

УДК 551.501: 629.195.1

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОЙСТВ ПОГЛОЩЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ  
ПАРНИКОВЫМИ ГАЗАМИ АТМОСФЕРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ**

Доктор техн. наук А.Х. Ахмеджанов  
А.Н. Искаков

*Показана возможность моделирования процессов поглощения излучения молекулами газа. Оно может быть основано на использовании лабораторных спектров высокого разрешения изучаемых газов, зависимости спектра поглощения газов от температуры, давления, объемной концентрации газа в смеси.*

Термическое зондирование атмосферы в надир основывается на данных, получаемых многоканальными спектрорадиометрами высокого разрешения (~0,001 см<sup>-1</sup>), регистрирующими тепловое излучение атмосферы в различных спектральных диапазонах, позволяющее восстанавливать температурный профиль атмосферы с большей точностью и более точным высотным разрешением без использования априорной информации. Это дает возможность для численного моделирования физических параметров атмосферы с использованием температурных профилей для реальных экосистем.

Успехи экспериментальной и теоретической молекулярной спектроскопии высокого и сверхвысокого разрешения позволили создать компьютерные базы (атласы) параметров спектральных линий атмосферных и примесных газов (HITRAN, GEISA) [9]. Появились теоретические методики и комплексы программ для количественного моделирования сложных многофакторных задач спектроскопии атмосферы (например, программы LOWTRAN, MODTRAN, FASCODE, различные информационные системы) [7, 8].

При наблюдении атмосферы со спутника в надир, выражение для спектральной плотности яркости атмосферы в общем случае в условиях чистого неба имеет вид [3, 4]:

$$I_{\nu}^{\uparrow} = \varepsilon_{\nu} B_{\nu}(T_0) \exp\left(-\int_0^H k_{\nu}^{abs} dh\right) + (1 - \varepsilon_{\nu}) I_{\nu}^{\downarrow} \exp\left(-\int_0^H k_{\nu}^{abs} dh\right) + \int_0^H k_{\nu}^{abs} B_{\nu} \exp\left(-\int_h^H k_{\nu}^{abs} dh'\right) dh, \quad (1)$$

где  $k_{\nu}^{abs}$  – коэффициент поглощения газовыми компонентами атмосферы,  $B_{\nu}$  – спектральная плотность яркости черного тела (функция Планка),

$\varepsilon_v$  – излучательная способность земной поверхности,  $H$  – верхняя граница атмосферы,  $I_v^\downarrow$  – спектральная плотность энергетической яркости атмосферы в направлении земной поверхности:

$$I_v^\downarrow = \int_0^H k_v^{abs} B_v \exp\left(-\int_0^h k_v^{abs} dh'\right) dh.$$

Коэффициент поглощения включает: 1) коэффициент поглощения газовыми составляющими, который вычисляется с помощью суммирования по спектральным линиям (line-by-line) с использованием параметров известной спектральной базы данных HITRAN; 2) коэффициент ослабления аэрозольными компонентами атмосферы; 3) коэффициент континуального поглощения водяным паром:

$$k_v^{abs} = k_v^{gas} + k_v^{aerosol} + k_v^{cont}.$$

Для безоблачной и слабоаэрозольной атмосферы, можно ограничиться только  $k_v^{gas}$ :

$$k_v^{gas} = N_0(h) \sum_{i=1}^{N_g} n_i(h) \sum_k r_{ik}(h) \sum_j S_{ijk}(T(h)) \Phi_{ijk}(v_{ijk} - \nu, T(h), p(h)),$$

где  $p(h), T(h), N_0(h) = p(h)/(k_b T(h))$  – давление, температура и концентрация молекул на высоте  $h$  соответственно,  $n_i(h)$  – относительная концентрация  $i$ -го газа,  $r_{ik}(h)$  – т.н. распространенность  $k$ -го изотопа  $i$ -го газа,  $S_{ijk}$  – интенсивность  $j$ -й спектральной линии,  $\Phi_{ijk}$  – контур линии.

По определению [5, 7], выражение  $-\int_0^H k_v^{abs} dh$  в формуле (1) есть спектральная оптическая толщина атмосферы  $\tau(\lambda)$ , где  $\lambda$  – длина волны излучения, а выражение  $\exp\left(-\int_0^H k_v^{abs} dh\right)$  определяет прозрачность атмосферы (спектральная функция пропускания) при данной длине волны излучения  $P(\lambda)$ .

Ослабление электромагнитного излучения в атмосфере обусловлено процессами рассеяния излучения на флуктуациях плотности и поглощения молекулами газа. В коротковолновой части спектра доминирует рассеяние, а в длинноволновой – поглощение.  $P(\lambda)$  в случае рассеяния, является гладкой функцией от  $\lambda$ . Поглощение инфракрасного излучения обусловлено наличием или отсутствием линий поглощения излучения молекулой газа при данной длине волны и поэтому носит явно выраженный селективный характер [8].

В [2] на основе спектрометрической базы данных HITRAN [9] и реальных сезонных температурных профилей изучались поглотительные свойства выбранной группы из пяти атмосферных газов для различных участков территории Казахстана, условно названных: «N» (Север), «E» (Восток), «S» (Юг), «C» (Центр) и «W» (Запад) (рис. 1).

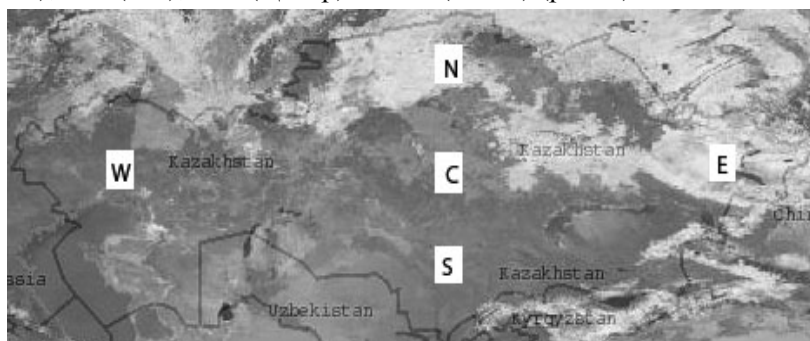


Рис. 1. Участки территории Казахстана. Площадь участка моделирования совпадает с площадью соответствующего прямоугольника.

Моделирование объемного коэффициента поглощения (ОКП)  $k_V^{gas}$  излучения молекулами газа основано на использовании лабораторных спектров высокого разрешения (0,01) изучаемых газов, зависимости спектра поглощения от сорта газа, температуры, давления, объемной концентрации газа в смеси. Смоделированный спектр ОКП приводился к «реальному» спектру при помощи аппаратной функции конкретного канала сенсора MODIS [3, 4] и процедуры свертки спектра.

Для каждой изучаемой территории по спутниковым данным AIRS [6], вычислялись средние по сезонам за 2008 год температурные профили  $P(T)$ . При этом оказалось, что в каждом рассматриваемом случае температурные профили для весеннего и осеннего сезонов, расположены приблизительно на равном расстоянии от температурных профилей для зимнего и летнего сезонов. Вариации температуры, обусловленные «территориальным» фактором, проявились на «размытии» температурных профилей (рис. 2).

Для изучения физических свойств атмосферы была выбрана группа из пяти основных парниковых газовых компонент атмосферы:  $H_2O$ ,  $N_2O$ ,  $O_3$ ,  $CH_4$  и  $CO_2$ . В [2] моделирование спектров ОКП излучения молекулами  $H_2O$ ,  $N_2O$ ,  $O_3$ ,  $CH_4$  и  $CO_2$  проводилось для температурных профилей зимнего и летнего сезонов, соответственно в каналах #27, #24, #30, #28 и #36 сенсора MODIS. Поглощение ИК-излучения в этих каналах для соответствующих газов является максимальным.

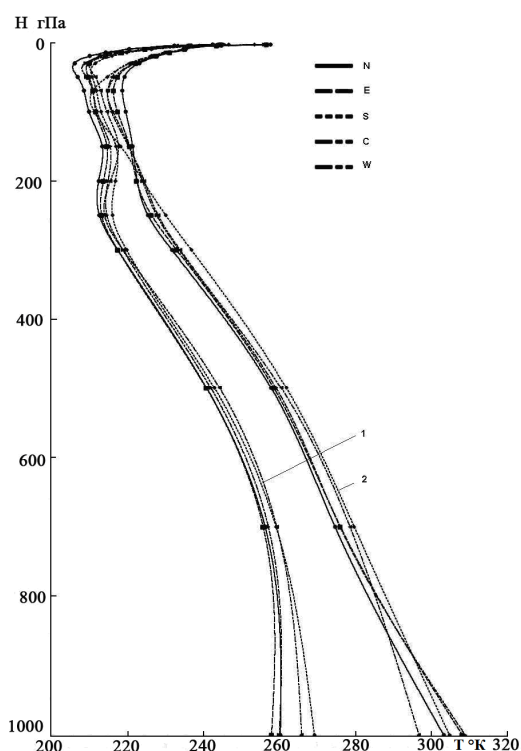


Рис. 2. Зимние (1) и летние (2) профили температуры для участков «N», «E», «S», «C» и «W» территории Казахстана за 2008 год (по данным AIRS [6]).

Сезонный разброс  $(t_{\text{зима}} - t_{\text{лето}}) / t_{\text{зима}} \cdot 100\%$  профилей в диапазоне высот 250...750 гПа составляет 6...8 %, с приближением к поверхности Земли разброс постепенно увеличивается до 12...20 %, разброс профилей, обусловленный территориальными различиями выбранных участков, составляет 1...2% для высот 250...750 гПа и около 8 % – у поверхности Земли.

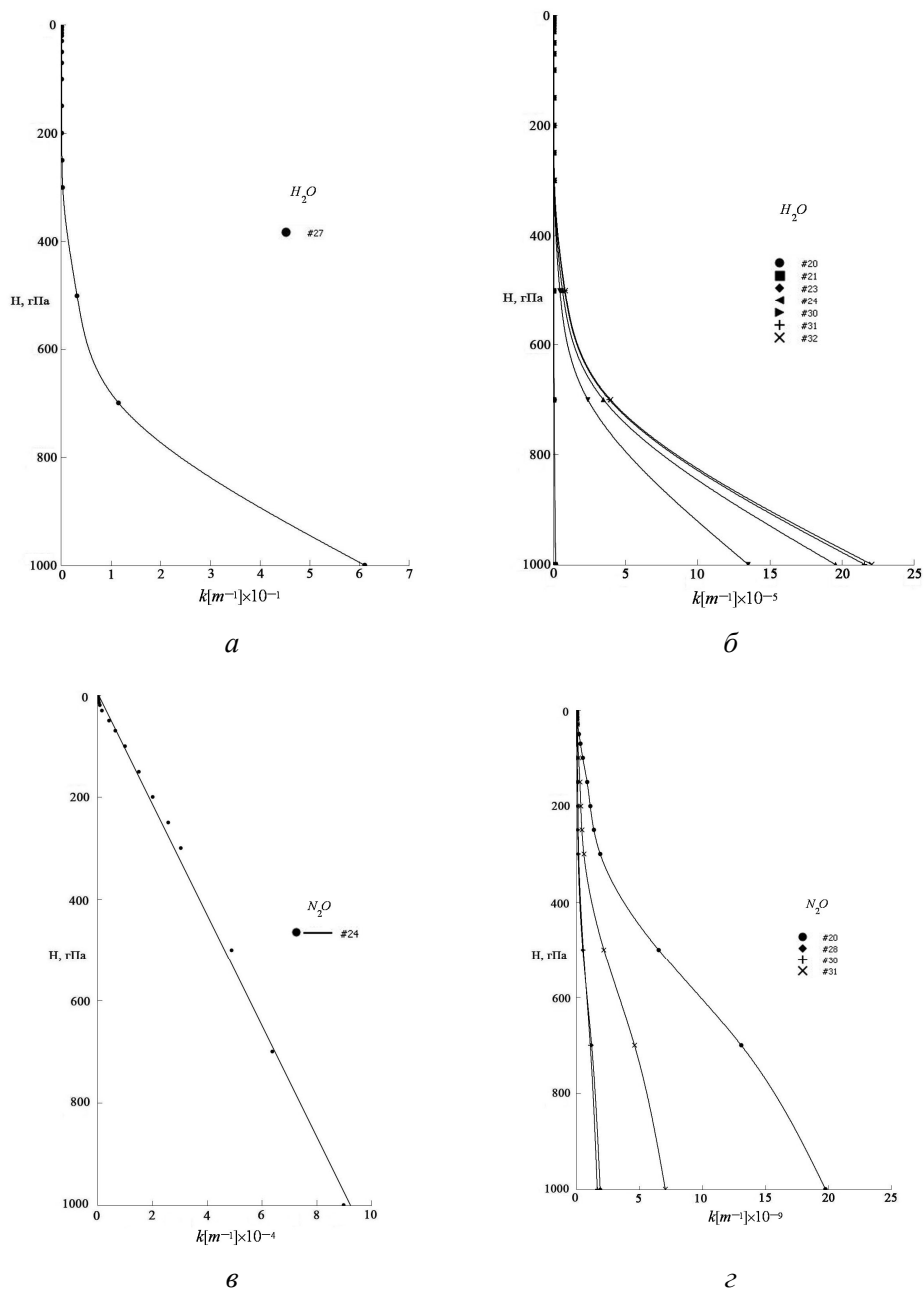
Вариации профилей ОКП атмосферных газов коррелируют с вариациями температурного профиля, обусловленные сезонными и территориальными различиями, и в процентном отношении вариации ОКП  $(k_{\text{зима}} - k_{\text{лето}}) / k_{\text{зима}} \cdot 100\%$  того же порядка, что и вариации температурного профиля.

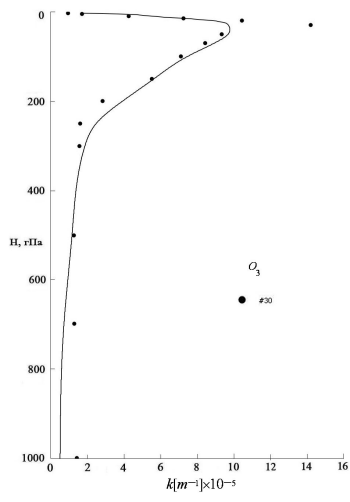
Наиболее чувствительным к температурным вариациям газом является  $\text{CO}_2$ . С повышением температуры ОКП метана, закиси азота, паров воды и озона уменьшается, а для двуокиси углерода, наоборот – повышается.

В данной работе продолжается изучение физических свойств атмосферы с тем отличием, что для каждого сорта газа выбран значительно больший диапазон длин волн, в целом от #20 до #36 каналов сенсора

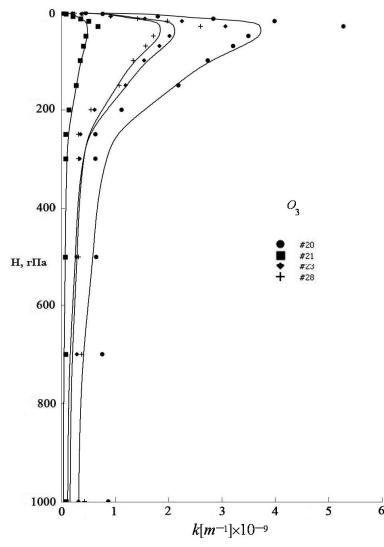
MODIS, ограничившись при этом зимним температурным профилем и единственным участком «С» (Центр) территории Казахстана (рис. 1).

Результаты моделирования ОКП ИК-излучения молекулами газа  $H_2O$ ,  $N_2O$ ,  $O_3$ ,  $CH_4$  и  $CO_2$  выборочно приведены на рис. 3.

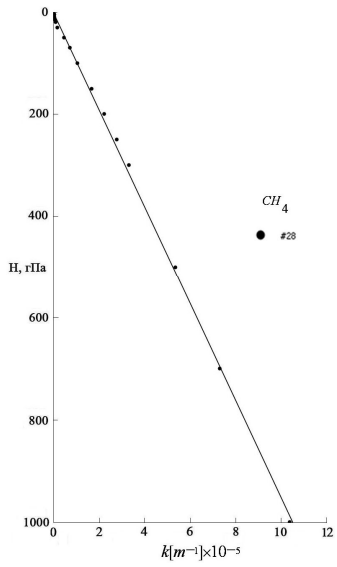




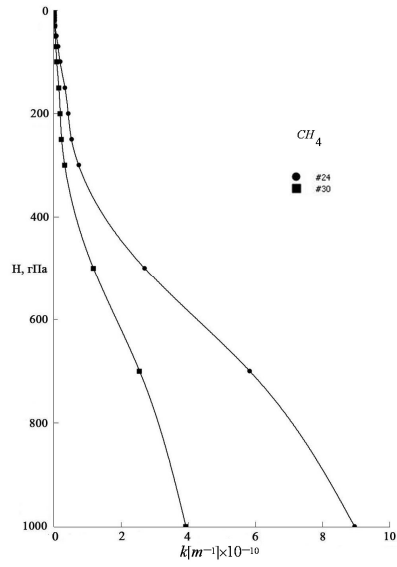
$\partial$



$e$



$\mathcal{H}$



$\mathcal{I}$

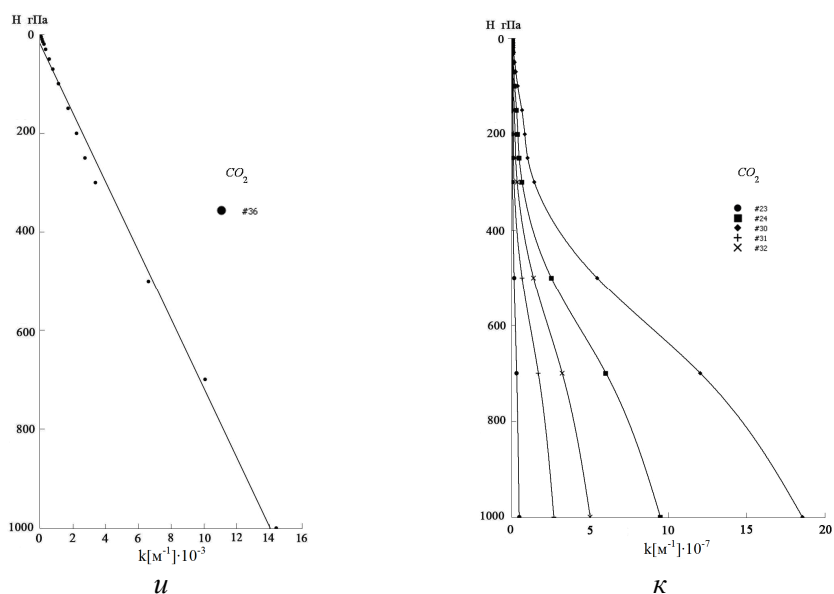


Рис. 3. Зависимость ОКП  $k[\text{м}^{-1}]$  от высоты  $H[\text{гПа}]$  для  $\text{H}_2\text{O}$ : а – #27, б – выборочные каналы; для  $\text{N}_2\text{O}$ : в – #24, г) – выборочные каналы;  $\text{O}_3$ : д – #30, е – выборочные каналы;  $\text{CH}_4$ : ж – #28, з) – выборочные каналы и  $\text{CO}_2$ : и – #36, к – выборочные каналы.

Согласно определению, площадь под кривой  $k(H)$  (высоту  $H$  надо соответствующим образом выразить в метрах [1]) есть спектральная оптическая толщина  $\tau(\lambda)$  данного газа, группы газов или всей атмосферы, в зависимости от того, что подразумевается под  $k$ .

Вычисленные  $\tau(\lambda)$  для каждого газа в группе приведены в табл. 1, а  $\tau(\lambda)$  и  $P(\lambda)$  для группы в целом – в табл. 2 соответственно.

Поглощательная способность молекул газа сильно варьируется в различных диапазонах длин волн. Согласно табл. 1, для  $\text{CO}_2$  в канале #28, для  $\text{CH}_4$  в каналах #32 и #36, для  $\text{N}_2\text{O}$  в каналах #27 и #32 поглощение отсутствует. Атмосфера в каналах #27 и #28 сенсора MODIS закрыта полностью для ИК-излучения содержащимся в атмосфере водяным паром. В #36 – наиболее сильное поглощение обусловлено  $\text{CO}_2$ , а в #24 –  $\text{N}_2\text{O}$ , и только благодаря относительно слабому поглощению излучения водяным паром в каналах #20...#23 и #29...#32 атмосфера прозрачна для ИК-излучения. Это явление известно как «окна прозрачности» атмосферы. В

#30 канале наиболее сильным поглотителем является  $O_3$ , но его процентного содержания недостаточно, чтобы полностью «закрыть» атмосферу.

Таблица 1

Оптическая толщина газовых составляющих атмосферы в каналах сенсора MODIS

| № канала | $\lambda$ , мкм | $\tau(\lambda)$      |                      |                      |                      |                      |
|----------|-----------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|          |                 | $CO_2$               | $H_2O$               | $CH_4$               | $O_3$                | $N_2O$               |
| 20       | 3,75            | $1,93 \cdot 10^{-8}$ | $2,53 \cdot 10^{-5}$ | $1,43 \cdot 10^{-2}$ | $2,62 \cdot 10^{-5}$ | $3,90 \cdot 10^{-4}$ |
| 21       | 3,96            | $2,42 \cdot 10^{-9}$ | $1,75 \cdot 10^{-3}$ | $8,15 \cdot 10^{-3}$ | $2,60 \cdot 10^{-6}$ | $3,53 \cdot 10^{-2}$ |
| 23       | 4,05            | $8,90 \cdot 10^{-4}$ | $2,37 \cdot 10^{-3}$ | $8,26 \cdot 10^{-3}$ | $1,01 \cdot 10^{-5}$ | $3,72 \cdot 10^{-2}$ |
| 24       | 4,46            | $9,68 \cdot 10^{-3}$ | $3,31 \cdot 10^{-2}$ | $1,79 \cdot 10^{-5}$ | $2,60 \cdot 10^{-4}$ | 7,38                 |
| 27       | 6,72            | $2,25 \cdot 10^{-8}$ | $1,39 \cdot 10^3$    | $7,37 \cdot 10^{-3}$ | $1,13 \cdot 10^{-6}$ | 0                    |
| 28       | 7,32            | 0                    | $1,24 \cdot 10^2$    | $8,18 \cdot 10^{-1}$ | $1,31 \cdot 10^{-5}$ | $3,70 \cdot 10^{-5}$ |
| 29       | 8,55            | $4,38 \cdot 10^{-7}$ | $6,63 \cdot 10^{-1}$ | $6,33 \cdot 10^{-3}$ | $2,36 \cdot 10^{-3}$ | $4,21 \cdot 10^{-2}$ |
| 30       | 9,73            | $1,00 \cdot 10^{-2}$ | $2,28 \cdot 10^{-2}$ | $7,84 \cdot 10^{-6}$ | 2,52                 | $3,24 \cdot 10^{-5}$ |
| 31       | 11,03           | $5,33 \cdot 10^{-3}$ | $3,70 \cdot 10^{-2}$ | $1,93 \cdot 10^{-9}$ | $1,14 \cdot 10^{-7}$ | $1,40 \cdot 10^{-4}$ |
| 32       | 12,02           | $1,00 \cdot 10^{-2}$ | $3,79 \cdot 10^{-2}$ | 0                    | $1,10 \cdot 10^{-4}$ | 0                    |
| 36       | 14,24           | $1,03 \cdot 10^2$    | 2,974                | 0                    | $8,90 \cdot 10^{-5}$ | $1,18 \cdot 10^{-3}$ |

Таблица 2

Суммарная оптическая толщина  $\tau(\lambda)$  и прозрачность  $P(\lambda)$  для выбранной группы атмосферных газов в каналах сенсора MODIS

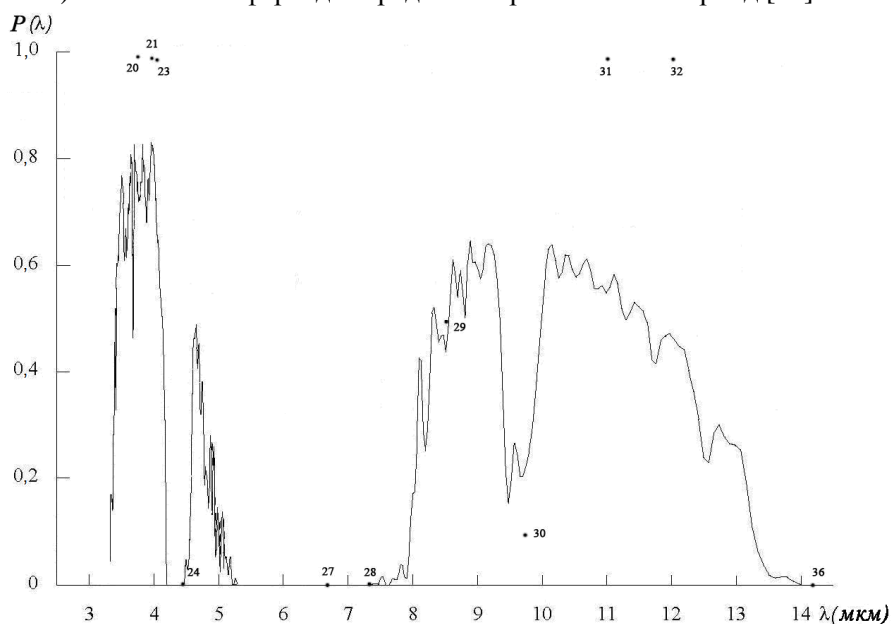
| № канала | $\lambda$ , мкм | $\tau(\lambda)$ | $P(\lambda)$        |
|----------|-----------------|-----------------|---------------------|
| 20       | 3,75            | 0,017           | 0,983               |
| 21       | 3,96            | 0,045           | 0,956               |
| 23       | 4,05            | 0,049           | 0,952               |
| 24       | 4,46            | 7,43            | $5,9 \cdot 10^{-4}$ |
| 27       | 6,72            | 1389            | ~0                  |
| 28       | 7,32            | 124,37          | ~0                  |
| 29       | 8,55            | 0,71            | 0,492               |
| 30       | 9,73            | 2,56            | 0,077               |
| 31       | 11,03           | 0,042           | 0,959               |
| 32       | 12,02           | 0,048           | 0,953               |
| 36       | 14,24           | 106,15          | ~0                  |

Согласно рисункам 3в, 3ж и 3и для  $N_2O$ ,  $CH_4$  и  $CO_2$ , зависимость ОКП нелинейная, в общем случае, зависимость  $k(H)$  вырождается в линейную зависимость в случае наиболее сильного поглощения излучения в каналах #24, #28 и #36 соответственно. Интересно отметить для указанных молекул схожесть поведения  $k(H)$ .

На рис. 4 представлены результаты численного моделирования прозрачности выбранной группы парниковых газов для зимнего температурного профиля над центральной частью территории Казахстана (см. рис. 1) и



для сравнения изображена зависимость функции пропускания («прозрачность») земной атмосферы для средних широт в летний период [10].



*Рис.4. Функция пропускания атмосферы (сплошная линия) для средних широт в летнее время (по данным [10]) и группы из пяти атмосферных газов (нумерованные точки) для центральной части территории Казахстана в зимнее время (результаты моделирования). Числа на графике обозначают номера каналов сенсора MODIS (см. табл. 1 и 2).*

В каналах #20, #21, #23, #31 и #32, включенные в рассматриваемую группу атмосферные газы, строго говоря, не являются парниковыми (прозрачность близка к 1), но в остальных каналах они безусловно являются наиболее эффективными поглотителями ИК-излучения. Значительное расхождение результатов моделирования в #30 канале можно объяснить пространственной и временной вариативностью процентного содержания озона в атмосфере. В этом канале озон является, по-видимому, единственным парниковым газом атмосферы (см. табл. 1 и рис. 4).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атмосфера. Справочник (справочные данные, модели). Л.: Гидрометеиздат, 1991, 510 с.
2. Ахмеджанов А.Х., Исаков А.Н. Определение коэффициентов объемного поглощения инфракрасного излучения парниковыми газами. // Гидрометеорология и экология. – 2009. – №2. – С. 72-77.

3. Грибанов К.Г. Разработка методов определения атмосферных параметров по результатам измерения теплового излучения Земли: / Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Екатеринбург, 2002.
4. Лагутин А.А., Никулин Ю.А., Жуков А.П. и др. Математические технологии оперативного регионального спутникового мониторинга характеристик атмосферы и подстилающей поверхности. Ч. 1. MODIS // Вычислительные технологии. – Том 12. – №2. – 2007. – 23 с.
5. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 640 с.
6. Математические технологии оперативного регионального спутникового мониторинга характеристик атмосферы и подстилающей поверхности. / А.А. Лагутин, Ю.А. Никулин, Ал.А. Лагутин и др. Ч. 2. – AIRS/Препринт АлтГУ-2007/1. – Барнаул, 2007. – 28 с.
7. Тимофеев Ю.М., Васильев А.В. Теоретические основы атмосферной оптики. – СПб.: 2003. – 475 с.
8. Atmospheric transmission, emission and scattering/ Thomas G. Kyle, OXFORD, 1993, 287p
9. The HITRAN molecular spectroscopic database: edition of 2000 including updates through 2001 L.S. Rothman, A. Barbe, D. Chris Benner et al./Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer 82 (2003) 5-44.
10. MODIS land-surface temperature algorithm theoretical basis document (LST ATBD)/ Zhengming Wan. Institute for Computational Earth System Science University of California, Santa Barbara, 1999, 77p

Институт космических исследований, г. Алматы

**СПУТНИК МӘЛІМЕТТЕРІН ҚОЛДАНУМЕН АТМОСФЕРАНЫҢ  
ПАРНИКТІ ГАЗДАРМЕН СӘУЛЕЛЕНУІНІҢ ЖҰТЫЛУ  
ҚАСИЕТТЕРІН МОДЕЛДЕУ**

Техн. ғылымд. докторы    А.Х. Ахмеджанов  
    А.Н. Искаков

*Газдың сортына, температураға, қысымға, қоспадағы газдың көлемді концентрациясына байланысты жұтылу спектр тәуелділігі, зерттелетін газдардың жоғары рұқсаттағы зертханалық спектрлер қолдану негізінде газ молекулаларымен сәулеленудің жұтылу процесін моделдеу мүмкіндігі көрсетілген.*