

МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ.
ОБРАБОТКА ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

УДК 551.510

М.Ю. Катаев, А.А. Мицель, И.В. Пташник, К.М. Фирсов

ПАКЕТ ПРОГРАММ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ГАЗОВОГО СОСТАВА АТМОСФЕРЫ
СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Описан пакет программ (PARSEG) для моделирования и обработки данных дистанционного зондирования газового состава атмосферы спектрофотометрическими методами. Рассмотрены методы спектрометрии прямого и рассеянного солнечного излучения. Для указанных методов получены выражения, позволяющие получать общее содержание газов атмосферы и погрешности восстановления. Приведена блок-схема пакета программ, отражающая основные структурные блоки пакета.

1. Введение

Методы определения общего содержания (ОС) газов и аэрозоля, основанные на интерпретации данных измерений прямого и рассеянного солнечного излучения, а также собственного излучения атмосферы и подстилающей поверхности, давно используются в практике исследования атмосферы [1–6]. Эти методы отличаются высокой избирательностью, точностью и чувствительностью, высоким уровнем развития оптико-электронной аппаратуры. Существенным стимулом развития и широкого использования спектрофотометрических методов зондирования является возможность получения данных о пространственно-временных вариациях состава атмосферы над всей планетой.

По физическому принципу спектрофотометрические методы можно разделить на три основных:

- 1) метод измерения прозрачности атмосферы по внеатмосферным источникам света – Солнцу, Луне, звездам;
- 2) метод измерения рассеянного и отраженного подстилающей поверхностью солнечного излучения;
- 3) метод измерения собственного теплового излучения атмосферы и подстилающей поверхности.

По способу базирования измерительного прибора (по геометрии эксперимента) принята следующая классификация:

- 1) наземное базирование;
- 2) самолетное и аэростатное;
- 3) спутниковое.

По числу спектральных каналов используются одноканальные, двухканальные и многоканальные приборы. Определяемыми параметрами являются

- 1) интегральное (общее) содержание газов (ОС);
- 2) высотные профили концентрации газов, температуры, давления;
- 3) аэрозольная и молекулярная составляющие (оптические толщ, профили коэффициентов ослабления).

Важным этапом инженерного проектирования является предварительное моделирование потенциальных возможностей измерительных систем, выбор оптимальных спектральных каналов. В предлагаемой работе приводятся результаты разработки первой версии пакета программ PARSEG для моделирования дистанционного зондирования газов атмосферы пассивными методами. В первой версии мы ограничились двумя методами: методом измерения прозрачности и методом измерения рассеянного солнечного излучения приборами наземного базирования [7].

2. Постановка задачи

Математической основой для моделирования зондирования газов является уравнение переноса. Выпишем основные соотношения для вышеперечисленных методов.

а) Метод прозрачности

Двухволновая методика. Регистрируемый сигнал связан с пропусканием T_g газа соотношением

$$I_\lambda = J_{0\lambda} C_\lambda T_{AM}(\lambda, m) \int_{\Delta\lambda} G(\lambda - \lambda') T_g(\lambda, m) T_f(\lambda, m) d\lambda', \quad (1)$$

где $J_{0\lambda}$ – солнечная постоянная, Вт/м² мкм · ср; C_λ – константа калибровки прибора; $C_\lambda = A\Omega q_\lambda \eta_\lambda (1 - q_l)$; A – площадь приемной апертуры; $\Omega = \pi \frac{\varphi^2}{4}$, φ – полный линейный угол поля зрения приемного телескопа; q_λ – пропускание оптики; η_λ – квантовая эффективность фотодетектора; q_l – прочие потери; $G(\lambda - \lambda')$ – аппаратная функция прибора; $T_{AM}(\lambda, m)$ – пропускание аэрозольно-молекулярной атмосферы в направлении на Солнце; $m = 1/\cos\theta$, θ – зенитный угол линии визирования; $T_g(\lambda, m)$ – пропускание исследуемого газа; $T_f(\lambda, m)$ – пропускание мешающих газов.

Запишем выражение для пропускания $T_g(\lambda, m)$

$$T_g(\lambda, m) = \exp\left\{-m \int_0^H K(\lambda, z) p(z) dz\right\}, \quad (2)$$

где $p(z)$ – концентрация исследуемого газа; $K(\lambda, z)$ – коэффициент поглощения на единицу концентрации газа; H – высота верхней границы атмосферы.

При интерпретации данных измерений спектра Солнца суммарное пропускание газов аппроксимируется произведением пропусканий газовых составляющих, т.е.

$$I_\lambda = J_{0\lambda} C_\lambda T_{AM}(\lambda, m) T_g(\lambda, m) T_f(\lambda, m), \quad (3)$$

где T_g, T_f – интегральные пропускания исследуемого и мешающих газов.

Следующее приближение, используемое в двухволновой методике, состоит в том, что полагают выполнение условий: $J_{0\lambda_1} = J_{0\lambda_2}$; $T_{AM}(\lambda_1, m) = T_{AM}(\lambda_2, m)$; $T_f(\lambda_1, m) = T_f(\lambda_2, m)$. Тогда отношение зарегистрированных сигналов на двух длинах волн будет зависеть от исследуемого параметра

$$W = \int_0^H p(z) dz.$$

$$I_{\lambda_1} / I_{\lambda_2} = F(W, m), \quad (4)$$

где W – общее содержание газа.

б) Метод рассеяния

В УФ и видимой области спектры большинства газовых составляющих при атмосферных условиях не имеют селективной структуры в пределах интервала (0,1 – 1) нм, типичного разрешения спектрофотометров, поэтому влиянием аппаратной функции можно пренебречь. Регистрируемый сигнал в приближении однократного рассеяния имеет вид [8]

$$I_\lambda = J_{0\lambda} \tilde{C}_\lambda \exp[-K_\lambda W - \tau_{atm}(\lambda, H)] J_s(\lambda, \theta); \quad (5)$$

$$J_s(\lambda, \theta) = \int_0^H d_\lambda(z, \theta) \exp \left\{ \int_z^H \alpha_\Sigma(z', \lambda) [1 - B_\lambda(z, z', \theta)] dz' \right\} dz, \quad (6)$$

где K_λ – коэффициент поглощения исследуемого газа; \tilde{C}_λ – константа калибровки; $\tau_{AMf}(\lambda, H)$ – суммарная оптическая толщина аэрозоля, молекулярной составляющей и мешающих газов; $d_\lambda(z, \theta)$ – коэффициент рассеяния частиц аэрозоля и молекул воздуха; α_Σ – суммарный коэффициент ослабления: $\alpha_\Sigma = \alpha_A + \alpha_M + \alpha_g + \alpha_f$; α_A, α_M – объемные коэффициенты ослабления аэрозоля и молекулярного рассеяния соответственно, α_g, α_f – объемные коэффициенты поглощения исследуемого газа и мешающих газов соответственно, $B_\lambda(z, z', \theta)$ – функция трассы.

$$B_\lambda(z, z', \theta) = \frac{(R + z') n(z')}{\sqrt{(R + z')^2 n_\lambda^2(z') - (R + z)^2 n^2(z) \sin^2 \theta}},$$

$n_\lambda(z)$ – показатель преломления воздуха; R – радиус Земли.

Двухволновая методика дает следующее выражение для общего содержания газа:

$$W = \frac{1}{\Delta K} \left\{ \ln \left[\frac{J_0^{1,2} C^{1,2}}{I^{1,2}} \right] - [\Delta \tau_A + \Delta \tau_M + \Delta \tau_f] + \ln J_s^{1,2} \right\}, \quad (7)$$

где

$$\Delta K = K(\lambda_1) - K(\lambda_2); \quad \Delta \tau_j = \tau_j(\lambda_1) - \tau_j(\lambda_2); \quad j = A, M, f,$$

$$J_0^{1,2} = \frac{J_0(\lambda_1)}{J_0(\lambda_2)}; \quad I^{1,2} = I(\lambda_1) / I(\lambda_2); \quad J_s^{1,2} = \frac{J_s(\lambda_1)}{J_s(\lambda_2)}.$$

Нетрудно получить соответствующее выражение для четырехволновой методики определения ОС [4, 8].

3. Модель функций пропускания

Для получения выражения вида (4) в задаче определения ОС газа по солнечным спектрам представим функцию пропускания T_g в виде

$$T_g = \exp \{ -\beta_\lambda [mW]^{N_\lambda} \}, \quad (8)$$

где β_λ, N_λ – параметры, определяемые подгонкой к лабораторным или расчетным данным. В данной работе в качестве эталонных значений T_g мы использовали значения, рассчитанные методом полинейного счета пропускания. Расчет пропусканий T_g проводился для разных метеоусловий и оптических масс воздуха. Вариации метеоусловий позволили определить границы применимости модели (8), а изменение воздушной массы m обеспечило определение параметров β_λ и N_λ . В качестве примера приведем значения β_λ и N_λ для двух газов и двух каналов (см. таблицу).

Газ	H ₂ O		CO ₂
$\lambda, \text{мкм}$	2,06	2,18	2,06
β_λ	0,93	0,74	8,4
N_λ	0,78	0,68	0,64

4. Погрешности определения интегрального содержания газов

а) Метод прозрачности

Перепишем уравнение (4) для определения общего содержания газа в следующем виде:

$$F(W) = \frac{I_1}{I_2} b g h = \frac{T_g(1, W)}{T_g(2, W)}, \quad (9)$$

где $b = \frac{C_2}{C_1}$; $g = T_{AM}(\lambda_2) / T_{AM}(\lambda_1)$; $h = T_f(\lambda_2) / T_f(\lambda_1)$.

При определении ОС газа часто полагают равными единице величины b, g, h , что приводит к появлению систематической погрешности. Привлечение модельных данных о величинах b, g, h позволяет уменьшить погрешность, но полностью исключить ее нельзя.

Оценим общую погрешность определения, исходя из модели (8) для пропускания T_g . Введем следующие обозначения: $\delta_{\beta_1} = \delta_{\beta_2} = \delta_{\beta}$ – относительная погрешность определения параметров β_1 и β_2 ; $\delta_{N_1} = \delta_{N_2} = \delta_N$ – относительная погрешность определения параметров N_1 и N_2 ; $\Delta t_g(\lambda_1) = \Delta t_g(\lambda_2) = \Delta T_g$ – погрешность модели пропускания;

$$A = N_1 \beta_1 a^{N_1} - N_2 \beta_2 a^{N_2}; \quad a = m W; \quad (10)$$

$$P = A \ln a; \quad (11)$$

$$R^2 = \beta_1^2 a^{2N_1} + \beta_2^2 a^{2N_2}; \quad (12)$$

$$V^2 = T_g^{-2}(\lambda_1) + T_g^{-2}(\lambda_2); \quad (13)$$

$$\gamma_i^2 = \frac{1}{\Delta t f T_i^2} \{ \delta^2 (I_i + I_b)^2 + \text{NEP}^2 \eta^2 f \} \quad (14)$$

– сигнальная погрешность; $i = 1, 2$; Δt – время накопления сигнала; f – частота отсчетов; NEP – эквивалентная мощность шума приемника; δ – относительная погрешность измерения сигнала; I_b – сигнал фонового излучения.

Формула для относительной погрешности W имеет вид

$$\delta_W = \frac{1}{A} \{ \gamma_1^2 + \gamma_2^2 + \Delta b^2 + \Delta g^2 + \Delta h^2 + \delta_{\beta}^2 R^2 + \delta_N^2 P^2 + \Delta T_g^2 V^2 \}^{1/2}. \quad (15)$$

Здесь два первых слагаемых – случайная погрешность измерения сигналов; $\Delta b^2, \Delta g^2, \Delta h^2$ характеризуют погрешность модели интерпретации данных.

б) Метод рассеяния

В этом методе модель интерпретации данных (7) в приближении однократного рассеяния существенно сложнее, чем в методе прозрачности. В связи с этим мы отказались от аналитических формул для погрешности вида (10)–(15).

Полная погрешность определения ОС газа определяется по следующим формулам [8]:

$$\delta_W = \left\{ \sum_{i=1}^n \delta_W^2(i) \right\}^{1/2}, \quad \delta_W(i) = \frac{\Delta W_i}{W_i}, \quad (16)$$

где $\delta_W(i)$ – относительная погрешность определения ОС, обусловленная погрешностью Δy_i i -го аргумента функции $W(y_1, \dots, y_n)$,

$$\Delta W_i = W(y_1, \dots, y_i + \Delta y_i, y_{i+1}, \dots, y_n) - W(y_1, \dots, y_i, y_{i+1}, \dots, y_n), \quad (17)$$

n – число аргументов, погрешности которых принимаются во внимание. Таким образом, ошибка δ_W вычисляется путем варьирования всех аргументов, заданных с некоторой погрешностью. Перечислим все источники погрешностей; δK_g – относительная погрешность знания коэффициента поглощения исследуемого газа; $\delta I^{1,2}$ – относительная погрешность измерения отношения сигналов на двух длинах волн; $\delta J_0^{1,2}$ – относительная погрешность знания отношения солнечных постоянных; $\Delta \theta$ – абсолютная погрешность определения зенитного угла Солнца; $\Delta \tau_{AMf}$ – относительная погрешность знания оптической толщи аэрозоля, молекулярного рассеяния и мешающих газов; $\Delta \lambda$ – абсолютная погрешность калибровки спектрофотометра по длине волны.

5. Пакет программ

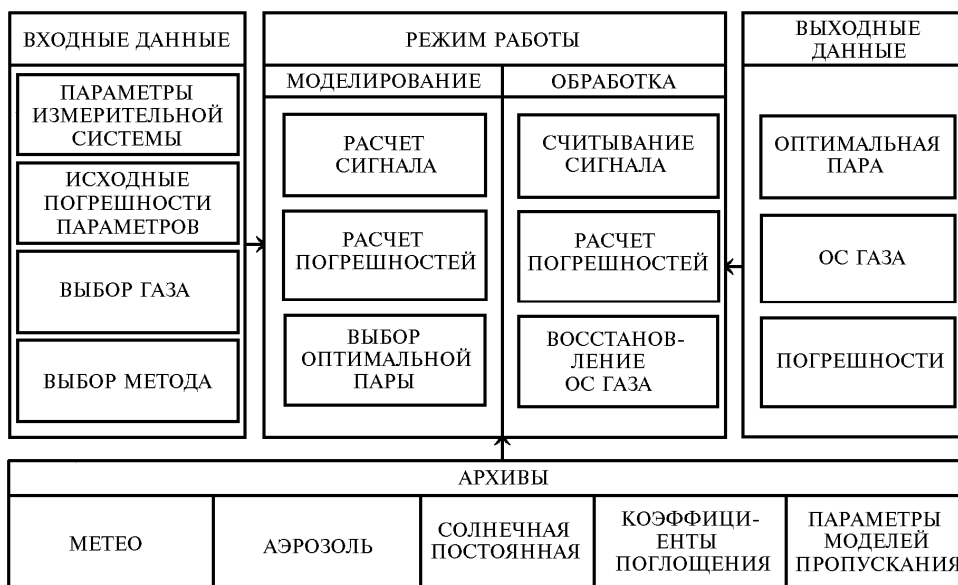
Блок-схема пакета программ PARSEG (Passive Remote Sensing of Atmospheric Gases) представлена ниже. Пакет включает в себя четыре блока:

1) входные данные; 2) режим работы; 3) архивы и 4) выходные данные, объединенные управляющей программой («оболочкой»).

Входные данные определяют:

- 1) параметры измерительной системы (в режиме моделирования);
- 2) исходные погрешности параметров;
- 3) номер зондируемого газа и
- 4) метод зондирования.

Пакет может работать как в режиме моделирования, так и в режиме обработки реальных данных.



Архив МЕТЕО содержит архивную информацию о высотном распределении температуры, давления и концентрации 12 газов (H_2O , CO_2 , O_3 , N_2O , CO , CH_4 , NO , SO_2 , NO_2 , NH_3 , HNO_3) для пяти моделей атмосферы (тропики, лето (зима) средних широт и лето (зима) полярных широт) [9, 10]. В архивы включена также информация об оптических параметрах аэрозоля (коэффициенты ослабления и рассеяния) [11], спектральной зависимости солнечной постоянной [12], коэффициентах поглощения газов [13–16] и моделях пропускания.

Выходными данными программы являются общее содержание газа и его погрешность (в режиме обработки) или оптимальные пары длин волн и ожидаемые погрешности определения ОС газов (в режиме моделирования).

В программе предусмотрен режим просмотра исходных данных и результатов расчета как в табличном, так и в графическом виде, а также вывод на печать.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект N94–01–01328).

1. Кондратьев К. Я., Тимофеев Ю. М. Термическое зондирование атмосферы со спутников. Л.: Гидрометеоздат, 1970. 312 с.
2. Малкевич М. С. Оптические исследования атмосферы со спутников. М.: Наука, 1973. 303 с.
3. Кароль И. Л., Розанов В. В., Тимофеев Ю. М. Газовые примеси в атмосфере. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 223 с.
4. Гушин Г. П., Виноградова Н. Н. Суммарный озон в атмосфере. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 238 с.
5. Гушин Г. П. Методы, приборы и результаты измерений спектральной прозрачности атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 200 с.
6. Назаров И. М., Николаев А. Н., Фридман Ш. Д. Дистанционные и экспрессные методы определения загрязнений окружающей среды. Л.: Гидрометеоздат, 1977. 194 с.

7. Катаев М.Ю., Мицель А.А., Пташник И.В., Фирсов К.М. // II Межреспубл. симп. «Оптика атмосферы и океана». Томск, 1995. Ч. 2. С. 285–286.
8. Долгий С.И., Зуев В.В., Маричев В.Н. и др. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. N 5. С. 609–626.
9. Ипполитов И.И., Комаров В.С., Мицель А.А. // Спектроскопические методы зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1985. С. 4–44.
10. Зуев В.Е., Комаров В.С. Статистические модели температуры и газовых компонентов атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 264 с.
11. Креков Г.М., Рахимов Р.Ф. Оптические модели атмосферного аэрозоля. Томск, 1986. 294 с.
12. Arvesen J.C., Griffin R.N., Pearson B.D. // Appl. Opt. 1969. V. 8. N 11. P. 2215–2232.
13. Thomsen O., Bisling P. et al. // Proc. 15 ILRC. Tomsk, 1990. P. 2. P. 180–183.
14. Thomsen O., Hardeck P. et al. // J. Geoph. Res. 1963. V. 68. N 24. P. 6431–6436.
15. Molina L.T., Molina M.J. // J. Geoph. Res. 1986. V. 91. N 213. P. 14501–14508.
16. Brion J., Coquart B. et al. // Proc. EUROTRAC symp. 92. P. 423.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
12 апреля 1996 г.

M. Yu. Kataev, A.A. Mitsel, I.V. Ptashnik, K.M. Firsov. **Program Package for Simulation and Processing of Data on Atmospheric Gaseous Contents Remote Sensing by Spectrophotometric Methods.**

The program package (PARSEG) is described in the paper designed for simulation and processing of the remote sensing data on gaseous contents of the atmosphere using the spectrophotometric methods. The methods of the direct and scattered solar radiation spectrometry are treated. The expressions are deduced allowing the obtaining of the atmospheric gases total contents and the errors of the reconstruction.