подсистемах диалог реализован по принципу «меню». Пользователю, работающему с пакетом, задаются вопросы в общепринятой терминологии, на которые достаточно отвечать «да», «нет» или вводить цифровую информацию (например, номер режима работы, номер метеомодели и т. д.). Все вводимые данные проверяются на принадлежность области допустимых значений и взаимную согласованность. В случае некорректного ввода исходных данных ЭВМ выдает подробную диагностику и представляет возможность исправить ошибку.

Пакет реализован на языке FORTRAN и адаптирован для ЭВМ серии ЕС, БЭСМ-6, NORD 100/500. Объем программ составляет свыше 5 тыс. строк текста, объем архивов — около 15 Мбайт.

**2. Пакет прикладных программ AIRA (*Absorption of Infrared Radiation in the Atmosphere*)** предназначен для численного моделирования процессов переноса широкополосного инфракрасного излучения (включая собственное тепловое излучение Земли) через атмосферу по произвольным трассам [15]. Учитываются те же факторы, влияющие на ослабление излучения, что и в пакете LARA.

Возможными областями применения пакета программ AIRA могут быть атмосферная оптика, пассивное зондирование газового состава атмосферы, оптическая климатология.

Как и в программной системе LARA, в пакете AIRA основные ресурсы и затраты связаны с учетом молекулярного поглощения. Однако в отличие от предыдущего пакета, в данном случае используются алгоритмы быстрого счета, основанные на модельном представлении полос поглощения [15]. Параметры моделей полос рассчитываются на основе атласа спектральных линий. В пакете предусмотрена коррекция одного из параметров модели по имеющимся экспериментальным либо полученным методом прямого счета данным о функции пропускания, что позволяет повысить точность оценки атмосферного поглощения. Расчет функций поглощения проводится для любого спектрального разрешения ( $\Delta\nu \geq 1\text{ см}^{-1}$ ).

Аэрозольное ослабление света учитывается по известным оптическим моделям атмосферного аэрозоля [5].

В отличие от пакета LARA в пакете AIRA используются не только среднезональные, но и региональные модели атмосферы, построенные для отдельных квазиоднородных районов земного шара, выявленных на основе объективной прикладной классификации и адекватно описывающих для каждого из них высотное распределение оптически активных компонент.

Структурно пакет AIRA также состоит из двух основных частей — алгоритмических модулей и архивов исходных данных (рис. 1).

Алгоритмические модули по желанию пользователя могут работать в одном из трех режимов:

- в режиме расчета функции пропускания на основе атласа спектральных линий;
- в режиме коррекции параметра моделей;
- в режиме расчета собственного длинноволнового излучения Земли.

Архивы исходных данных включают в себя:

— АРХИВ ЛИНИЙ ПОГЛОЩЕНИЯ, выполненный в виде отдельного файла и содержащий спектральную информацию о 37 атмосферных и примесных газах. В качестве архива используется компиляция [1].

— АРХИВ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ, выполненный в виде блоков DATA, встроенных в фортрановские модули и содержащих информацию о пяти среднезональных моделях высотного распределения давления, температуры, концентрации таких оптически активных газов, как  $H_2O$ ,  $O_3$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $N_2O$  и  $NO_x$ . Кроме того, архив включает в себя шесть региональных климатиче-

ских моделей, описывающих вертикальное распределение температуры, влажности, концентрации озона в типичных квазиоднородных районах северного полушария (более подробное описание этих моделей дается ниже). Архив региональных моделей выполнен в виде отдельного файла.

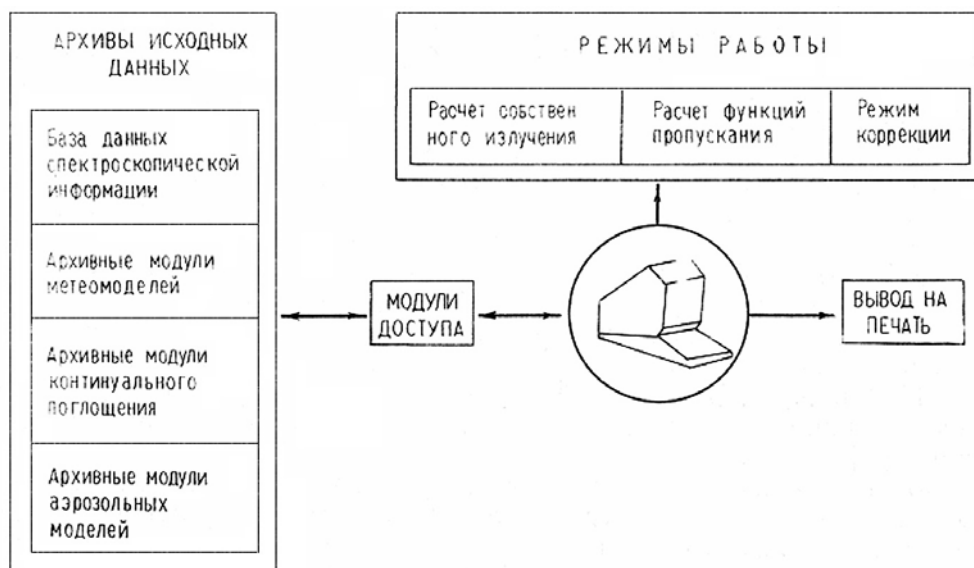


Рис. 1. Функциональная блок-схема системы AIRA

— **АРХИВЫ КONTИНУАЛЬНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ И АЭРОЗОЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ**, полностью заимствованные из пакета LARA. Пакет AIRA реализован на ЭВМ серии ЕС в системе СВМ; язык программирования — FORTRAN объем программ ~4,5 тыс. строк текста, объем архивов — 15 Мбайт. Предусмотрена возможность адаптации пакета на другие типы ЭВМ.

**3. Информационное обеспечение по метеорологическим данным.** Поскольку данные о физическом состоянии атмосферно-оптического канала, накопленные в последнее время, составляют по своему объему около  $1,3 \cdot 10^{11}$  байт, а темпы накопления  $10^{10}$  байт в год [9], то такой объем первичных наблюдений, естественно, не может быть использован при решении практических задач, в том числе и задач по оценке энергетического ослабления оптического излучения, распространяющегося в земной атмосфере. В связи с этим были разработаны методы оптимального физико-статистического обобщения исходных аэрологических наблюдений, основанные на использовании специальных алгоритмов объективной классификации и моделирования высотных метеорологических полей (некоторые аспекты такого обобщения изложены в [3, 4]). В настоящее время нами реализован более совершенный алгоритм объективной прикладной классификации высотных метеорологических полей, разработанный применительно к задачам дистанционного зондирования атмосферы и позволивший построить более надежные глобально-региональные модели атмосферы. Эти модели и вошли в архив региональных моделей в пакете AIRA.

В отличие от методов классификации, изложенных в [3, 4], описываемый алгоритм впервые основан на совместном использовании эвристических и математических методов. При этом объективное прикладное районирование осуществлялось на основе характеристик общей циркуляции атмосферы (зонального и меридионального переноса, положения планетарных высотных фронтальных зон и центров действия атмосферы, зон конвергенции тепла и влаги и т.п.) и на основе учета пространственно-временной изменчивости высотных профилей комплекса «давление — температура — влажность — озон», осуществленного с помощью метода естественных ортогональных составляющих и специально разработанных критериев сходства [3].

Реализация такого подхода при проведении комплексной прикладной классификации позволила не только провести более надежное климатическое районирование, но и построить более совершенную и адекватную глобально-региональную модель атмосферы, которая описывает как главные закономерности высотного распределения оптико-активных компонент воздушной среды в трех широтных зонах северного полушария: полярной ( $60 - 90^\circ$  с.ш.), умеренной ( $30 - 60^\circ$  с.ш.), и тропической ( $0 - 30^\circ$  с.ш.), так и региональные особенности этого распределения в отдельных квазиоднородных районах, выявленных в процессе этой классификации. Пример региональной модели, построенной для одного из квазиоднородных районов, представляющего северо-восток Атлантики, показан на рис. 2.

Основные направления дальнейшего развития пакетов прикладных программ для решения задач оптики молекулярной атмосферы связаны с расширением функциональных возможностей оперативных расчетов ослабления лазерного излучения, включая импульсное, с разработкой автоматизированных банков поглощения, содержащих детальную информацию о характеристиках поглощения атмосферных газов для различных спектральных участков, и наконец, с расширением базы аэрологиче-

ских данных за счет привлечения новых источников информации (спутниковой, лидарной, ракетной) и созданием сервисных программ для их обработки.

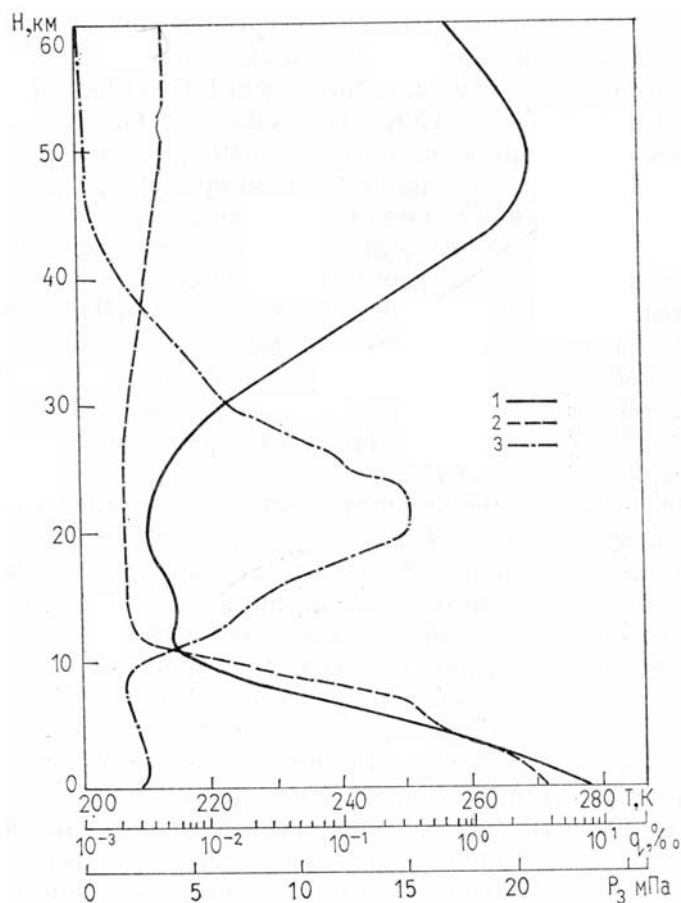


Рис. 2. Региональные модели вертикального распределения температуры воздуха (1), водяного пара (2) и озона (3) для квазиоднородного района, расположенного в северо-восточной части Атлантического океана (зима)

1. Chedin A., Husson N., Scott N.A. et al. The GEISA data bank: 1984 version Laboratoire de Meteorol. Dynamique du CNRS, 1986 and references therein.
2. Ипполитов И.И., Комаров В.С., Мицель А.А. — В сб.: Спектроскопические методы зондирования атмосферы. — Новосибирск: Наука, 1985, с. 4—44.
3. Зуев В.Е., Комаров В.С. Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1986. — 264 с.
4. Zuev V.E., Komarov V.S. Statistical Models of the Temperature and Gaseous Components of the Atmosphere. — D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, 1987. — 306 p.
5. Kneizys F.X., Shettle E.P., Gallery W.O. et al. Atmospheric Transmittance/Radiance: Computer Code Lowtran 5—AFGL-TR-80-0067. ERP № 697. — 1980, 233 p.
6. Robertson D.S., Bernstein L.S., Haimes P. et al. — Appl. Optics, 1981, v. 20, № 18, p. 3218—3226.
7. Руденко В.П., Попков А.И., Яковлев Н.Е. Программное обеспечение архива параметров спектральных линий. Томск, 1982. — 50 с. (Препринт № 10/ТФ СО АН СССР).
8. Войцеховская О.К., Зуев В.Е., Макушкин Ю.С. и др. Автоматизированная система формирования и управления базой данных по параметрам спектральных линий атмосферных и примесных газов. Томск, 1985. — 54 с. (Препринт № 3/ТФ СО АН СССР).
9. Бабинов Ю.Л., Калайда В.Т. — В сб.: Прикладное математическое обеспечение в системе коллективного пользования. Новосибирск: Наука, 1986, с. 54—65.
10. Комаров В.С., Михайлов С.А., Ромашов Д.Н. — В кн.: Всес. симп. по фотохимическим процессам земной атмосферы. (Тез. докладов). М.: Институт химической физики АН СССР, 1986, с. 168—169.
11. Зуев В.Е., Макушкин Ю.С., Мицель А.А. и др. — Докл. АН СССР. 1985, т. 283, № 2, с. 345—348.
12. Макушкин Ю.С., Мицель А.А., Руденко В.П., Яковлев Н.Е. — В сб.: Прикладное математическое обеспечение в системе коллективного пользования. — Новосибирск: Наука, 1986, с. 28—38.
13. Несмелова Л.И., Родимова О.Б., Творогов С.Д. Контур спектральной линии и межмолекулярное взаимодействие. — Новосибирск: Наука, 1986. — 215 с.

14. Креков Г. М., Рахимов Р. Ф. Оптико-локационная модель континентального аэрозоля. — Новосибирск: Наука, 1982. — 200 с.
15. Блаховская Т. В., Мицель А. А., Фирсов К. М. Автоматизированная система для численного моделирования переноса излучения в атмосфере (система ПИИА). Ч. I. Методы расчета оптических характеристик. — Изв вузов Физика, 1988, № 3, 38 с. Деп. в ВИНТИ, рег. № 3685-84. Те же, ч. 2. Описание пакета программ. — Изв. вузов, Физика, 1988, № 3, 55 с., Деп. в ВИНТИ рег. № 3686-84.
16. Мицель А. А., Фирсов К. М. — Изв. АН СССР, ФАО, 1987, т. 23, № 11, с. 1221—1227.

Институт оптики атмосферы  
СО АН СССР, Томск

Поступила в редакцию  
14 марта 1988 г.

V.S. Komarov, A.A. Mitsel, S.A. Mikhailov, Yu.N. Ponomarev,  
V.P. Rudenko, K.M. Firsov. **Software and Information Support to Problems of Molecular Atmospheric Optics.**

A problem-oriented software product set for numerical simulation of processes responsible for attenuation of optical radiation propagating through the atmosphere was developed. It includes two interactive application program packages to be used with BESM-6, ES SVM and NORD computers.