

УДК 551.501: 629.195.1

Доктор техн. наук

А.Х. Ахмеджанов<sup>1</sup>

Канд. техн. наук

Т.К. Караданов<sup>1</sup>**РАСЧЕТ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ОКСИДА УГЛЕРОДА В АТМОСФЕРЕ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ**

**Ключевые слова:** атмосфера, спектр, оксид углерода, концентрация, вертикальный профиль, спутниковое зондирование.

*Рассмотрена задача расчета плотности малых газов в атмосфере с учетом поглощения теплового излучения. Физическое обоснование решения уравнения переноса длинноволнового излучения в атмосфере основана на предположении, что уходящее излучение Земли генерируется в различных слоях земной атмосферы. Температурный профиль в расчетах был использован среднесуточным. Расчетное распределение удовлетворительно описывает вертикальный профиль плотности оксида углерода, усредненным между дневным и ночным профилями по данным AIRS.*

В настоящее время интенсивно развиваются методы, основанные на применении спутниковых инфракрасных спектрометров-радиометров высокого разрешения с большим количеством каналов. Данные этих каналов позволяют эффективно уменьшить статистические погрешности измерений. В наиболее деятельном и важном слое атмосферы, тропосфере и нижней стратосфере, полуширины спектральных линий атмосферных газов пропорциональны давлению и температуре, поэтому меняются от десятых до сотых долей.

Общая постановка и решение задач дистанционного зондирования метеорологических параметров с ИСЗ в диапазоне от ультрафиолетового до инфракрасного излучения даны в [3]. Различным задачам восстановления температурного поля при взаимодействии земной поверхности и атмосферы по спутниковым данным в ИК диапазоне спектра

---

<sup>1</sup>Национальный центр космических исследований и технологий,  
г. Алматы, Республика Казахстан

рассмотрены в работах [4, 2] Обратная задача расчета вертикального профиля содержания атмосферного газа сформулирована в [3].

В настоящей работе поставлена задача построения схемы расчета плотности малых газов в атмосфере с учетом поглощения теплового излучения этим газом. Измеряемое спутниками тепловое излучение, есть сумма всех излучений элементарных слоев атмосферы, характеризующихся функцией ослабления теплового излучения  $\Phi_{\nu\mu}$ , зависящих от вертикального профиля малых газов, давления  $P$  и температуры  $T(p)$ , а также от длины волны  $\lambda$  (или частоты  $\nu$ ), на котором фиксируется излучение, и угла визирования  $\theta$ . Уходящее излучение Земли генерируется в различных слоях земной атмосферы и тем самым отражает плотностный режим этих слоев или их концентрацию в них. Такое положение может служить физическим обоснованием, представлением искомых функций в виде ряда.

Уравнение переноса длинноволнового излучения в атмосфере в изобарической системе координат можно представить в виде:

$$J_{\lambda}^{\uparrow}(p) = \sigma B_{\lambda}[T(p_1)] * F_{\lambda}(p_N) + \int_{p_0}^0 B_{\lambda}[T(u)] \frac{dF_{\lambda}(u)}{du} du, \quad (1)$$

где  $J_{\lambda}^{\uparrow}(p)$  – восходящее тепловое излучение,  $B_{\lambda}[T(p)]$  – функция Планка,  $p_1 = 1000$  гПа – давление на земной поверхности,  $p_N$  – высота спутника.

Функцию ослабления теплового излучения можно определить из следующего дискретного уравнения:

$$J_{\lambda}^{\uparrow}(p_N) = \sigma B_{\lambda}[T(p_1)] * F_{\lambda}(p_N) + \sum_{i=1}^N B_{\lambda}[T(p_i)] (F_{\lambda}(p_{i+1}) - F_{\lambda}(p_i)), \quad (2)$$

где  $F_{\lambda}(p_N) = \sum_{i=1}^N F_{\lambda}(p_i)$ .

Из уравнения 2 получим алгебраическое уравнение для определения функции ослабления теплового излучения

$$\sum_{i=1}^N (\sigma B_{\lambda}[T(p_1)] - B_{\lambda}[T(p_i)]) F_{\lambda}(p_i) + B_{\lambda}[T(p_i)] F_{\lambda}(p_{i+1}) = J_{\lambda}^{\uparrow}(p_N), \quad (3)$$

где  $F_{\lambda}(p_N) = 0$ , которое сводится к следующему виду;

$$\sum_{n=1}^{N-1} a_{\lambda n} F_{\lambda}(N - n) = J_{\lambda}^{\uparrow}(p_N), \quad (4)$$

где  $a_{\lambda n} = \sigma B_{\lambda}[T(p_1)] - B_{\lambda}[T(p_{N-n})] + B_{\lambda}[T(p_{N-n-1})]$  (5)

Содержание оксида углерода  $\rho_i$  связано с функцией ослабления теплового излучения в виде;

$$F_{\lambda}(z_i) = e^{-\frac{\alpha_{\lambda} \rho_i}{\cos \theta} z_i}, \quad (6)$$

где  $\alpha_\lambda$  – массовый коэффициент поглощения излучения,  $\rho$  – плотность газа.

Если взять первые два члена разложения в ряд функции ослабления теплового излучения будет иметь вид:

$$F_\lambda(z_i) = 1 - \frac{\alpha_\lambda \rho_i}{\cos\vartheta} z_i, \quad \rho_i = \frac{1 - F_\lambda(p_i)}{\alpha_\lambda z_i} \cos\vartheta. \quad (7)$$

Учитывая последние соотношения, запишем уравнение (4) относительно искомой величины  $\rho_i$

$$\sum_{n=1}^{N-1} \alpha_{\lambda n} z_{n-N} \rho_{N-n} = \frac{\cos\vartheta}{\alpha_\lambda} (\sum_{n=1}^{N-1} \alpha_n - J_\lambda^\dagger(p_N)). \quad (8)$$

Уравнение (8) может быть записано для различных длин волн  $\lambda$  и углов зондирования  $\vartheta$ , что позволяет получить соответствующую алгебраическую систему уравнений для нахождения  $\rho_i$  на высотах.

Базы данных позволяют детально учесть каждую спектральную линию поглощения молекулами воздуха. Спектральный характер молекулярного поглощения, обусловленный сильной изменчивостью коэффициентов молекулярного поглощения, является основанием для допущения селективного поглощения в первом приближении. Значения коэффициента поглощения конкретного газа могут быть получены из базы данных HITRAN, которая содержит спектроскопические данные о молекулярном поглощении газов, в том числе коэффициент поглощения излучения CO в атмосфере. Функция поглощения CO показана на рис. 1. Поглощение атмосферными составляющими можно характеризовать с помощью спектральной зависимости коэффициентов молекулярного поглощения. Вычисление спектральных профилей линий молекул газа основано на линейном методе, который суммирует стандартные формы линий отдельных линий поглощения. Общий коэффициент молекулярного поглощения в атмосфере представляет собой, в первом приближении, сумму коэффициентов поглощения в отдельных линиях поглощения атмосферного газа. Распределение линейного коэффициента поглощения CO представлено на рис. 2. Сенсор AIRS, располагающийся на спутнике Aqua, является спектрометром высокого разрешения, который измеряет инфракрасное излучение Земли в спектральном диапазоне от 3.75 до 15.4 мкм. Измерение ведётся по 2378 каналам. Коэффициент поглощения

CO в наиболее интенсивной колебательно-вращательной полосе поглощения лежит в области с центрами 4,66 мкм и 4,39 мкм. Рассчитаны данные линий поглощения оксида углерода CO в таблице 1.

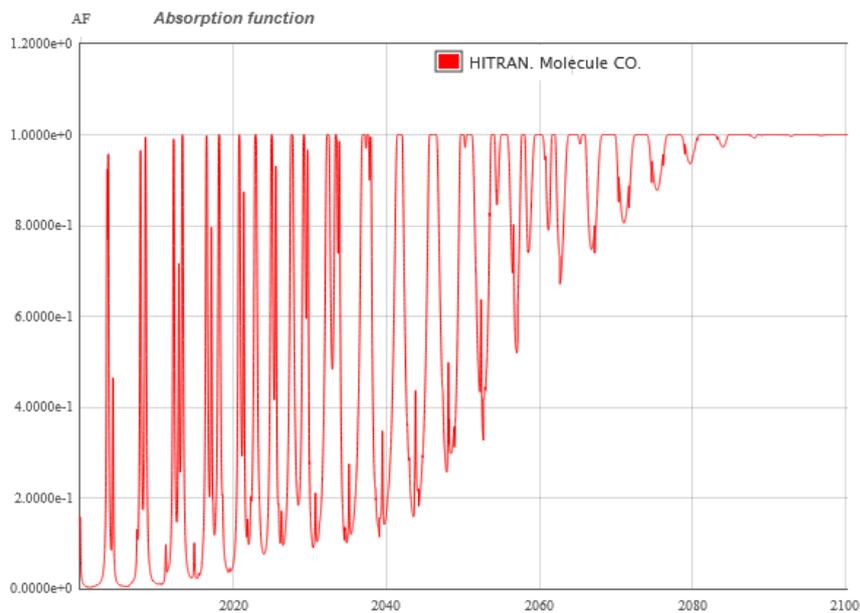


Рис. 1. Функция поглощения CO.

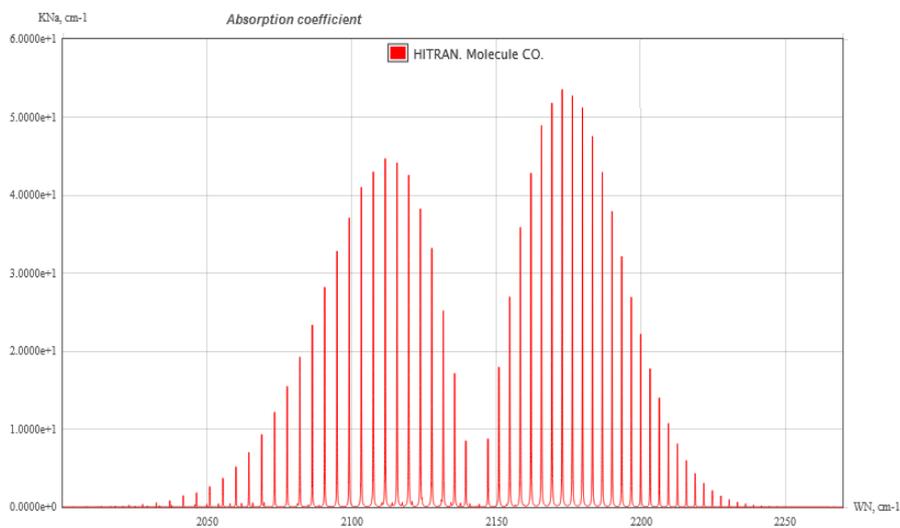


Рис. 2. Распределение линейного коэффициента поглощения CO.

## Данные полос поглощения оксида углерода

Волновое число, см <sup>-1</sup>	Длина волны, мкм	Номер канала AIRS	Линейный коэффициент поглощения, см <sup>-1</sup>
2042	4,90	234	1,616
2051	4,88	230	2,256
2055	4,86	226	3,696
2059	4,85	224	5,136
2064	4,84	222	6,576
2069	4,83	220	9,456
2074	4,82	218	12,76
2078	4,81	216	15,05
2081	4,80	214	19,37
2086	4,79	212	23,05
2091	4,78	210	28,17
2095	4,77	208	32,65
2099	4,76	206	37,45
2103	4,75	204	40,82
2106	4,74	202	43,21
2111	4,73	200	45,13
2116	4,725	199	44,50
2118	4,721	198	42,25
2122	4,71	196	38,74
2126	4,70	194	34,58
2132	4,69	192	25,30
2135	4,68	190	18,42
2139	4,67	188	9,62
2146	4,66	185	8,49
2148	4,655	184	8,97
2150	4,651	183	17,78
2154	4,64	181	27,54
2156	4,638	181	36,02
2162	4,625	178	42,58
2166	4,616	176	49,14
2169	4,610	175	51,54
2172	4,604	174	53,78
2175	4,597	172	52,56
2180	4,587	170	51,70
2184	4,579	169	47,70
2187	4,572	167	43,22
2190	4,566	166	37,94
2193	4,560	165	32,98
2196	4,553	164	27,70
2199	4,547	162	22,42
2202	4,541	161	17,78
2205	4,535	160	13,78
2209	4,527	158	10,58
2212	4,520	157	8,66
2215	4,514	156	5,78
2218	4,509	155	4,98

Для реализации решения уравнения переноса длинноволнового излучения в атмосфере в изобарической системе координат согласно уравнениям (1...8) необходимо учесть, что измеряемые значения

уходящего излучения в выбранных каналах по таблице 1 будут близки между собой, а значения линейного коэффициента поглощения CO в этих каналах существенно различаются между собой (рис. 2). Это позволяет получить правую часть системы алгебраических уравнений (уравнение 8), позволяющую устойчивую численную реализацию.

Углы зондирования зависят от выбранных пикселей, поскольку по линии траектории движения спутника, т.е. в надире, угол зондирования равен  $0^\circ$ . Коэффициент серости  $\sigma$  подстилающей поверхности был взят 0,8, что является характерным для северного побережья Каспийского моря в летнее время. Учитывая, что в разрешение AIRS равен 1 градусу, то центру пикселя будет соответствовать 0,5 градуса. На указанную дату и для выбранного района был получен температурный профиль для расчета формулы Планка на соответствующих высотах. Эти данные дают возможность получения системы из 10 уравнений на основе уравнения 8, которая решается численными методами. Вертикальные профили плотности CO по данным AIRS (день, ночь) и расчета за 25 июня 2018 года приведены на рисунке 3. Расчетное распределение удовлетворительно описывает вертикальный профиль плотности оксида углерода и оказался между дневным и ночным профилями данных AIRS, т.к. расчетный температурный профиль был использован среднесуточным.

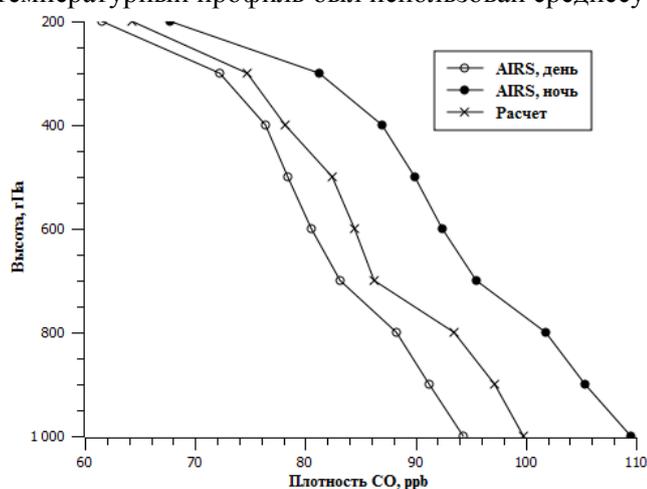


Рис. 3. Вертикальные профили плотности CO по данным AIRS за 25 июня 2018 года.

Плотность воздуха, как и плотность оксида углерода CO, находящегося в нем, непрерывно меняется во времени. Плотности сильно меняются с высотой, потому что с высотой меняются атмосферное давление и температура воздуха. Давление с высотой всегда уменьшается, а вместе с ним убывает и плотность. Температура с высотой по большей части понижается в нижних 10...15 км атмосферы. Падение температуры влечет за собой повышение плотности воздуха, в том числе и плотности оксида углерода, поэтому плотность CO ночью выше, чем днем.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козлов В.П. О восстановлении высотного профиля температуры по спектру уходящей радиации // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1966. – № 2 – С. 137-148.
2. Косцов В.С., Поберовский А.В., Осипов С.И., Тимофеев Ю.М. Комплексная методика интерпретации наземных микроволновых спектральных измерений в задаче определения вертикального профиля содержания озона // Оптика атмосферы и океана. 2012. – Т. 25. – № 04. С. 354-360.
3. Марчук Г.И. Уравнение для ценности информации с метеорологических спутников и постановка обратных задач // Космические исследования. 1964. – Т. 3. – С. 462-477.
4. Sultangazin U.M., Ahmedzhanov A.H., Glushko V.N. Numerical methods of reconstruction of optical parameters of terrestrial surface and atmosphere using remote sensing // Mathematics and Computers in Simulation, December 2004, V. 67, Issue 4-5. P. 391-398.

Поступила 16.03.2020

Техн. ғылымдар. докторы

А.Х. Ахмеджанов

Техн. ғылымдар. кандидаты

Т.К. Караданов

#### **АТМОСФЕРАДАҒЫ КӨМІРТЕК ТОТЫҒЫНЫҢ ВЕРТИКАЛЬ КЕСКІНІН СПУТНИКТІК ДЕРЕКТЕР АРҚЫЛЫ ЕСЕПТЕУ**

*Түйін сөздер:* атмосфера, спектр, көміртек тотығы, шоғырлану, вертикаль кескін, жерсеріктік зондылау

*Жылулық сәулеленудің сіңуін ескере отырып, атмосферадағы ұсақ газдардың тығыздығын есептеу мәселесі*

қарастырылады. Атмосферадағы ұзақ толқындар радиациясының тасымалдау теңдеуін шешудің физикалық негіздемесі жерден шығатын сәулелер жер атмосферасының әртүрлі қабаттарында пайда болады деген болжамға негізделген. Есептеулерде температура профилінің тәуліктік орташа мәні қолданылды. Есептелген үлестіру AIRS-ке сәйкес күндізгі және түнгі профильдер арасында орташа алынған көміртегі тотығының тығыздық профилін қанағаттанарлық сипаттайды.

A.Kh. Akhmedzhanov, T.K. Karadanov

### **CALCULATION OF THE VERTICAL PROFILE OF CARBON MONOXIDE IN THE ATMOSPHERE USING SATELLITE DATA**

**Keywords:** atmosphere, spectrum, carbon monoxide, concentration, vertical profile, satellite sensing.

*The problem of calculating the density of small gases in the atmosphere, taking into account the absorption of thermal radiation, is considered. The physical justification for solving the equation of long-wave radiation transport in the atmosphere is based on the assumption that the outgoing radiation of the Earth is generated in different layers of the earth's atmosphere. The temperature profile in the calculations was used as a daily average. The calculated distribution satisfactorily describes the vertical carbon monoxide density profile averaged between the day and night profiles according to AIRS data.*