

МОДЕЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ СОДЕРЖАНИЯ ПАРОВ ВОДЫ В АТМОСФЕРЕ

С.А. Шишигин

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия
ssa@iao.ru

Аэрологические, самолетные и спутниковые наблюдения атмосферы привели к созданию ряда моделей и стандартов, описывающих распределение метеорологических величин по высоте для различных широт и сезонов года. Модели распределения параметров атмосферы активно используются в расчетах современных алгоритмов, при моделировании переноса излучения и решения обратных задач атмосферной оптики.

В вертикальном распределении водяного пара основная его масса скапливается вблизи подстилающей поверхности. С высотой водяной пар убывает по экспоненциальному закону, и на высоте около 10 км его концентрация на 2 порядка меньше, чем у поверхности, поэтому интегральное влагосодержание в слое атмосферы 0 - 9 км может быть принято за влагосодержание столба всей атмосферы.

В настоящее время рекордные точности и вертикальное разрешение спутниковых измерений метеопараметров 1-2 К с вертикальным разрешением до 1 км в нижней тропосфере, профилей влажности в тропосфере с погрешностью 10% с вертикальным разрешением 1-2 км в нижней тропосфере, температуры водной поверхности 0.5 К и суши 1 К [1]

Рассмотрена модель безоблачной атмосферы в виде последовательности однородных слоёв толщиной 100 метров от поверхности Земли до высоты 9 километров. Параметры слоёв определены для стандартной атмосферы.

Выбраны спектральные участки $888-892 \text{ см}^{-1}$ и $888,4-888,9 \text{ см}^{-1}$ со значительной разницей коэффициентов поглощения воды в этих участках и отсутствием значимого ослабления излучения атмосферными газами (O_3 , CH_4 , CO_2 , N_2O).

Рассматриваемую модель атмосферы преобразовали в 9 разных моделей, которые имеют одинаковые мощности уходящего излучения атмосферы в спектральных участках $888-892 \text{ см}^{-1}$ и $888,4-888,9 \text{ см}^{-1}$. В виде однородного эффективного слоя для каждого спектрального участка с соответствующими параметрами среднего коэффициента пропускания, эффективной температуры данного слоя, а также 8 моделей в виде 8 пар однородных слоёв, без изменения мощности уходящего излучения атмосферы в спектральных участках ($888-892 \text{ см}^{-1}$) и ($888,4-888,9 \text{ см}^{-1}$). [2].

Таблица 1. Изменения уходящего излучения ΔS_1 , ΔS_2 при добавках в слой молекул воды ΔN

n--9, 1--n	888-892 см ⁻¹	888,4- 888,9см ⁻¹	
слои с ΔN добавками	ΔS_1 Вт/см ²	ΔS_2 Вт/см ²	ΔN см ⁻² 1%
9--9	8,21E-12	3,69E-11	2,68E+18
8--9	1,66E-11	7,53E-11	8,92E+18
7--9	4,95E-11	1,86E-10	2,28E+19
6--9	1,06E-10	4,05E-10	5,08E+19
5--9	2,31E-10	8,41E-10	9,58E+19
4--9	4,37E-10	1,51E-09	1,67E+20
3--9	7,04E-10	2,41E-09	2,74E+20
2--9	1,00E-09	3,39E-09	4,31E+20
1--1	1,89E-10	5,81E-10	1,97E+20
1--2	4,86E-10	1,56E-09	3,54E+20
1--3	7,63E-10	2,46E-09	4,6E+20
1--4	9,59E-10	3,14E-09	5,32E+20
1--5	1,08E-09	3,56E-09	5,77E+20
1--6	1,15E-09	3,77E-09	6,05E+20
1--7	1,17E-09	3,89E-09	6,19E+20
1--8	1,18E-09	3,93E-09	6,25E+20
1--9	1,19E-09	3,97E-09	6,28E+20

Изменения мощности уходящего излучения ΔS_1 Вт/см², ΔS_2 Вт/см² с увеличением молекул воды в слоях на ΔN см⁻² в участках спектра 888-892 см⁻¹ и 888,4-888,9 см⁻¹ представлены в таблице 1.

Изменение содержания паров воды в слоях рассматриваемой двухслойной модели атмосферы ΔN_1 , ΔN_2 описывается системой уравнений зависимости изменений мощности уходящих излучений ΔS_1 (888-892 см⁻¹) и ΔS_2 (888,4-888,9 см⁻¹):

$$\begin{cases} \langle \Delta S_1 \rangle = C_{1,1-n} \cdot (1 - \alpha_{1,1-n} \cdot \Delta N_2) \cdot \Delta N_1 + C_{1,2-n} \cdot \Delta N_2 \\ \langle \Delta S_2 \rangle = C_{2,1-n} \cdot (1 - \alpha_{2,1-n} \cdot \Delta N_2) \cdot \Delta N_1 + C_{2,2-n} \cdot \Delta N_2 \end{cases} \quad (1)$$

Параметры $C_{1,1-n}$, $C_{2,1-n}$, $C_{1,2-n}$, $C_{2,2-n}$, $\alpha_{1,1-n}$, $\alpha_{2,1-n}$ определяют влияние изменения содержания исследуемого газа в нижнем ΔN_1 и верхнем ΔN_2 слоях на изменение мощности уходящего излучения относительно модельного $\langle \Delta S_1 \rangle$, $\langle \Delta S_2 \rangle$ [3].

Для каждого однородного первого и второго слоя получены аналогично калибровочные коэффициенты $C_{1,1-n} \cdot 10^{30}$ Вт·см², $C_{1,2-n} \cdot 10^{30}$ Вт·см², связывающие изменения содержания озона на 1% в одном из рассмотренных слоёв атмосферы с

изменением мощности уходящего излучения $888-892 \text{ см}^{-1}$ (таблица 1) и $C_{2,1-n} \cdot 10^{30} \text{ Вт} \cdot \text{см}^2$, $C_{2,2-n} \cdot 10^{30} \text{ Вт} \cdot \text{см}^2$ для уходящего излучения $888,4-888,9 \text{ см}^{-1}$ (таблица 2,3).

Таблица 2. Калибровочные коэффициенты слоёв для участка спектра $888-892 \text{ см}^{-1}$

1слой (км.)	1	1--2	1--3	1--4	1--5	1--6	1--7	1--8	1--9
$C_{1,1-n} \cdot 10^{30} \text{ Вт}$	0,96	1,37	1,66	1,80	1,87	1,90	1,90	1,89	1,89
2слой (км.)	2-9	3-9	4-9	5-9	6-9	7-9	8-9	9	
$C_{1,2-n} \cdot 10^{30} \text{ Вт}$	2,32	2,57	2,61	2,41	2,08	2,17	1,86	3,07	

Таблица 3. Калибровочные коэффициенты слоёв для участка спектра $888,4-888,9 \text{ см}^{-1}$

1слой (км.)	1	1--2	1--3	1--4	1--5	1--6	1--7	1--8	1--9
$C_{2,1-n} \cdot 10^{30} \text{ Вт}$	2,95	4,42	5,35	5,90	6,17	6,24	6,28	6,29	6,33
2слой (км.)	2--9	3--9	4--9	5--9	6--9	7--9	8--9	9	
$C_{2,2-n} \cdot 10^{30} \text{ Вт}$	7,88	8,78	9,04	8,78	7,96	8,16	8,45	13,8	

Коэффициенты $C_1 = C_{1,1-n} = \langle \Delta S_1 \rangle / \Delta N_0$, $C_2 = C_{2,1-n} = \langle \Delta S_2 \rangle / \Delta N_0$, $C_1 = C_{1,2-n} = \langle \Delta S_1 \rangle / \Delta N_0$, $C_2 = C_{2,2-n} = \langle \Delta S_2 \rangle / \Delta N_0$ определяют чувствительность изменения уходящего излучения к изменению общего содержания исследуемого газа ΔN_0 в нижних и верхних слоях модели атмосферы для выбранных спектральных участков.

Уходящее излучение безоблачной атмосферы в спектральном интервале $888-892 \text{ см}^{-1}$ свыше 90% обусловлено тепловым излучением поверхности Земли. Необходимо эффективную излучаемую способность поверхности Земли определять по результатам измерений используемого регистратора уходящего излучения атмосферы.

На основании мощности уходящего излучения Земли в выбранных спектральных участках в безоблачной атмосфере, рассчитываются отклонения содержания воды в воздухе от используемой модели ΔN_1 , ΔN_2 при вариаций температуры подстилающей поверхности и определяется минимальная разность $|\Delta N_1 - \Delta N_2|$.

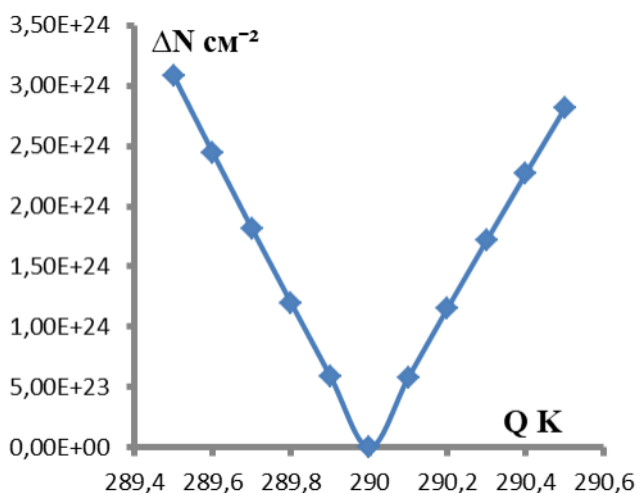


Рис.1 Зависимость разности содержания молекул воды в воздухе, рассчитанные по уходящему излучению $888-892\text{ см}^{-1}$ и $888,4-888,9\text{ см}^{-1}$

На рисунке 1 приведена зависимость разности содержания молекул воды в вертикальном столбе 1 см^2 атмосферы, рассчитанные по уходящему излучению данных мощностей каждого спектрального участка $888-892\text{ см}^{-1}$ и $888,4-888,9\text{ см}^{-1}$ при изменении температуры поверхности Земли для однослойной атмосферы. Температуры подстилающей поверхности и однородного слоя воздуха модели при минимальной разности $|\Delta N_1 - \Delta N_2|$ соответствуют эффективной температуре Земли.

Отношение изменения мощностей уходящих излучений в выбранных спектральных диапазонах и соответствующих им коэффициентов чувствительности на изменения

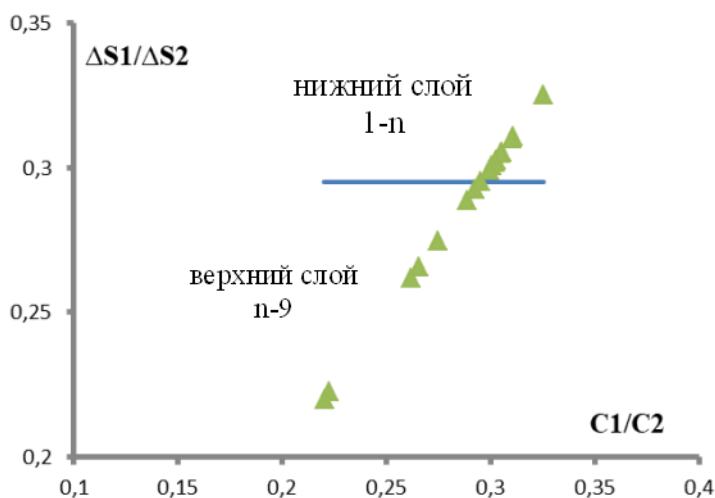


Рис.2 Зависимость отношения изменений мощностей уходящих излучений $888-892\text{ см}^{-1}$ и $888,4-888,9\text{ см}^{-1}$ от отношения коэффициентов чувствительности на эти изменения

общего содержания молекул воды в рассматриваемой модели атмосферы имеет линейную зависимость (рис.2). Горизонтальная прямая линия разделяет области изменения общего содержания паров воды только в верхнем или нижнем слое двухслойной модели атмосферы. На основании этой зависимости определяется взаимосвязь коэффициентов C_1 , C_2 из соотношения $C_1 - C_2 \cdot \Delta S_{1x} / \Delta S_{2x} = 0$, удовлетворяющему взаимосвязи

коэффициентов для нижних $C_{1,1-n} \cdot 10^{30}\text{ Вт}$ и $C_{2,1-n} \cdot 10^{30}\text{ Вт}$ или верхних слоёв $C_{1,2-n} \cdot 10^{30}\text{ Вт}$ и $C_{2,2-n} \cdot 10^{30}\text{ Вт}$ для исследуемых уходящих излучений $888-892\text{ см}^{-1}$ и $888,4-888,9\text{ см}^{-1}$ (рис.3).

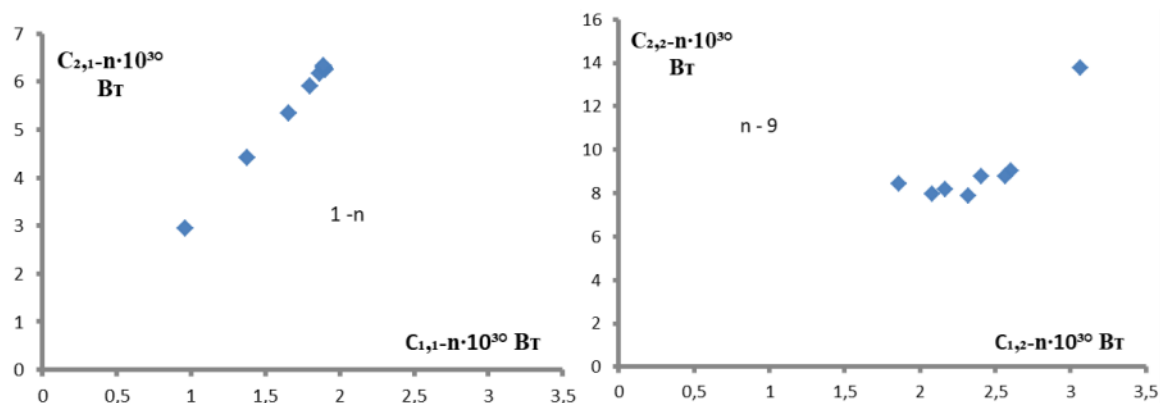


Рис.3 Взаимосвязь коэффициентов $C_{1,1-n} \cdot 10^{30}$ Вт, $C_{2,1-n} \cdot 10^{32}$ Вт для нижних(1-n) и $C_{1,2-n} \cdot 10^{30}$ Вт · $C_{2,2-n} \cdot 10^{32}$ Вт верхних (n-9) слоёв модели атмосферы.

Проведённые модельные расчёты показывают, что общее содержание паров воды в атмосфере определяется с относительной погрешностью менее 0,5% при вариациях его содержания в атмосфере до 5%.

В дополнение к существующим физическим или статистическим алгоритмам «обращения» данных атмосферных зондировщиков рассмотрена возможность определения эффективной температуры подстилающей поверхности Земли при определении общего содержания паров воды в атмосфере.

Литература

1. Рыбакова, Ж. В. Физическая метеорология (отдельные разделы). Томск: Изд. ТГПУ, 2012 - 378 с.
2. 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.
3. Шишигин С.А. Модельные расчеты содержания озона в атмосфере по уходящему излучению Земли // Исследование Земли из космоса 2023. № 2, С. 84–92