

Взаимосвязь калибровочных коэффициентов для определения содержания озона в атмосфере по уходящему излучению Земли

С. А. Шишигин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук, Томск

E-mail: ssa@iao.ru

Введение

Основным методом измерения с земной поверхности общего содержания озона в атмосфере является квазимонохроматический метод в спектральном участке 290-370 нм. Погрешность спектрофотометра Добсона и озонметра М-83 может достигать 10 % и более [1].

Существующие методики восстановления атмосферного озона по данным измерений современных ИК-зондировщиков показывают, что при определении общего содержания озона достигается точность порядка 3-10% в зависимости от широты, сезона, состояния атмосферы. Основные трудности и ограничения детектирования озона по результатам измерений спутниковых ИК- зондировщиков связаны с влиянием вариации температуры подстилающей поверхности и вертикального профиля атмосферы, наличием аэрозольных слоёв в поле зрения радиометра и его спектральным разрешением регистрации уходящего излучения Земли [2, 3].

Разрешение спутниковых приборов для надирного зондирования (AIRS, IASI, IMG, TANSO-FTS, ИКФС-2) лежат в пределах $\sim 0.2-0.6 \text{ см}^{-1}$. Повышение точности контроля состояния озонового слоя требует развития и совершенствование физико-математических моделей атмосферы и алгоритмов обработки дистанционных измерений [4].

Корреляционный радиометр по сравнению с другими приборами газоанализа имеет сверхвысокое спектральное разрешение регистрируемого излучения из-за использования фильтра в виде кюветы с исследуемым газом [5]. Устраняется в регистрируемом сигнале радиометра неселективное взаимодействие излучения со средой [6]. Обработка сигналов регистрации уходящего излучения в единичных спектральных участках радиометрами осложняется неоднородностью атмосферы.

Соотношения для расчета содержания озона в атмосфере

Алгоритм детектирования озона по результатам измерений спутниковых ИК-зондировщиков, позволяющий уменьшить влияние вариации температуры подстилающей поверхности, вертикального профиля атмосферы, спектрального разрешения регистрации уходящего излучения Земли представлен в работе [7]. Рассмотрена модель атмосферы в виде последовательности однородных слоёв от поверхности Земли до высоты 40 километров. Параметры слоёв определены для стандартной атмосферы. Выбраны спектральные участки $1002-1003 \text{ см}^{-1}$ и $1020-1021 \text{ см}^{-1}$ с противоположной зависимостью коэффициента поглощения озона от изменения его температуры. Спектральное разрешение составляло 0.001 см^{-1} при расчётах коэффициентов поглощения, функции пропускания ИК излучения атмосферными слоями.

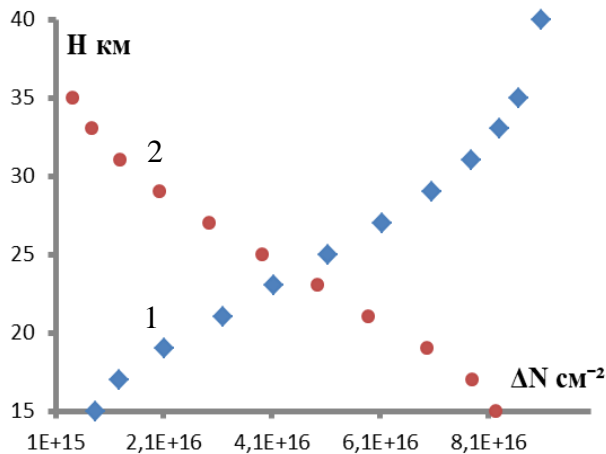


Рис.1 распределение 1% содержания озона в нижнем (1) и верхнем (2) атмосфере в зависимости от высоты.

Используемая модель атмосферы преобразована в виде одного эффективного однородного слоя 1-40 км., а также последовательностью эффективных однородных слоёв 1-15 км., 16-17 км., 18-19 км., 20-21 км., 22-23 км., 24-25 км., 26-27 км., 28-29 км., 30-31 км., 32-33 км., 34-35 км., 36-40 км., без изменения мощности уходящего излучения атмосферы спектрального участка ($1002-1003 \text{ см}^{-1}$) и ($1020-1021 \text{ см}^{-1}$).

На рисунке 1 показано распределение 1% содержания озона в двух эффективных слоях атмосферы в зависимости от толщины нижнего слоя.

Отклонение мощностей уходящего излучения ΔS_1 , ΔS_2 в спектральных участках $\Delta \nu_1$ и $\Delta \nu_2$ от излучения для выбранной модели атмосферы из-за изменения содержания газа в каждом из двух однородных слоёв атмосферы можно записать в виде системы двух уравнений [8];

$$\begin{cases} \langle \Delta S_1 \rangle = C_{1,1} \cdot (1 - \alpha_1 \cdot \Delta \nu_2) \cdot \Delta \nu_1 + C_{2,1} \cdot \Delta \nu_2 \\ \langle \Delta S_2 \rangle = C_{1,2} \cdot (1 - \alpha_2 \cdot \Delta \nu_2) \cdot \Delta \nu_1 + C_{2,2} \cdot \Delta \nu_2 \end{cases}$$

Параметры $C_{1,1}$, $C_{2,1}$, $C_{1,2}$, $C_{2,2}$, α_1 , α_2 , определяют влияние изменения содержания исследуемого газа в нижнем ΔN_1 и верхнем ΔN_2 слоях на изменение мощности уходящего излучения модели атмосферы $\langle \Delta S_1^0 \rangle$, $\langle \Delta S_2^0 \rangle$ и рассчитываются аналитически. $C_{1,1} = \langle \Delta S_{1,0}^0 \rangle / \Delta N_1$, где $\langle \Delta S_{1,0}^0 \rangle = \langle \Delta S_1^0 \rangle$ при $\Delta N_2 = 0$; $C_{1,2} = \langle \Delta S_{2,0}^0 \rangle / \Delta N_1$, где $\langle \Delta S_{2,0}^0 \rangle = \langle \Delta S_2^0 \rangle$ при $\Delta N_2 = 0$; $C_{2,1} = \langle \Delta S_{1,00}^0 \rangle / \Delta N_2$, где $\langle \Delta S_{1,00}^0 \rangle = \langle \Delta S_1^0 \rangle$ при $\Delta N_1 = 0$; $C_{2,2} = \langle \Delta S_{2,00}^0 \rangle / \Delta N_2$, где $\langle \Delta S_{2,00}^0 \rangle = \langle \Delta S_2^0 \rangle$ при $\Delta N_1 = 0$; $\alpha_{1,1} = (C_{2,1} \cdot \Delta N_2 + C_{1,1} \cdot \Delta N_1 - \langle \Delta S_1^0 \rangle) / (C_{1,1} \cdot \Delta N_1 \cdot \Delta N_2)$; $\alpha_{1,2} = (C_{2,2} \cdot \Delta N_2 + C_{1,2} \cdot \Delta N_1 - \langle \Delta S_2^0 \rangle) / (C_{1,2} \cdot \Delta N_1 \cdot \Delta N_2)$;

Корректировка содержания озона в атмосфере

Таблица 1. Калибровочные коэффициенты

H_1 км	$C_{1,1}$ Вт см ²	H_2 км	$C_{2,1}$ Вт см ²	α_1 см ²	$C_{1,2}$ Вт см ²	$C_{2,2}$ Вт см ²	α_2 см ²
40	1,08E-25				1,44E-25		
35	1,27E-25	36-40	-2,58E-25	1,13E-18	1,741E-25	-4,735E-25	3,07E-19
33	1,3E-25	34-40	-1,19E-25	8,29E-19	1,813E-25	-2,465E-25	5,73E-19
31	1,36E-25	32-40	-5,16E-26	6,67E-19	1,91E-25	-1,346E-25	4,34E-19
29	1,45E-25	30-40	-1,74E-26	2,25E-19	2,055E-25	-6,761E-26	2,91E-19
27	1,58E-25	28-40	6,982E-27	1,63E-19	2,269E-25	-2,678E-26	1,69E-19
25	1,75E-25	26-40	2,203E-26	2,03E-19	2,535E-25	2,151E-27	1,67E-19
23	2E-25	24-40	3,338E-26	2,83E-19	2,873E-25	2,519E-26	1,2E-19
21	2,34E-25	22-40	4,091E-26	1,64E-19	3,276E-25	4,545E-26	1,45E-19
19	3,08E-25	20-40	4,853E-26	1,6E-19	4,092E-25	6,4372E-26	1,5E-19
17	4,41E-25	18-40	5,457E-26	1,11E-19	5,167E-25	8,399E-26	1,47E-19
15	6,13E-25	16-40	5,672E-26	1,13E-19	6,264E-25	9,49E-26	1,74E-19

В таблице 1 приведены значения коэффициентов $C_{1,1}$, $C_{2,1}$, $C_{1,2}$, $C_{2,2}$, α_1 , α_2 , полученных для используемой модели атмосферы. В случае представления всей рассматриваемой атмосферы в виде одного эффективного слоя $\Delta N_2 = 0$ и отличие содержания озона от модельного ΔN_0 определяется в момент минимальной разности

значений $\Delta N_{1p} - \Delta N_{1r}$, рассчитанных в каждой из двух системы уравнений при вариации коэффициента $C_{1,1}$ и используя взаимосвязь его с коэффициентом $C_{1,2}$ (рис.2). Определенное таким образом значение ΔN_0 приводит рассматриваемую систему двух уравнений с двумя неизвестными к системе уравнений с одним неизвестным, так как $\Delta N_1 = \Delta N_0 - \Delta N_2$.

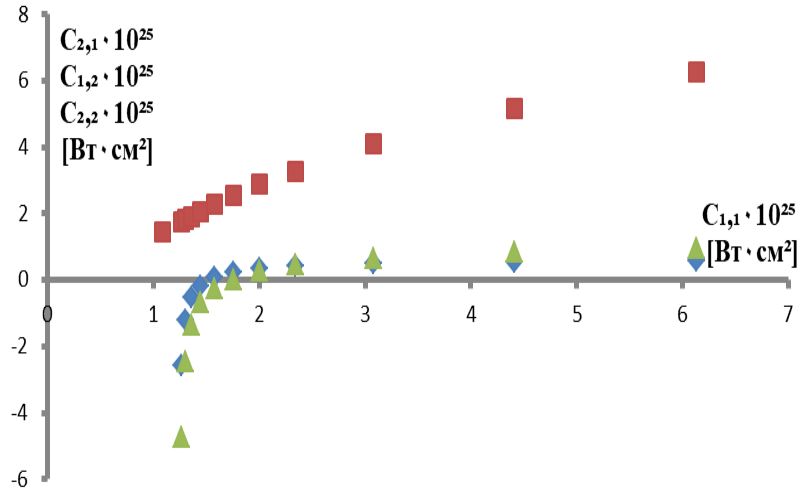


Рис. 2 Зависимость коэффициентов $C_{2,1}$, $C_{1,2}$, $C_{2,2}$ от $C_{1,1}$

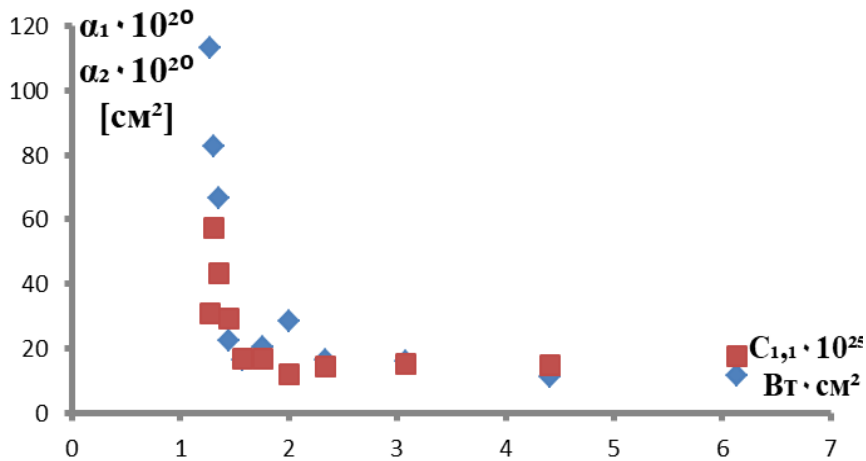


Рис. 3. Зависимость коэффициентов α_1 , α_2 от $C_{1,1}$

На рисунках 2 и 3 показана зависимость всех коэффициентов системы уравнений от $C_{1,1}$. Эти сложные зависимости можно аппроксимировать с коэффициентом корреляции и детерминации равном 1 и средней ошибкой менее $10^{-4}\%$ полиномами 5 и 6 степени в интервалах изменения $C_{1,1} \cdot 10^{25}$ (1,08-1,75), (1,75-6,13) [9].

$C_{1,1} \cdot 10^{25}$ (1,08 ÷ 1,75)

$$C_{2,1} \cdot 10^{25} = 5794,780945 \cdot (C_{1,1} \cdot 10^{25})^5 - 43495,544065 \cdot (C_{1,1} \cdot 10^{25})^4 + 130287,025334 \cdot (C_{1,1} \cdot 10^{25})^3 - 194703,187799 \cdot (C_{1,1} \cdot 10^{25})^2 + 145185,416803 \cdot C_{1,1} \cdot 10^{25} - 43222,531639$$

$$\alpha_1 \cdot 10^{25} = -42204938507,7156 \cdot (C_{1,1} \cdot 10^{25})^5 + 310183136105,5916 \cdot (C_{1,1} \cdot 10^{25})^4 - 908739826971,1164 \cdot (C_{1,1} \cdot 10^{25})^3 + 1326817349300,9794 \cdot (C_{1,1} \cdot 10^{25})^2 - 965646128642,8833 \cdot C_{1,1} \cdot 10^{25} + 280318446659,4737$$

$$C_{1,2} \cdot 10^{25} = -36,8060318125 \cdot (C_{1,1} \cdot 10^{25})^5 + 267,5553443093 \cdot (C_{1,1} \cdot 10^{25})^4 - 771,7280521441 \cdot (C_{1,1} \cdot 10^{25})^3 + 1103,9467060854 \cdot (C_{1,1} \cdot 10^{25})^2 - 781,3920424619 \cdot C_{1,1} \cdot 10^{25} + 219,9248457070$$

$$C_{2,2} \cdot 10^{25} = 10188,6215114621 \cdot (C_{1,1} \cdot 10^{25})^5 - 76296,0973587565 \cdot (C_{1,1} \cdot 10^{25})^4 + 227987,6178980849 \cdot (C_{1,1} \cdot 10^{25})^3 - 339870,7574277623 \cdot (C_{1,1} \cdot 10^{25})^2 + 252800,4771470036 \cdot C_{1,1} \cdot 10^{25} - 75070,8159811023$$

$$\alpha_2 \cdot 10^{25} = 42881762054,1835 \cdot (C_{1,1} \cdot 10^{25})^5 - 318718300384,7234 \cdot (C_{1,1} \cdot 10^{25})^4 + 944700590665,3765 \cdot (C_{1,1} \cdot 10^{25})^3 - 1395952763052,2693 \cdot (C_{1,1} \cdot 10^{25})^2 + 1028388813926,6394 \cdot C_{1,1} \cdot 10^{25} - 302172455825,6783$$

$C_{1,1} \cdot 10^{25}$ (1,75 ÷ 6,13)

$$C_{2,1} \cdot 10^{25} = -0,0173442332 \cdot (C_{1,1} \cdot 10^{25})^6 + 0,3555331388 \cdot (C_{1,1} \cdot 10^{25})^5 - 2,9359723937 \cdot (C_{1,1} \cdot 10^{25})^4 + 12,5719784677 \cdot (C_{1,1} \cdot 10^{25})^3 - 29,6524162785 \cdot (C_{1,1} \cdot 10^{25})^2 + 36,8993168367 \cdot C_{1,1} \cdot 10^{25} - 18,7239913377$$

$$\alpha_1 \cdot 10^{25} = 1140964,2005 \cdot (C_{1,1} \cdot 10^{25})^5 - 20152585,8649 \cdot (C_{1,1} \cdot 10^{25})^4 + 135294385,8855 \cdot (C_{1,1} \cdot 10^{25})^3 - 431875080,6222 \cdot (C_{1,1} \cdot 10^{25})^2 + 656395538,5970 \cdot C_{1,1} \cdot 10^{25} - 378883101,8324$$

$$C_{1,2} \cdot 10^{25} = 0,0176971908 \cdot (C_{1,1} \cdot 10^{25})^5 - 0,3049346744 \cdot (C_{1,1} \cdot 10^{25})^4 + 1,9996232233 \cdot (C_{1,1} \cdot 10^{25})^3 - 6,3722841209 \cdot (C_{1,1} \cdot 10^{25})^2 + 11,0949053332 \cdot C_{1,1} \cdot 10^{25} - 5,5178483307$$

$$C_{22} \cdot 10^{25} = -0,0007488167 \cdot (C_{1,1} \cdot 10^{25})^5 - 0,0114014962 \cdot (C_{1,1} \cdot 10^{25})^4 + 0,3114289912 \cdot (C_{1,1} \cdot 10^{25})^3 - 2,0910711962 \cdot (C_{1,1} \cdot 10^{25})^2 + 5,8216410282 \cdot C_{1,1} \cdot 10^{25} - 5,3158364629$$

$$\alpha_2 \cdot 10^{25} = -360982,30681 \cdot (C_{1,1} \cdot 10^{25})^5 + 6438150,62990 \cdot (C_{1,1} \cdot 10^{25})^4 - 43747118,43020 \cdot (C_{1,1} \cdot 10^{25})^3 + 141730748,25385 \cdot (C_{1,1} \cdot 10^{25})^2 - 219375207,38440 \cdot (C_{1,1} \cdot 10^{25}) + 131541835,99316$$

Минимальные значения разности изменения содержания озона в атмосфере ΔN_{2p} , ΔN_{2r} , рассчитанные по уходящему излучению Земли в каждом из двух спектральных участков при определённых значениях основного калибровочного коэффициента $C_{1,1}$ соответствуют содержанию озона в каждом соответствующем однородном слое атмосферы (Рис.4).

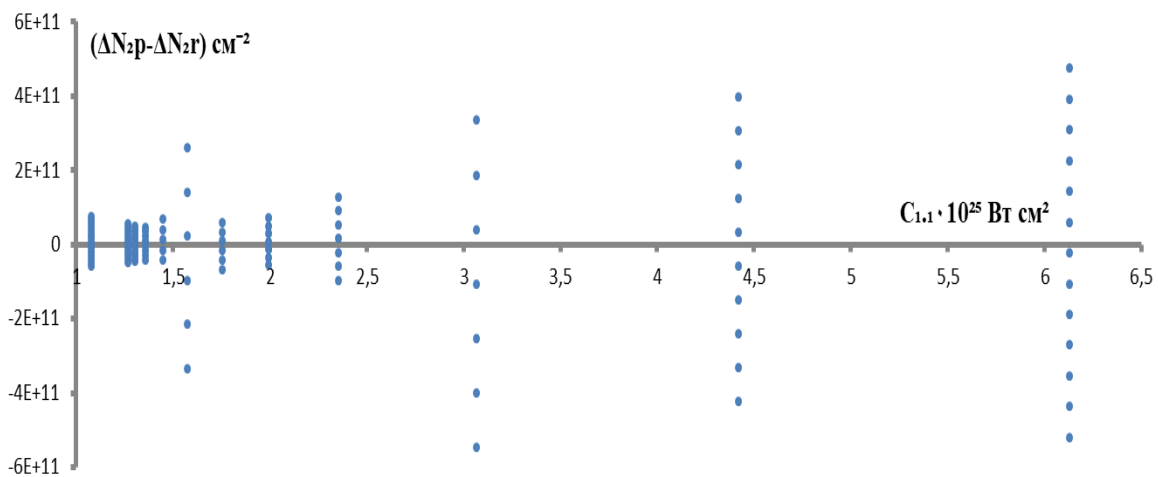


Рис. 4. Минимальные значения разности ΔN_{2p} , ΔN_{2r} при изменении $C_{1,1}$

Использование взаимосвязи калибровочных коэффициентов в рассматриваемых спектральных диапазонах приводит к повышению точности контроля состояния озонового слоя в атмосфере.

Заключение

Выбраны участки спектра $1002-1003\text{ см}^{-1}$, $1020-1021\text{ см}^{-1}$ с противоположной зависимостью коэффициента поглощения излучения от изменения температуры газа для контроля озонового слоя Земли по уходящему излучению атмосферы.

Минимальное значение разности изменении содержания озона в атмосфере, рассчитанное по уходящему излучению Земли в каждом из двух спектральных участков при вариации температуры подстилающей поверхности и температуры эффективного слоя атмосферы, соответствует параметрам исследуемой атмосферы.

Результаты исследования могут быть использованы в качестве методики для обработки спектров уходящего излучения в полосах поглощения других парниковых газов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ромашкина К.И.* Усовершенствованная методика градуировки озонметра М-83 по свету от зенита неба // Тр.ГГО. 1984, вып. 472. С. 74-82.
2. *Тимофеев Ю. М., Неробелов Г. М., Поляков А. В., Виролайнен Я. А.* Спутниковый мониторинг озоносферы // Метеорология и гидрология. 2021. №12. С. 71-79.
3. *Успенский А.Б., Троценко А.Н., Рублёв А.Н.* Проблемы и перспективы анализа и использования данных спутниковых ИК-зондировщиков высокого спектрального разрешения.// Исследование Земли из космоса. 2005. № 5. С. 18-33
4. *Фалалеева В.А., Фомин Б.А.* Спектроскопические проблемы в прямых задачах спутникового зондирования атмосферы и пути их преодоления.// Оптика атмосферы и океана. 2016. Т.29, № 9. С. 733-738.
5. *Шишигин С.А.* Метод корреляционной спектроскопии для анализа спектра уходящего излучения атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т.30, №2. С. 134–138.
6. *Виролайнен Я.А., Поляков А.В.* Учёт рассеяния излучения в наземных газокорреляционных измерениях общего содержания метана. // Исследование Земли из космоса. 2004. № 4. С. 1-7.
7. *Шишигин С.А.* Модельные расчеты содержания озона в атмосфере по уходящему излучению Земли // Исследование Земли из космоса 2023. № 2, С. 84–92
8. *Шишигин С.А.* Погрешность определения эффективной температуры слоев воздуха и подстилающей поверхности Земли в используемой модели атмосферы при расчетах содержания метана. // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 09. С. 711–715.
9. URL: planetcalc.ru/8731 (дата обращения: 20. 03.2022)