

МОДЕЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА В АТМОСФЕРЕ ПО УХОДЯЩЕМУ ИЗЛУЧЕНИЮ ЗЕМЛИ

Шишигин С.А.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

ssa@iao.ru

Алгоритм детектирования озона по результатам измерений уходящего излучения Земли, позволяющий уменьшить влияние вариации температуры подстилающей поверхности, вертикального профиля атмосферы, спектрального разрешения регистрации уходящего излучения Земли представлен в работе [2]. В докладе приведены исследования данного алгоритма относительно погрешности определения, как общего содержания озона, так и его вертикального распределения в атмосфере по уходящему излучению Земли.

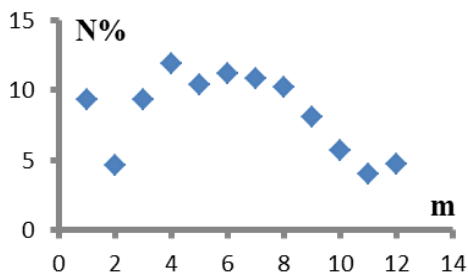


Рис.1 Процентное содержание озона в слоях атмосферы

Рассмотрена модель атмосферы в виде последовательности эффективных однородных слоёв от поверхности Земли до высоты 40 километров. На рисунке 1 показано процентное содержание озона N% в данных элементарных слоях атмосферы **m** 1-(1-15 км.), 2-(16-17км.), 3-(18-19 км.), 4-(20-21км.), 5-(22-

23км.), 6-(24-25 км.), 7-(26-27км.), 8-(28-29 км.), 9-(30-31км.), 10-(32-33км.), 11-(34-35км.), 12-(36-40км.).

Данная модель атмосферы трансформировалась в 12 разновидностей эффективных однородных двойных слоёв без изменения мощности уходящего излучения атмосферы спектрального участка $1002-1003 \text{ см}^{-1}$ и $1020-1021 \text{ см}^{-1}$.

Для каждого однородного первого и второго слоя получены калибровочные коэффициенты $C_{1,1} \cdot 10^{25} \text{ Вт} \cdot \text{см}^2$, связывающие изменения содержания озона на 1% в одном из рассмотренных слоёв атмосферы с изменением мощности уходящего излучения $1002-1003 \text{ см}^{-1}$ (таблица 1) и $C_{2,1} \cdot 10^{25} \text{ Вт} \cdot \text{см}^2$ для уходящего излучения $1020-1021 \text{ см}^{-1}$ (таблица 2).

Таблица 1. Калибровочные коэффициенты слоёв для участка спектра 1002-1003 см⁻¹

1слой (км.)	1-15	1-17	1-19	1-21	1-23	1-25	1-27	1-29	1-31	1-33	1-35	1-40
C _{1,1} ·10 ²⁵ Вт·см ²	6,133	4,414	3,078	2,343	2,0048	1,7533	1,5758	1,4483	1,3587	1,304	1,2668	1,081
2слой (км.)	16-40	18-40	20-40	22-40	24-40	26-40	28-40	30-40	32-40	34-40	36-40	
C _{1,1} ·10 ²⁵ Вт·см ²	0,5672	0,5457	0,4853	0,4091	0,3338	0,2203	0,0698	-0,174	-0,516	-1,19	-2,580	

Таблица 2. Калибровочные коэффициенты слоёв для участка спектра 1020-1021 см⁻¹

1слой (км.)	1-15	1-17	1-19	1-21	1-23	1-25	1-27	1-29	1-31	1-33	1-35	1-40
C _{2,1} ·10 ²⁵ Вт·см ²	6,2640	5,1673	4,0919	3,2763	2,8732	2,5351	2,2688	2,0553	1,9103	1,8126	1,7415	1,436
2слой (км.)	16-40	18-40	20-40	22-40	24-40	26-40	28-40	30-40	32-40	34-40	36-40	
C _{2,1} ·10 ²⁵ Вт·см ²	0,949	0,8399	0,6437	0,4545	0,2519	0,0215	-0,268	-0,676	-1,346	-2,465	-4,735	

Зависимость отношений изменения мощностей уходящих излучений и коэффициентов калибровки от изменения общего содержания озона в том или ином слое в рассматриваемой модели атмосферы представлены на рисунке 2.

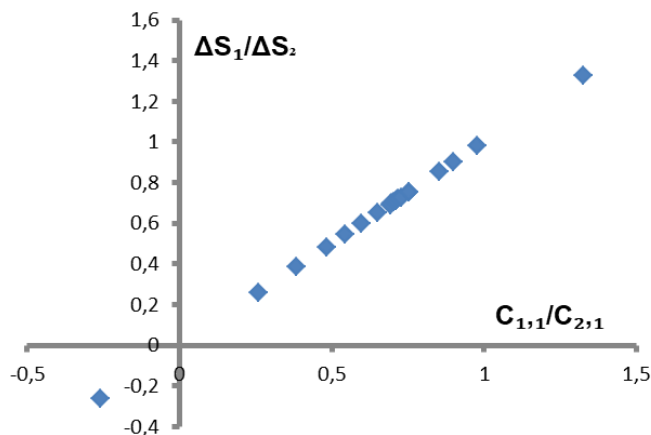


Рис. 2 Зависимость отношений изменения мощности уходящих излучений и коэффициентов калибровки от изменения общего содержания озона в модели атмосферы.

Изменение разности мощностей между модельным и исследуемым уходящим излучением Земли ΔS_1 , ΔS_2 в спектральных участках 1002-1003 см⁻¹ и 1020-1021 см⁻¹, соответствует определённой паре калибровочных коэффициентов из равенства $C_{1,1} - C_{2,1} \cdot \Delta S_1 / \Delta S_2 = 0$.

Коэффициенты $C_{1,1}$ и $C_{2,1}$ выбираются такие, при которых наблюдается минимальная разность

$$\text{между } \Delta N_p = \langle \Delta S_1 \rangle / C_{1,1}, \Delta N_r = \langle \Delta S_2 \rangle / C_{2,1} \quad \Delta N_p - \Delta N_r \sim 0.$$

Модельные расчёты относительной погрешности содержания озона в атмосфере

В таблице 3 также приведены полученные относительные погрешности определения общего содержания озона в атмосфере $\delta N\%$ по мощностям уходящего излучения в

рассматриваемых спектральных участках S_1 Вт/см ср, S_2 Вт/см ср. для пяти особых случаев распределения добавок в модели атмосферы. Относительная погрешность определения общего содержания озона в атмосфере для данных случаев менее 0,4%.

Таблица 3. Примеры изменения параметров уходящего излучения Земли.

Слой с добавками	$\Delta N\%$ слоя	Общая добавка $\Delta N\%$	S_1 Вт/см ср 1002-1003см ⁻¹	S_2 Вт/см ср 1020-1021см ⁻¹	N см ²	$C_{1,1} \cdot 10^{25}$ Вт/см ²	$C_{2,1} \cdot 10^{25}$ Вт/см ²	$\delta N\%$
1-40км	2%	2	$7,263 \cdot 10^{-6}$	$4,955 \cdot 10^{-6}$	$1,2724 \cdot 10^{18}$	1,0367	1,298	0,0324
22-29км	2%	0,85081	$7,276 \cdot 10^{-6}$	$4,97 \cdot 10^{-6}$	$1,168 \cdot 10^{18}$	0,7057	1,103	0,368
1-21км	2%	1,14919	$7,268 \cdot 10^{-6}$	$4,963 \cdot 10^{-6}$	$1,1951 \cdot 10^{18}$	1,2879	1,452	-0,226
30-40км	2%							
1-21км	1%	1,425405	$7,269 \cdot 10^{-6}$	$4,962 \cdot 10^{-6}$	$1,2202 \cdot 10^{18}$	0,9615	1,266	0,111
30-40км	1%							
22-29км	2%							
1-21км	2%	1,574595	$7,265 \cdot 10^{-6}$	$4,959 \cdot 10^{-6}$	$1,2337 \cdot 10^{18}$	1,1285	1,339	-0,065
30-40км	2%							
22-29км	1%							

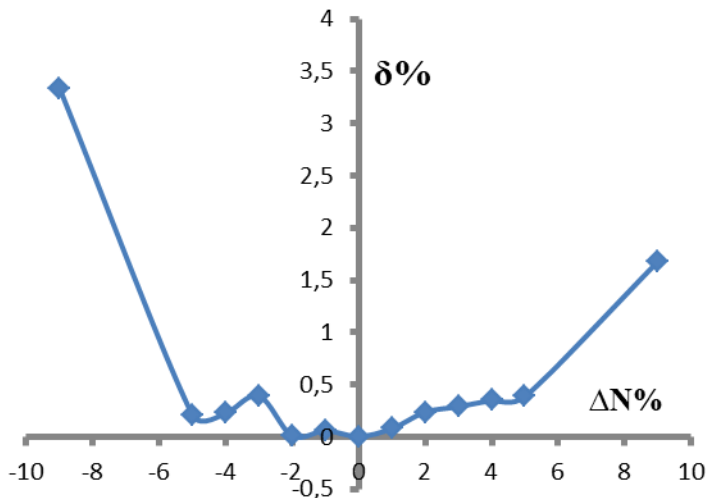


Рис.3. Зависимость относительной погрешности определения общего содержания озона в атмосфере при изменении его на 9% в используемой модели.

На рисунке 3 представлена зависимость относительной погрешности определения общего содержания озона в атмосфере при изменении его содержания на 9% в используемой модели.

Распределение изменений содержания озона ΔN_1 , $\Delta N_2 = \Delta N_0 - \Delta N_1$ находится с помощью системы двух уравнений для изменений мощностей

уходящего излучения ΔS_1 , ΔS_2 в спектральных участках $\Delta \nu_1$ и $\Delta \nu_2$ каждой пары однородных слоёв, составляющих исследуемый слой;

$$\begin{cases} \langle \Delta S_1 \rangle = C_{1,1} \cdot (1 - \alpha_1 \cdot (\Delta N_0 - \Delta N_{1p})) \cdot \Delta N_{1p} + C_{1,2} \cdot (\Delta N_0 - \Delta N_{1p}) \\ \langle \Delta S_2 \rangle = C_{2,1} \cdot (1 - \alpha_2 \cdot (\Delta N_0 - \Delta N_{1r})) \cdot \Delta N_{1r} + C_{2,2} \cdot (\Delta N_0 - \Delta N_{1r}) \end{cases} \quad (1)$$

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 $\langle \Delta S_1^0 \rangle$, $\langle \Delta S_2^0 \rangle$.

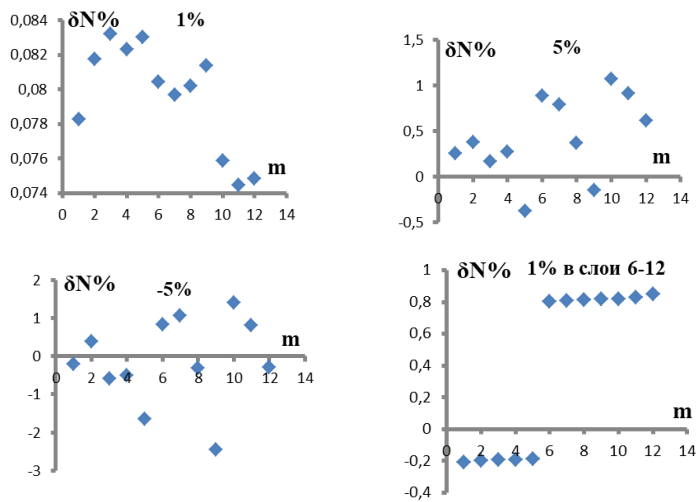


Рис.4. Распределение относительной погрешности вычислений содержания озона в зависимости от его изменения слоях атмосферы.

Земли.

Увеличение или уменьшение содержания озона во всех слоях приводит к случайным ошибкам вычислений содержания озона в каждом слое. Расчётные данные о изменении содержания озона на 1% в отдельном участке атмосферы 26-40км. (6-12) имеют сглаживающий вид со значительными относительными погрешностями, если проводить вычисления о распределении озона во всей толще атмосферы.

Взаимосвязь калибровочных коэффициентов $C_{1,1} \cdot 10^{25}$ Вт·см² и $C_{2,1} \cdot 10^{25}$ Вт·см² (\diamond) приведена на рисунке 5 в зависимости от возможных сценариев отклонения содержания озона от модельного. n показывает каким элементарным нижним (+) или верхним (Δ) слоям атмосферы соответствует данный калибровочный коэффициент $C_{1,1} \cdot 10^{25}$ Вт·см².

Цифры на оси ординат соответствуют значениям коэффициента $C_{2,1} \cdot 10^{25}$ Вт·см² и количеству элементарных слоёв n рассматриваемой модели атмосферы, составляющих верхний или нижний слой, в котором наблюдается изменение содержания озона. Круглыми

На рисунке 4 показаны погрешности модельных вычислений содержания озона в слоях при изменении концентрации озона в воздухе во всей атмосфере на 1%, 5%, -5% и изменении концентрации озона на 1% только в слоях 6-12 выше 26 км. по уходящему излучению

знаками приведена зависимость калибровочных коэффициентов $C_{1,1} \cdot 10^{25}$ Вт·см² и $C_{2,1} \cdot 10^{25}$ Вт·см² (○) для пяти случаев распределения добавок в модели атмосферы (таблица 4).

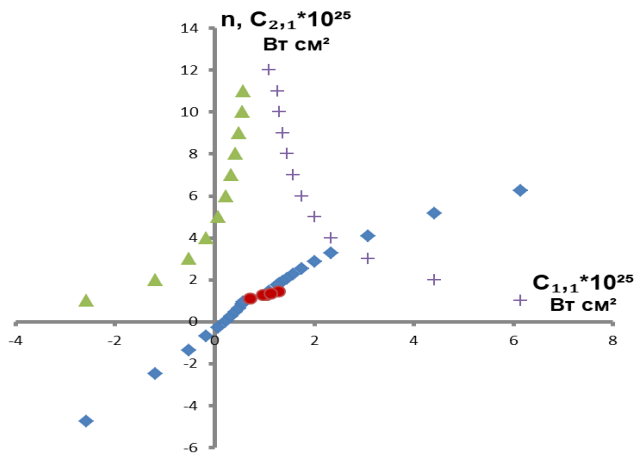


Рис.5 Зависимость коэффициентов калибровки $C_{1,1} \cdot 10^{25}$ Вт·см² от толщины верхнего (Δ) и нижнего слоёв атмосферы (+), а также от калибровочного коэффициента $C_{2,1} \cdot 10^{25}$ Вт·см² (◇).

При определении общего содержания в атмосфере выясняется, в каком из рассматриваемых слоёв (всей атмосферы или ее части) наблюдается отличие содержания озона от модельного, и проводить расчеты распределения общего содержания озона внутри только этого слоя с помощью уравнения (1).

В этом случае относительная погрешность распределение содержания озона в рассмотренном слое 26-40км. (6-12) уменьшается в 10 раз подобно распределению относительной погрешности содержания озона в слоях при изменении озона во всей атмосфере на 1%.

На рисунке 6 показаны добавки ΔN (◇) в модельное распределение содержания озона в каждый элементарный слой **m** 1-(1-15 км.), 2-(16-17км.), 3-(18-19 км.), 4-(20-21км.), 5-(22-23км.), 6-(24-25 км.), 7-(26-27км.), 8-(28-29 км.), 9-(30-31км.), 10-(32-33км.), 11-(34-35км.), 12-(36-40км.). На этом рисунке также приведены результаты вычислений этих добавок (■) по уходящему излучению Земли с помощью рассмотренного алгоритма. Рядом показано распределение относительных погрешностей расчёта содержания озона в этих слоях $\delta N\%$. Над рисунком приведено процентное содержание добавок озона ΔN см⁻² в слое согласно таблице 3. Ошибка вычислений содержания озона в каждом отдельном слое атмосферы не превышает величины добавки озона в слой. Относительная погрешность определения содержания озона в отдельных слоях атмосферы может превышать относительную погрешность вычислений общего содержания озона в атмосфере.

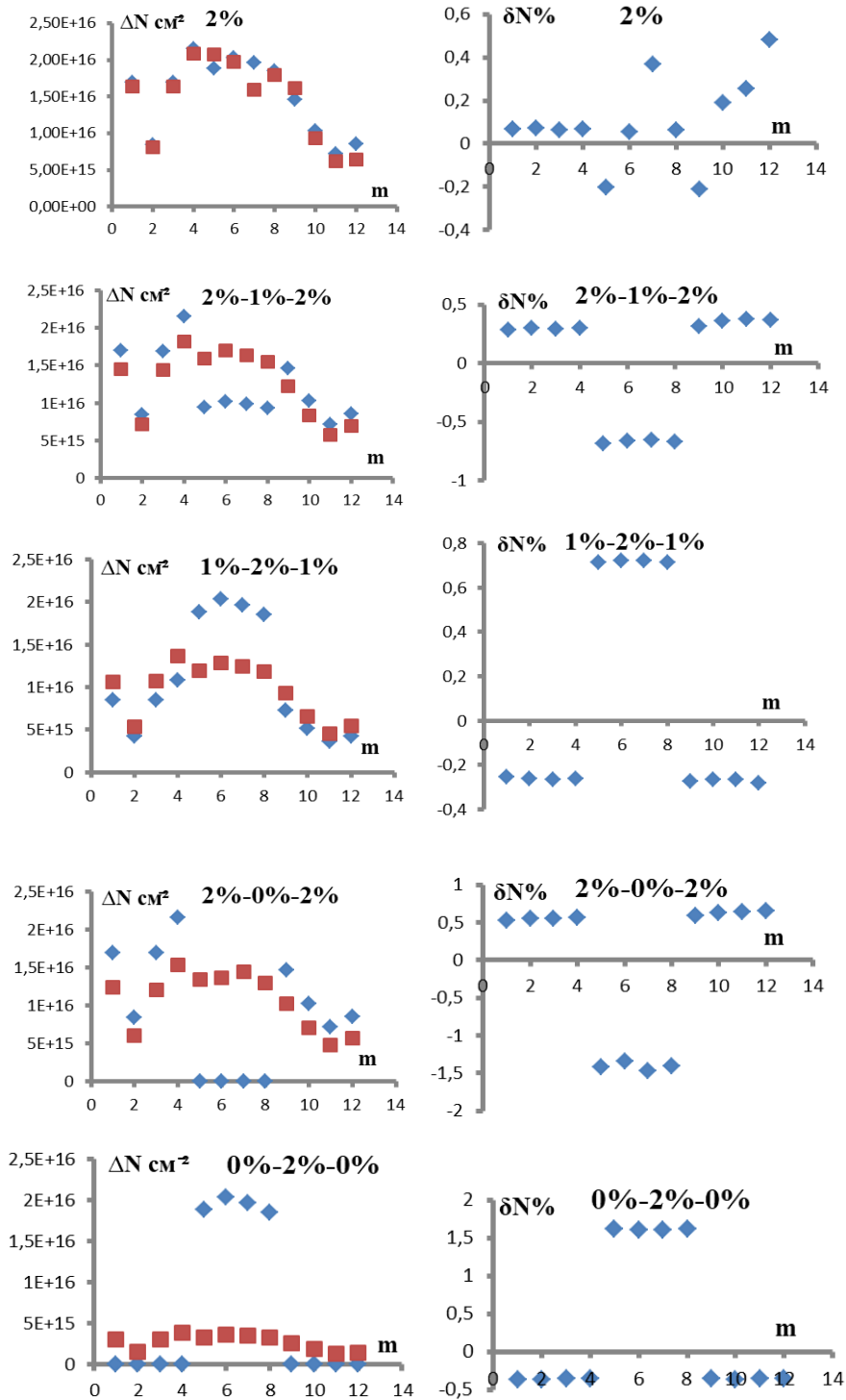


Рис. 6 Добавки ΔN (■) в модельное распределение содержания озона их расчёт (◆) в каждый элементарный слой m . Рядом показано распределение относительных погрешностей расчёта содержания озона в этих слоях $\delta N\%$. Над рисунками показано процентное содержание добавок в слое.

1. Шилигин С.А. Модельные расчеты содержания озона в атмосфере по уходящему излучению Земли // Исследование Земли из космоса 2023. № 2, С. 84–92.