

## ФИЗИКА

УДК661.974 (575.2)(043.3)

*Саргазаков Талгат Джумакадырович,*  
доцент,  
кандидат физико-математических наук КНУ имени Ж.Баласагына  
*Саргазаков Талгат Джумакадырович,*  
Ж.Баласагын атындагы Кыргыз улуттук университетинин доценти,  
физика-математика илимдеринин кандидаты  
*Sargazakov Talgat Dzhumakadyrovich,*  
Associate Professor,  
Candidate of Physical and Mathematical Sciences of the KNU  
named after Zh. Balasagyn  
*Абдразакова Айдана Бекматжановна,*  
магистрант КНУ имени Ж. Баласагына  
*Абдразакова Айдана Бекматжановна,*  
магистрант,  
Ж. Баласагын атындагы Кыргыз улуттук университетинин  
*Abdrzakova Aidana Bekmatzhanovna,*  
mgraduate student of the KNU  
named after Zh. Balasagyn

**БИШКЕК ШААРЫНЫН УРБАНИЗАЦИЯЛАНГАН АЙМАГЫНДА  
МЕТАНДЫН  $CH_4$ , КӨМҮРТЕК КЫЧКЫЛ ГАЗЫНЫН  $CO$ , КҮКҮРТ КЫЧКЫЛ  
ГАЗЫНЫН  $SO_2$  КОНЦЕНТРАЦИЯСЫН ЭСЕПТӨӨ**

**Аннотация.** Бул макалада тропосферадагы фотохимиялык модел сүрөттөлүп, вертикалдык турбуленттүү өтүү эске алынат жана өтүүнүн горизонталдуу параметрлешүүсү жүргүзүлөт. Шаардын жана эркин тропосферанын булганышына таасир этүүчү фотохимиялык процесстер кеңири каралат.

**Негизги сөздөр:** концентрация, зыяндуу газдар, метан, көмүртек кычкылы, күкүрт кычкыл газы, вариация, фотохимия.

**РАСЧЕТ КОНЦЕНТРАЦИЙ МЕТАНА  $CH_4$ , ОКСИДА УГЛЕРОДА  $CO$  И  
ДИОКСИДА СЕРЫ  $SO_2$  В УРБАНИЗОВАННОЙ ЗОНЕ БИШКЕКА**

**Аннотация.** Данной статье описывается фотохимическая модель в тропосфере, где учитывается вертикальный турбулентный перенос и осуществляется горизонтальная параметризация переноса. Подробно рассматриваются фотохимические процессы, которые влияют на загрязненность в урбанизованных зонах, свободной тропосфере.

**Ключевые слова:** концентрация, вредные газы, метан, окись углерода, диоксид серы, вариация, фотохимия.

**CALCULATION OF THE CONCENTRATIONS OF METHANE  $CH_4$ , CARBON  
MONOXIDE  $CO$  AND SULFUR DIOXIDE  $SO_2$  IN THE URBANIZED AREA OF  
BISHKEK**

**Abstract.** This article describes a photochemical model in the troposphere, where the vertical turbulent transport is taken into account and the horizontal parametrization of the transport is carried out. The photochemical processes that affect pollution in urban areas and the free troposphere are considered in detail.

**Keywords:** concentration, harmful gases, methane, carbon monoxide, sulfur dioxide, variation, photochemistry.

**Введение.** Экологическое состояние столицы Кыргызстана г. Бишкек является важным компонентом его жизнедеятельности. Выбросы ТЭЦ и выхлопы огромного количества автомобилей, сжигание угля и других углеводородных материалов, приводит к повышенным концентрациям вредных газов, таких как озон  $O_3$ , окись углерода  $CO$ , диоксид серы  $SO_2$ , метан  $CH_4$  и др. Формирование концентраций этих газов обусловлены выбросами реактивных органических и серных соединений, окислов азота,  $CO$ ,  $CO_2$ , и др., которые в результате фотохимических процессов образуют повышенные концентрации озона и других ядовитых газов. Большую роль при этом, как окислитель играет свободный радикал  $OH$ . Процессы окисления напрямую зависят от интенсивности Солнечного излучения, поэтому в данной работе проведены расчеты сезонных вариации вредных газов.

Необходимые тропосферные концентрации  $OH$  и др. окислителей, взяты из разработанной автором компьютерной фотохимической модели тропосферы, включающей все основные фотохимические превращения неорганических и органических газов (взятых из [1]) и их вертикальный перенос, с параметризацией горизонтального переноса. Расчеты концентраций  $CO$ ,  $SO_2$ ,  $CH_4$  проведены в кодах VBA в системе EXCEL.

**Метод проведения расчетов.** Расчет концентраций газов проводился с учетом вертикальной турбулентной диффузии, из следующего уравнения неразрывности для компоненты с номером  $i$ :

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_T n_e \frac{\partial n_i / n_e}{\partial z} \right] = P_i - L_i n_i \quad (1)$$

где  $n_a$  - концентрация атмосферы ( $mol/cm^3$ );  $P_i$ ,  $L_i$  - фотохимические источники и стоки, соответственно для компоненты (в основном это стоки по реакциям с

гидроксильным радикалом  $OH$ );  $K_T$  - коэффициент вер-тикальной турбулентной диффузии (в  $cm^2/c$ , взят из работы [2], так что при  $z \leq 10$  км,  $K_T = 1.5 \cdot 10^5$   $cm^2/c$ , а при  $z > 10$  км,  $K_T$  убывает по экспоненте до значения  $5 \cdot 10^3$   $cm^2/c$  на высоте 15 км). В данной модели рассчитываются на высотах 0 – 15 км (тропосфера) концентрации следующих малых газовых составляющих атмосферы:  $CO$ ,  $SO_2$ ,  $CH_4$ .

Помимо вертикального среднеглобального турбулентного переноса, на компоненты действует и горизонтальный перенос. Параметризация горизонтального переноса в модели осуществляется следующим образом. Пусть площадь урбанизированной зоны города Бишкек есть  $S = l \cdot d$ , где  $l$  – условная длина этой территории, а  $d$  – ее ширина. Пусть  $h$  – высота этой зоны. Визуально она составляет около 500 м. Тогда концентрация любой компоненты будет уменьшаться за счет расширения этой зоны. Полагая, что полное количество молекул компоненты  $i$ , равно  $S \cdot h \cdot n_i$  в этой зоне, не меняется за характерное время расширения этой зоны, и полагая неизменной высоту  $h$ , дифференцированием получим

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = - \frac{1}{S} \frac{\partial S}{\partial t} n_i = - \alpha n_i, \quad \alpha = - \left( \frac{v_l}{l} + \frac{v_d}{d} \right) \quad (2)$$

где  $v_l$  и  $v_d$  – характерные скорости расширения зоны в длину и ширину, соответственно. В модели принимается для Бишкека,  $l \approx 30$  км и  $d \approx 20$  км. Характерные скорости в модели подбираются таким образом, чтобы рассчитанные концентрации в различных сезонах диоксида серы  $SO_2$ , являющая относительно химически пассивной компонентой, соответствовали его измеренным значениям. Затем, полученные значения коэффициента  $\alpha$  для всех химически пассивных компонент добавляются в стоки  $L_i$  этих компонент, при решении уравнения (1). Высотные среднеглобальные сезонные профили тем-

пературы и плотности атмосферы, а также нижние граничные условия для некоторых компонент на высоте 0 км, взяты из работ [3,4]. На верхней границе (15 км) для всех компонент их потоки полагаются равными нулю. Для задания вертикальных потоков (граничные условия) с поверхности Земли рассматриваемых газов, которые обу-

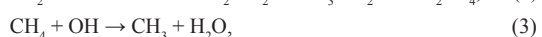
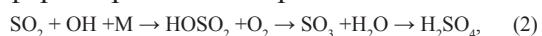
словлены антропогенными выбросами в бассейне урбанизированной зоны г. Бишкек в результате сжигания углеводородов на ТЭЦ и частном секторе в отопительный сезон, и выхлопами автомобильного транспорта, были использованы оценки, выполненные в работе [1] и данные Госэкотехинспекции. При расчетах были получены оценки выбросов газов, представленные в таблице 1.

**Таблица 1. Выбросы вредных газовых примесей в атмосферу г. Бишкек в 2021-2022 годах в урбанизированную зону 30 x 30 км.**

Газовая примесь	Выбросы автотранспорта, тыс. тонн/год	Выбросы ТЭЦ, тыс. тонн (в отопительный сезон 120 дней)	Выбросы частного сектора, тыс. тонн (в отопительный сезон 120 дней)
CO	159.8	30	30
SO <sub>2</sub>	1.13	5.762	5.762
CH <sub>4</sub>	7.526	3	3

Эти данные затем пересчитывались в потоки соответствующих газов с поверхности Земли, необходимые для решения уравнения (1).

Стоки рассчитываемых газов в тропосфере определяются реакциями:



Константы этих реакций взяты из [5]. Таким образом сезонные вариации тропосферных концентраций газов CO, SO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> определяются сезонными изменениями выбросов этих газов и сезонными вариациями OH. Необходимые концентрации OH были взяты из расчетов по разработанной автором фотохимической модели, с учетом изменения по сезонам зенитного угла Солнца.

Уравнения (1) с учетом граничных условий решались разностными численными методами с постоянным шагом по высоте  $\Delta z = 1$  км на высотах от 0 до 15 км, и переменным шагом по времени  $\Delta t$ . Так как

профиль коэффициента КТ имеет разрыв в области 10 - 15 км, то для аппроксимации диффузионного члена в (1) использовался интегро-интерполяционный метод [6], [7]. Граничные условия аппроксимировались также как и в работе [8].

Вычисления начинались от произвольных вертикальных профилей концентраций газов CO, SO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> и методом установления, когда концентрации не менялись от шага к шагу в каждом сезоне, получались установившиеся вертикальные тропосферные сезонные их концентрации.

#### Результаты расчетов

В результате моделирования и расчета среднемесячных концентраций по данным 2021-2022 года были получены следующие результаты.

Модельные тропосферные концентрации для следующих составляющих: Озон O<sub>3</sub>, свободный радикал OH, диоксид серы SO<sub>2</sub>, окись углерода CO, метан CH<sub>4</sub> (в молек./см<sup>3</sup>) за **апрель 2022 г** в городе Бишкек (рис.1 и 2).

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Модельные тропосферные концентрации		Z (km)	O3 (cm-3)	OH (cm-3)*1.0E3	SO2 (cm-3)	CO (cm-3)	CH4 (cm-3)
2	Апрель 2022г, Бишкек		0	8,70E+11	1,61E+09	1,22E+10	3,59E+12	5,30E+13
3	Наиболее важные для оценки загрязненности		1	8,95E+11	1,04E+09	6,89E+09	3,09E+12	4,76E+13
4	компоненты:		2	8,78E+11	7,55E+08	3,97E+09	2,67E+12	4,27E+13
5	Озон O3, свободный радикал OH, диоксид серы SO2,		3	8,56E+11	5,71E+08	2,38E+09	2,34E+12	3,83E+13
6	окись углерода CO, метан CH4 (в молек./см3).		4	8,33E+11	4,50E+08	1,56E+09	2,05E+12	3,43E+13
7			5	8,13E+11	3,61E+08	1,09E+09	1,80E+12	3,07E+13
8			6	7,94E+11	2,93E+08	8,09E+08	1,58E+12	2,73E+13
9			7	7,77E+11	2,48E+08	6,22E+08	1,38E+12	2,43E+13
10			8	7,61E+11	2,27E+08	4,94E+08	1,21E+12	2,15E+13
11			9	7,53E+11	2,26E+08	3,98E+08	1,05E+12	1,90E+13
12			10	7,84E+11	2,61E+08	2,89E+08	8,53E+11	1,57E+13
13			11	9,89E+11	2,56E+08	2,05E+08	6,95E+11	1,33E+13
14			12	1,47E+12	2,08E+08	1,45E+08	5,46E+11	1,11E+13
15			13	2,30E+12	1,49E+08	1,09E+08	4,34E+11	9,44E+12
16			14	3,36E+12	1,09E+08	8,95E+07	3,59E+11	8,07E+12
17								

Рис.1. Модельные весенние концентрации компонент(молек/см3): озон O<sub>3</sub>, OH, диоксид серы SO<sub>2</sub>, окись углерода CO, метан CH<sub>4</sub>, Бишкек апрель 2022г.

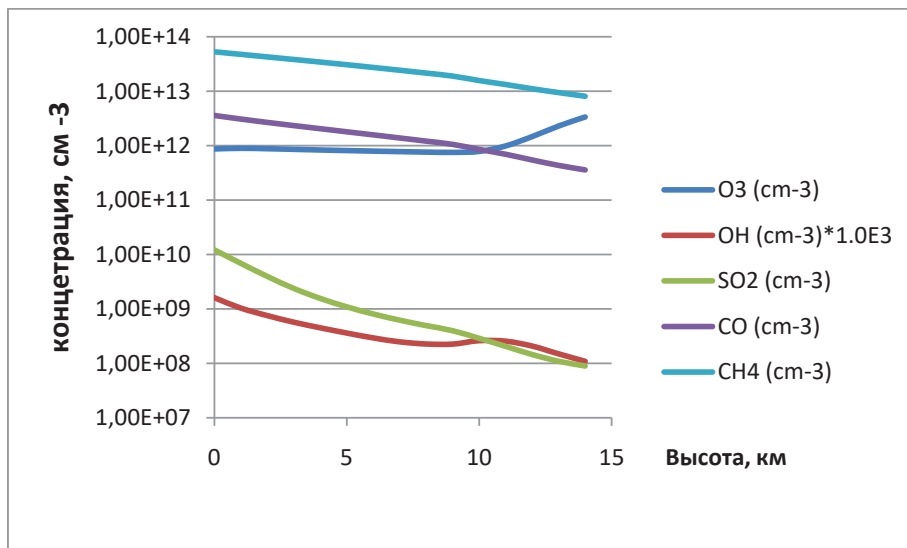


Рис.2. График весенних концентраций озона O<sub>3</sub>, OH, диоксида серы SO<sub>2</sub>, окись углерода CO, метана CH<sub>4</sub>

Модельные тропосферные концентрации для следующих составляющих: Озон  $O_3$ , свободный радикал  $OH$ , диоксид серы  $SO_2$ , окись углерода  $CO$ , метан  $CH_4$  (в молек./см<sup>3</sup>) за июль 2021г в городе Бишкек (рис.3 и 4).

	Z (km)	O3 (cm-3)	OH (cm-3)*1.0e3	SO2 (cm-3)	CO (cm-3)	CH4 (cm-3)
1 Модельные тропосферные концентрации						
2 Июль 2021г, Бишкек	0	7,01E+11	3,89E+09	1,06E+10	2,35E+12	4,74E+13
3 Наиболее важные для оценки загрязненности	1	6,74E+11	2,40E+09	5,47E+09	1,97E+12	4,27E+13
4 компоненты:	2	6,27E+11	1,77E+09	2,92E+09	1,68E+12	3,85E+13
5 Озон O3, свободный радикал OH, диоксид серы SO2,	3	6,03E+11	1,38E+09	1,64E+09	1,45E+12	3,49E+13
6 окись углерода CO, метан CH4 (в молек./см3).	4	5,97E+11	1,15E+09	9,92E+08	1,27E+12	3,15E+13
	5	6,05E+11	9,99E+08	6,43E+08	1,11E+12	2,83E+13
	6	6,21E+11	8,87E+08	4,39E+08	9,73E+11	2,54E+13
	7	6,39E+11	7,78E+08	3,15E+08	8,56E+11	2,28E+13
	8	6,59E+11	6,75E+08	2,36E+08	7,54E+11	2,03E+13
	9	6,89E+11	6,09E+08	1,80E+08	6,63E+11	1,81E+13
	10	7,99E+11	6,15E+08	1,23E+08	5,53E+11	1,53E+13
	11	1,14E+12	5,04E+08	7,88E+07	4,67E+11	1,31E+13
	12	1,92E+12	4,04E+08	4,59E+07	3,86E+11	1,11E+13
	13	3,32E+12	3,14E+08	2,60E+07	3,24E+11	9,42E+12
	14	5,36E+12	2,74E+08	1,78E+07	2,78E+11	8,10E+12

Рис.3. Модельные летние концентрации компонент(молек/см<sup>3</sup>): озон  $O_3$ ,  $OH$ , диоксид серы  $SO_2$ , окись углерода  $CO$ , метан  $CH_4$  Бишкек июль 2021г.

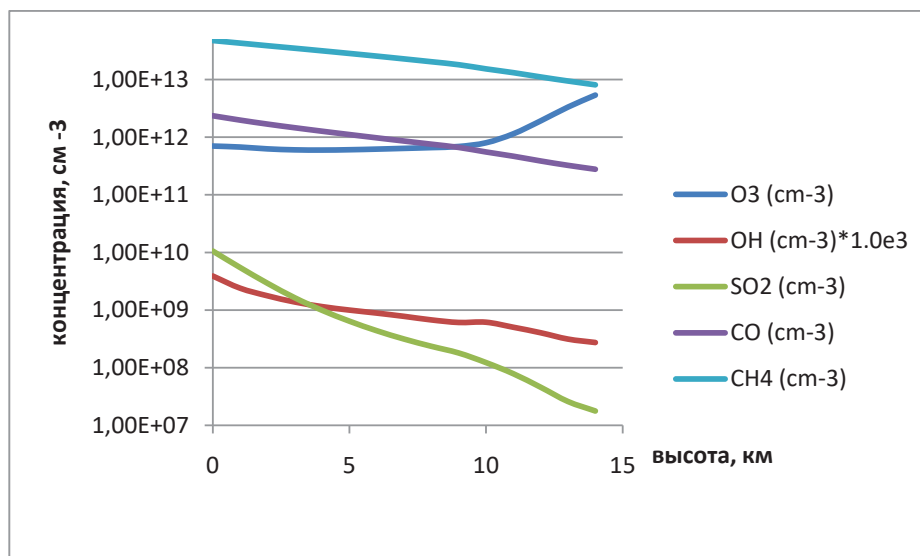


Рис.4. График летних концентраций озона  $O_3$ ,  $OH$ , диоксида серы  $SO_2$ , окись углерода  $CO$ , метана  $CH_4$

Модельные тропосферные концентрации для следующих составляющих: Озон  $O_3$ , свободный радикал  $OH$ , диоксид серы  $SO_2$ , окись углерода  $CO$ , метан  $CH_4$  (в молек./ $cm^3$ ) за **ноябрь 2021г** в городе Бишкек (рис.5 и 6).

Имя	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Модельные тропосферные концентрации		Z (km)	$O_3$ (cm-3)	$OH$ (cm-3)*1.0E3	$SO_2$ (cm-3)	$CO$ (cm-3)	$CH_4$ (cm-3)
2	Ноябрь 2021г, Бишкек		0	7,91E+11	1,34E+09	1,25E+10	2,96E+12	5,04E+13
3	Наиболее важные для оценки загрязненности		1	8,18E+11	8,82E+08	7,12E+09	2,49E+12	4,51E+13
4	компоненты:		2	8,11E+11	6,68E+08	4,11E+09	2,12E+12	4,02E+13
5	Озон $O_3$ , свободный радикал $OH$ , диоксид серы $SO_2$ ,		3	8,05E+11	5,13E+08	2,49E+09	1,82E+12	3,62E+13
6	окись углерода $CO$ , метан $CH_4$ (в молек./ $cm^3$ ).		4	7,99E+11	4,13E+08	1,64E+09	1,57E+12	3,25E+13
7			5	7,96E+11	3,41E+08	1,15E+09	1,35E+12	2,91E+13
8			6	7,94E+11	2,83E+08	8,48E+08	1,17E+12	2,60E+13
9			7	7,94E+11	2,40E+08	6,50E+08	1,01E+12	2,32E+13
10			8	7,94E+11	2,16E+08	5,13E+08	8,75E+11	2,06E+13
11			9	8,03E+11	2,11E+08	4,09E+08	7,55E+11	1,82E+13
12			10	8,73E+11	2,44E+08	2,91E+08	6,06E+11	1,52E+13
13			11	1,16E+12	2,25E+08	1,96E+08	4,87E+11	1,30E+13
14			12	1,78E+12	1,62E+08	1,20E+08	3,81E+11	1,11E+13
15			13	2,75E+12	1,08E+08	7,26E+07	3,05E+11	9,58E+12
16			14	3,77E+12	8,00E+07	5,15E+07	2,55E+11	8,27E+12
17								

Рис.5. Модельные осенние концентрации компонент (молек./ $cm^3$ ): озон  $O_3$ ,  $OH$ , диоксид серы  $SO_2$ , окись углерода  $CO$ , метан  $CH_4$ , Бишкек ноябрь 2021г.

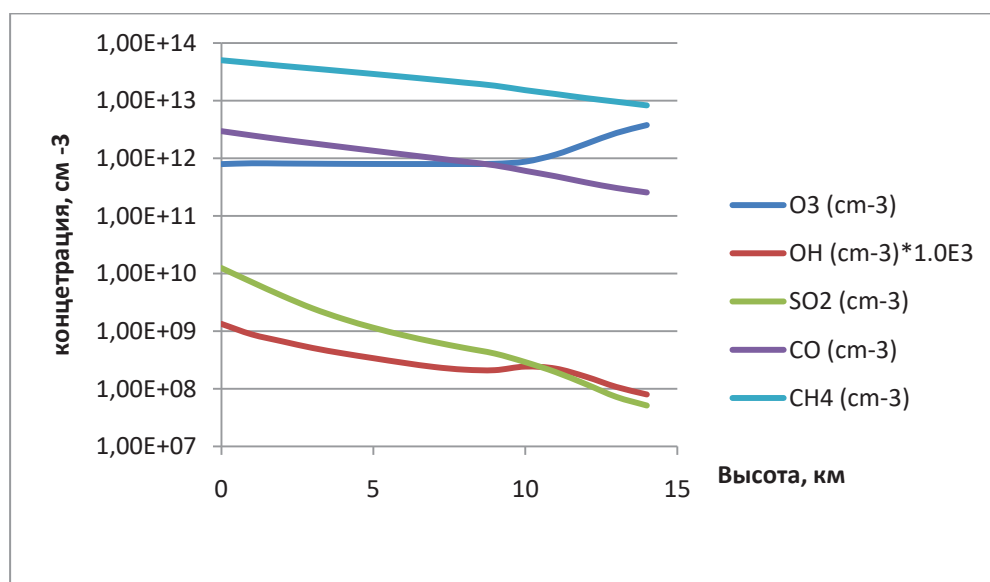


Рис.6. График осенних концентраций озона  $O_3$ ,  $OH$ , диоксида серы  $SO_2$ , окись углерода  $CO$ , метана  $CH_4$

Модельные тропосферные концентрации для следующих составляющих: Озон  $O_3$ , свободный радикал  $OH$ , диоксид серы  $SO_2$ , окись углерода  $CO$ , метан  $CH_4$  (в молек./см<sup>3</sup>) за январь 2022г в городе Бишкек (рис.7 и 8).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Модельные тропосферные концентрации		Z (km)	$O_3$ (cm-3)	$OH$ (cm-3)*1.0E3	$SO_2$ (cm-3)	$CO$ (cm-3)	$CH_4$ (cm-3)	
2	Январь 2022г, Бишкек		0	1,02E+12	9,08E+08	1,02E+10	3,66E+12	5,29E+13	
3	Наиболее важные для оценки загрязненности		1	1,01E+12	6,32E+08	5,97E+09	3,11E+12	4,71E+13	
4	компоненты:		2	9,70E+11	4,76E+08	3,54E+09	2,66E+12	4,19E+13	
5	Озон $O_3$ , свободный радикал $OH$ , диоксид серы $SO_2$ ,		3	9,35E+11	3,58E+08	2,19E+09	2,30E+12	3,75E+13	
6	окись углерода $CO$ , метан $CH_4$ (в молек./см <sup>3</sup> ).		4	9,02E+11	2,78E+08	1,48E+09	1,99E+12	3,35E+13	
7			5	8,73E+11	2,21E+08	1,06E+09	1,72E+12	2,99E+13	
8			6	8,46E+11	1,80E+08	8,07E+08	1,49E+12	2,66E+13	
9			7	8,23E+11	1,54E+08	6,36E+08	1,29E+12	2,35E+13	
10			8	8,01E+11	1,42E+08	5,15E+08	1,12E+12	2,08E+13	
11			9	7,89E+11	1,42E+08	4,22E+08	9,62E+11	1,83E+13	
12			10	8,20E+11	1,58E+08	3,15E+08	7,69E+11	1,52E+13	
13			11	1,03E+12	1,60E+08	2,31E+08	6,15E+11	1,29E+13	
14			12	1,53E+12	1,17E+08	1,65E+08	4,73E+11	1,09E+13	
15			13	2,34E+12	7,74E+07	1,18E+08	3,70E+11	9,41E+12	
16			14	3,27E+12	5,60E+07	9,25E+07	3,03E+11	8,09E+12	

Рис.7. Модельные зимние концентрации компонент (молек/см<sup>3</sup>): озон  $O_3$ ,  $OH$ , диоксид серы  $SO_2$ , окись углерода  $CO$ , метан  $CH_4$ , Бишкек январь 2022 г.

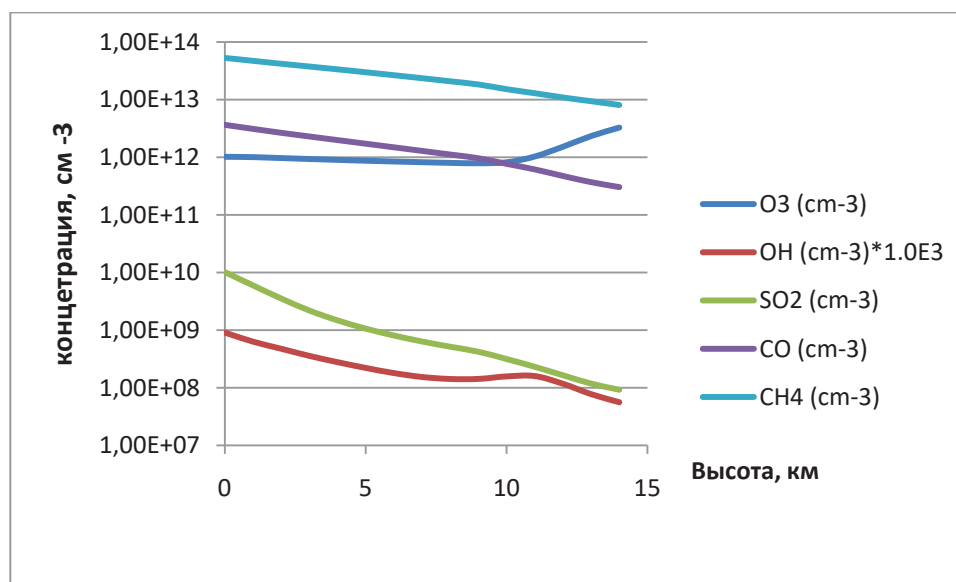


Рис.8. График зимних концентраций озона  $O_3$ ,  $OH$ , диоксида серы  $SO_2$ , окиси углерода  $CO$ , метана  $CH_4$ .



## Литература

1. *Jacobson M.Z.* Fundamentals of Atmospheric Modeling / M.Z. Jacobson. Cambridge University Press: Second edition. New York, 2005. 813 p.
2. *Massie S.T., D.M. Hunten.* Stratospheric eddy diffusion coefficients from tracer data / S.T. Massie et al. // *J. Geophys. Res.* V. 86. No. C8. 1981. p. 7210 – 7254.
3. US Standard Atmosphere / Washington. 1976. 227 p.
4. Атмосфера: справочник (справочные данные, модели). Л.:Гидрометеиздат, 1991. 510 с.
5. *Sander S., et al.* Chemical kinetics and photochemical for use in atmospheric studies / S. Sander et al. // Evaluation No.17. JPL Publication 10-6. Jet Propulsion Laboratory. Pasadena. 2011.
6. *Самарский А.А.* Теория разностных схем / А.А. Самарский. М.: Наука, 1977. 656 с.
7. *Саргазаков, Т. Д.* Численные методы решения математических задач в системе EXSE+L для физиков: учебное пособие / Т.Д. Саргазаков . Бишкек: ИЦ «Техник», 2007. 73 с.
8. *Саргазаков Т. Д.* Численное моделирование переноса примеси в одномерной среде / Т.Дж.Саргазаков // Вестник КРСУ.2019. Том 19, декабрь.