

Спектральная система измерений газовых атмосферных компонентов с оптоволоконной следящей системой и некоторые результаты анализа атмосферных спектров

С.С. Васильченко, В.И. Сердюков, Л.Н. Сеница*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 14.02.2012 г.

Представлена спектральная система измерений газовых атмосферных компонентов на основе Фурье-спектрометра Bruker IFS 125M с оптоволоконным трекером. В качестве тестовых приведены результаты исследования содержания атмосферных газов CO₂ и H₂O в атмосфере в районе г. Томска на основе анализа атмосферных спектров пропускания солнечного излучения, зарегистрированных на Фурье-спектрометре. Представлены результаты сравнения спектров пропускания атмосферы для солнечных зенитных углов 34 и 78°, которые показывают присутствие в приземном слое значительного количества столкновительных комплексов кислорода.

Ключевые слова: спектр излучения неона, частотная шкала, юстировка Фурье-спектрометра; emission spectrum of neon, the frequency scale, alignment of the Fourier spectrometer.

Введение

В последние десятилетия наблюдается резкое повышение в атмосфере Земли содержания ключевых парниковых газов (CO₂, CH₄ и др.), сопровождающееся ростом среднегодовой температуры поверхности. Изучение парникового эффекта становится важной научной и практической проблемой современности. Наличие достоверного мониторинга управляющих параметров климатической системы Земли (альbedo, концентрация парниковых газов, водный цикл) позволяет получать новые знания о физике радиационного баланса нашей планеты, выявлять характерные тренды в процессе глобального потепления и их количественные характеристики [1]. Важными являются данные по таким параметрам атмосферы и составляющим энергобаланса Земли, как концентрация парниковых газов в атмосфере (вертикальный профиль и общее содержание в атмосферном столбе) [1–4]. Для более полного представления картины изменений желательнее проводить измерения равномерно по земному шару и в как можно большем числе точек; эти наземные измерения, в частности, необходимы для калибровки спутниковых измерений.

В мире этой задаче уделяется большое внимание. В настоящее время создана сеть наземных станций (проект NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change)), включающих

свыше 30 Фурье-спектрометров Bruker, охватывающих весь земной шар. Белым пятном в этой сети остается центральная часть Евразийского континента [4, 5]. Удачное расположение Томска и наличие в ИОА СО РАН Фурье-спектрометра высокого разрешения Bruker IFS 125M открывают возможность создания станции постоянного наблюдения основных парниковых газов в атмосфере и вхождения в мировую сеть NDACC.

В настоящее время в ИОА СО РАН имеется необходимая аппаратура для проведения регулярных измерений солнечной радиации, поглощенной атмосферой Земли, проводится регулярный мониторинг состояния атмосферы по большому количеству приземных параметров (температура, влажность, содержание O₃, CO, CH₄, CO₂, NO₂ и др.) [6]. Важнейшими задачами, которые можно решить при регистрации спектра пропускания атмосферы, являются определение концентрации газов в столбе атмосферы и восстановление вертикальных профилей концентраций исследуемых газовых компонентов атмосферы.

В настоящей статье описана спектральная система измерений газовых атмосферных компонентов по регистрации излучения Солнца, в которой использован Фурье-спектрометр с оптоволоконным трекером.

Экспериментальная установка

Схема системы регистрации солнечного спектра атмосферы приведена на рис. 1.

* Семен Сергеевич Васильченко (vss544@gmail.com); Виктор Иванович Сердюков (vis@asd.iao.ru); Леонид Никифорович Сеница (sln@asd.iao.ru).

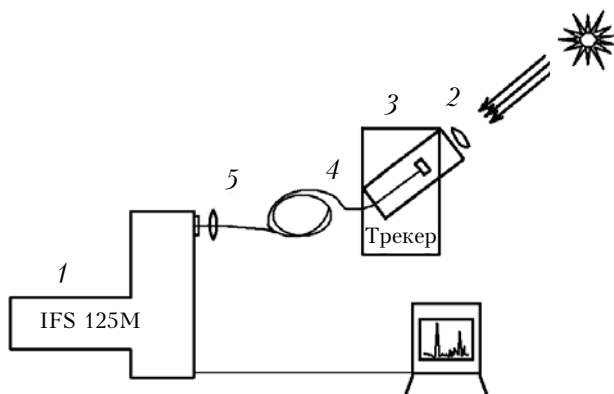


Рис. 1. Схема спектральной системы: 1 – Фурье-спектрометр; 2 – объектив; 3 – солнечный трекер; 4 – световод; 5 – заводная оптика

Она включает Фурье-спектрометр фирмы Bruker IFS 125M, следящий трекер с системой ориентации на Солнце и оптоволоконным каналом ввода солнечного излучения в Фурье-спектрометр. Основные параметры Фурье-спектрометра приведены ниже.

Спектральный диапазон	25000–450 см ⁻¹
Разрешение	до 0,0035 см ⁻¹
Разрешающая сила	≥ 10 ⁶
Точность определения длин волн	10 ⁻⁶
Фотометрическая точность	0,1%
Делитель	КВг, кварц

Ориентация прибора на не закрытое облаками Солнце в процессе его движения по небосводу производится с помощью специального оптико-электронного устройства, установленного на двухкоординатном (азимут/зенит) поворотном столе (солнечном трекере) (рис. 2).



Рис. 2. Солнечный трекер

В состав системы входят 4 фотодиода грубого наведения и 4-секторный фотодиод ФД-142 точного слежения. Четырехсекторный фотодиод установлен в фокусе линзы, а фотодиоды грубого наведения развернуты друг относительно друга для увеличения общего поля обзора. Оптические оси двух систем совмещены таким образом, что после работы схемы грубого наведения Солнце оказывается в поле линзовой системы точного слежения. Управление электроприводами поворотного стола осуществляется с помощью электронных схем разностных сигналов, поступающих от датчиков грубого и точного наведения. Погрешность слежения за Солнцем в этом случае не превышает 0,2°. Подробно система ориентации прибора приведена в работе [7].

Излучение Солнца с помощью линзовой системы 2 с фокусным расстоянием $F = 70$ мм заводится в многомодовый кварцевый световод 4 диаметром 1 мм. Излучение со световода направляется с помощью линзы 5 с фокусным расстоянием $F = 270$ мм на внешний входной канал Фурье-спектрометра. Спектральный диапазон работы системы в результате использования оптоволоконной оптики ограничен спектральной областью пропускания световода и составляет 4000–25000 см⁻¹. Верхняя граница работы системы обусловлена областью чувствительности фотоприемника.

Спектрометр невакуумирован, это затрудняет его использование для регистрации лабораторных спектров, но не оказывает влияния на регистрацию солнечного спектра, когда излучение проходит в атмосфере путь в несколько десятков километров.

Результаты и обсуждение

Спектры поглощения солнечной радиации, прошедшей через атмосферу, регистрировались с разрешением 0,01; 0,1; 1,0 и 10 см⁻¹. Время регистрации одного измерения составляло 12 мин. Солнце в этом случае сдвигается на угол 3°. В отсутствие облачности спектры отличаются высокой стабильностью, фотометрическая погрешность не превышает 0,5%. Зарегистрированный спектр (рис. 3, а) представляет собой свертку спектра излучения Солнца с аппаратной функцией спектральной системы, включающей трекер, оптическую систему спектрометра и кремниевый фотодетектор.

При корректировке базовой линии для регистрируемого континуального поглощения на Фурье-спектрометре необходимо учитывать неоднородность спектральной чувствительности фотоприемника (в нашем случае это кремниевый фотодиод), неоднородности в пропускании светоделителя и световода. Для учета неоднородности регистрирующей спектральной системы проводилась регистрация излучения абсолютно черного тела $I_0(\nu)$ при известной температуре по тому же каналу, что и излучение Солнца:

$$I_1(\nu) = T_1(\nu)I_0(\nu).$$

После этого из полученного сигнала $I_1(\nu)$ определялась функция пропускания спектрометра $T_1(\nu)$.

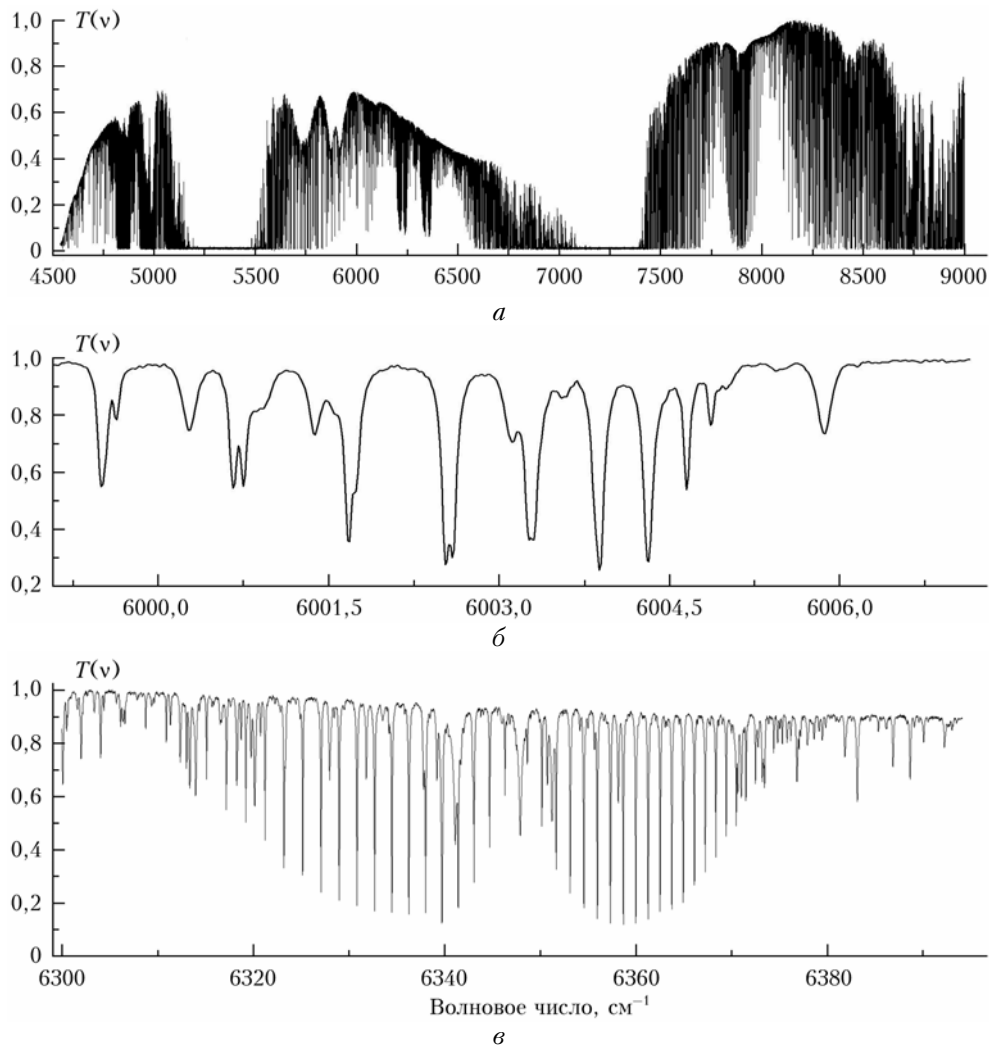


Рис. 3. Обзорный спектр пропускания атмосферы (а) и участки спектра, содержащие полосы поглощения CH_4 (б) и CO_2 (в)

В дальнейшем при регистрации солнечного спектра атмосферы $I(\nu)$ излучение Солнца описывалось функцией Планка $Y(\nu, T)$ с температурой 5800 К:

$$I(\nu) = T(\nu)T_1(\nu)Y(\nu, T),$$

и затем использовалось как базовая линия в исследуемом диапазоне для определения пропускания атмосферы $T(\nu)$ с учетом $T_1(\nu)$.

В настоящее время на спектральной системе проведены тестовая регистрация и обработка данных в диапазонах 10900–11180 и 6180–6260 cm^{-1} , где зарегистрированы разрешенные спектры атмосферных газов H_2O , CH_4 и CO_2 [8]. На рис. 3, б, в приведены фрагменты регистрируемого солнечного спектра атмосферы, содержащие колебательно-вращательные полосы CH_4 и CO_2 . Кроме линий колебательно-вращательного спектра, принадлежащих атмосферным газам, в солнечном спектре атмосферы регистрируются фраунгоферовы линии, имеющие на порядок большую ширину, чем атмосферные линии. Их учет производился с помощью спектров солнечного из-

лучения, зарегистрированных со спутника в отсутствие поглощения атмосферой [9].

Сравнение спектров пропускания атмосферы для солнечных зенитных углов 34 и 78° показывает, что для почти горизонтальной трассы в атмосфере появляется значительное континуальное поглощение на длинах волн $\lambda = 1060, 630, 602, 577$ и 477 нм, которое свидетельствует о присутствии в приземном слое значительного количества столкновительных комплексов $\text{O}_2\text{--O}_2$ кислорода.

На рис. 4, а приведен участок спектра, зарегистрированного зимой 2012 г., содержащий континуальное поглощение в области 600 нм, демонстрирующий наличие поглощения как O_3 , так и $\text{O}_2\text{--O}_2$. На рис. 4, б, в приведены коэффициенты поглощения O_3 и $\text{O}_2\text{--O}_2$ в исследуемой области, взятые из работ [10, 11] соответственно.

Исследования столкновительных комплексов кислорода $\text{O}_2\text{--O}_2$, их роли в атмосферном поглощении были начаты в России в работах Дианова–Клокова [12]. Ослабление солнечного излучения столкновительными комплексами кислорода регистрировалось

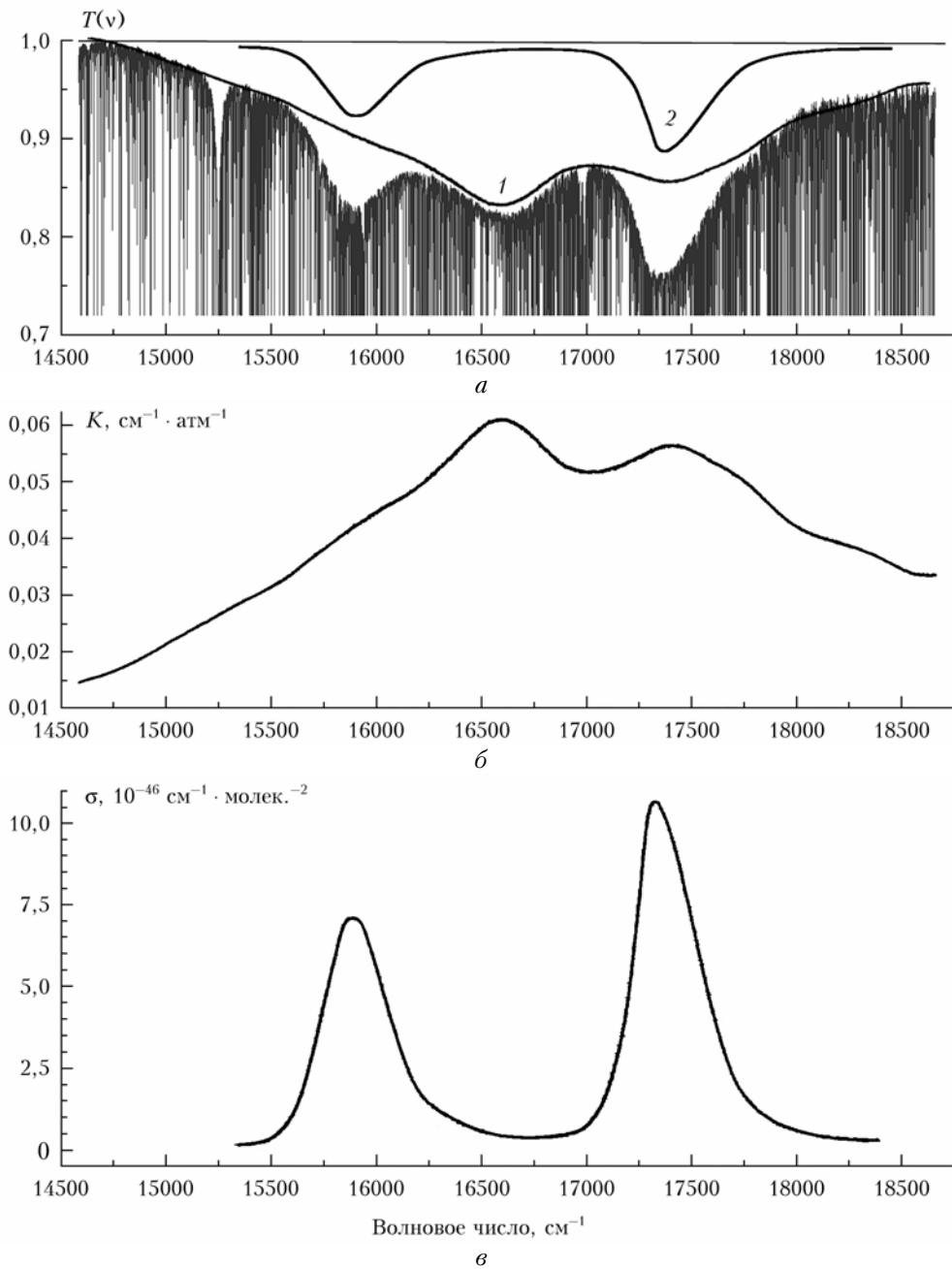


Рис. 4. Участок солнечного спектра атмосферы в диапазоне 14500–18500 см^{-1} , зарегистрированный зимой 2012 г. (а) (сплошными линиями изображены вклады O_3 (1) и $\text{O}_2\text{-O}_2$ (2)); спектры поглощения O_3 (б) и $\text{O}_2\text{-O}_2$ (в)

ранее (см., например, работу [13], в которой в диапазоне 0,3–1,1 мкм зарегистрировано 9 полос $\text{O}_2\text{-O}_2$). Идентификация полос и коэффициенты поглощения приведены в [14], они включают переходы с основного электронного состояния кислорода $^1\Sigma_g^- + ^1\Sigma_g^-$ на электронное состояние $^1\Delta_g + ^1\Delta_g$. Коэффициенты поглощения столкновительных комплексов $\text{O}_2\text{-O}_2$ измерены на лазерном спектрометре CRDS [11] при давлении ниже 760 торр и приведены в таблице.

Индукцированные столкновениями полосы кислорода в области 540–650 нм были зарегистрированы в лабораторных условиях при вариации давления

Параметры полос $\text{O}_2\text{-O}_2$ в области 600 нм [11]

Верхнее колебательное состояние	Частота, см^{-1}	Коэффициент поглощения K_{max} , $10^{-46} \text{ см}^5 \cdot \text{молек.}^{-2}$
0	15869	7,55
1	17320	11,41

0–730 торр при температуре $T = 294 \text{ К}$ [11]. Величина ослабления солнечного излучения на длинах волн 630 и 577 нм в наших измерениях меняется от 1–2% в летнее время на малых зенитных углах до 10–20% на больших зенитных углах в зимнее время.

Данные [11–15] подтверждают, что зарегистрированное нами континуальное поглощение принадлежит наиболее интенсивным полосам столкновительных комплексов кислорода, за исключением полосы 602 нм. Поглощение полосы 602 нм обусловлено молекулами O_3 , а именно полосой Шапюи [10].

При подгонке зарегистрированного спектра к расчетному поглощению O_3 и O_2-O_2 с помощью метода наименьших квадратов получено описание зарегистрированной континуальной составляющей поглощения солнечного излучения, определены вклады O_3 и O_2-O_2 в континуальное поглощение атмосферой (см. рис. 4, а). Из рис. 4 видно, что зимой при зенитных углах 78° и температуре 243 К ослабление излучения из-за поглощения O_2-O_2 в области 600 нм достигает 12%.

Обнаружено, что ослабление солнечного излучения за счет поглощения O_2-O_2 варьируется при изменении температуры (величина поглощения меняется примерно обратно пропорционально абсолютной температуре). Мы провели оценки ослабления столкновительными комплексами кислорода солнечного излучения при наклонных трассах, когда солнечное излучение проходит расстояние в атмосфере 15 км при давлении, близком к 760 торр, с учетом измеренных в лабораторных условиях коэффициентов поглощения димеров кислорода [11]. Оценки показывают, что ослабление солнечного излучения атмосферой в области максимумов поглощения O_2-O_2 на длине волны 577 нм при комнатной температуре может достигать 10%.

Величина второго вириального коэффициента $B(T)$ кислорода приведена в работе [16]. При температуре 243 К она в 2 раза выше, чем при комнатной. Выражение, связывающее второй вириальный коэффициент $B(T)$ с постоянной димеризации:

$$K_{eq}(T) = -[B(T) - b_0]/RT,$$

где R – константа; b_0 – «исключенный» объем [17], показывает, что увеличение второго вириального коэффициента сопровождается резким увеличением константы димеризации при низких температурах. Резкое увеличение константы димеризации при низкой температуре в нижних слоях атмосферы, когда давление достаточно велико, в свою очередь, может привести к такому большому поглощению столкновительных комплексов O_2-O_2 кислорода (10–20%), которое зарегистрировано нами в сибирских условиях на больших наклонных трассах при температуре 243 К.

Заключение

Полоса 602 нм озона используется для измерения суммарного содержания озона в атмосфере. В частности, канадский спутник ACE FTS оснащен Фурье-спектрометром MAESTRO для озоновых измерений [18]. Для точного знания аппаратной функции спектрометра и спектра поглощения озона в работе [18] проведены спектроскопические калибровочные измерения. Как следует из наших экспе-

риментов, не менее важным оказывается вклад континуального поглощения O_2-O_2 , учет которого может привести к погрешности измерения озона до 20%.

Используемый нами трекер отсекает диапазон ниже 4000 см^{-1} . Однако именно в этом диапазоне ($500-4000\text{ см}^{-1}$) находятся сильные полосы поглощения, которые используются для определения концентраций и высотных профилей различных газов. Поэтому нами разрабатывается зеркальный солнечный трекер, который представляет собой систему из трех зеркал с двумя степенями свободы. Два зеркала, расположенные на подвижных осях, обеспечивают охват всей верхней полусферы. Третье неподвижное зеркало служит для заведения солнечного излучения в спектрометр. Создаваемый зеркальный солнечный трекер позволит проводить измерения в диапазоне $700-4000\text{ см}^{-1}$ и получать информацию, которая будет соответствовать стандартам международной сети NDACC.

Мы благодарны В.Е. Прокопьеву за полезные и плодотворные обсуждения, С.А. Турчиновичу – за помощь в изготовлении трекера.

Работа выполнена при поддержке РФФИ и программы 3.9 ОФИ РАН и Министерством образования и науки Российской Федерации (Контракт 11.519.11.5009).

1. Кондратьев К.Я. Глобальные изменения климата: факты, предположения и перспективы разработок // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15, № 10. С. 851–866.
2. Успенский А.Б. Дистанционное зондирование атмосферы с помощью спутниковых Фурье-спектрометров // Междунар. конф. «Математические методы в геофизике». Новосибирск: ИВМ и МГ, 2003. Ч. II. С. 579–584.
3. Clerbaux C., George M., Turquety S. et al. CO measurements from the ACE-FTS satellite instrument: data analysis and validation using ground-based, airborne and spaceborne observations // Atmos. Chem. and Phys. 2008. V. 8, N 9. P. 2569–2594.
4. Schneider M., Hase F. Ground-based FTIR water vapour profile analyses // Atmos. Meas. Techn. 2009. V. 2, N 2. P. 609–619.
5. URL: <http://www.ndsc.ncep.noaa.gov/>
6. URL: <http://iao.ru/>
7. Кабанов Д.М., Сакерин С.М., Турчинович С.А. Солнечный фотометр для научного мониторинга (аппаратура, методика, алгоритмы) // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14, № 12. С. 1162–1169.
8. Васильченко С.С., Воронин Б.А., Емельянов Д.С., Сердюков В.И., Сеница Л.Н., Половцева Е.Р., Hase F. Определение концентраций атмосферных газов на основе анализа Фурье-спектров поглощения солнечного излучения // XVII Междунар. симпозиум. «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск. 28 июня – 1 июля 2011. С. А50–А53.
9. Thuillier M., Hersé D., Labs T., Foujols W., Peetermans D., Gillotay P., Simon C., Mandel H. The solar spectral irradiance from 200 to 2400 nm as measured by the solspec spectrometer from the Atlas and Eureka missions // Sol. Phys. 2003. V. 214, N 1. P. 1–22.
10. URL: <http://smpo.iao.ru/>
11. Naus Hans, Wim Ubachs. Visible absorption bands of the $(O_2)_2$ collision complex at pressures below 760 torr // Appl. Opt. 1999. V. 38, N 15. P. 3423–3428.

12. Дуанов-Клоков В.И., Малков И.П. Спектр поглощения кислорода в клатрате и «двойные» переходы в комплексе $[O_2]_2$ // Оптика и спектроскопия. 1967. Вып. 3. С. 51–56.
13. Pfeilsticker K., Erle F., Platt U. Absorption of Solar radiation by atmospheric O_4 // J. Atmos. Sci. 1997. V. 54, N 7. P. 933–939.
14. *Molecular Complexes in Earth's, Planetary, Cometary, and Interstellar Atmospheres* / Edited by A.A. Viganin and Z. Slanina. Singapore: World Scientific, 1998. ISBN 981-02-3211-X. P. 79.
15. Greenblatt G.D., Orlando J.J., Burkholder J.B., Ravishankara A.R. Absorption measurement of oxygen between 330 and 1140 nm // J. Geophys. Res. D. 1990. V. 95, N 11. P. 18577–18582.
16. Aquilanti V., Ascenzi D., Bartolomei M., Cappelletti D., Cavalli S., de Castro Vitores M., Pirani F. Molecular Beam Scattering of Aligned Oxygen Molecules. The Nature of the Bond in the O_2-O_2 Dimer // J. Amer. Chem. Soc. 1999. V. 121, N 46. P. 10794–10802.
17. Curtis L.A., Frurip D.J., Blander M. Studies of molecular association in H_2O and D_2O vapors by measurement of thermal conductivity // J. Chem. Phys. 1979. V. 71, N 6. P. 2703–2711.
18. Evans W., Puckrin E., Dufour D., Ferguson C., Walker K., Boone C., Drummond J. Calibration of instruments for atmospheric ozone measurements II: the ACE FTS and MAESTRO spectrograph // Proc. SPIE. V. 5151. Earth Observing Systems VIII / W.L. Barnes (SPIE, Bellingham, WA, 2003). P. 184–191.

S.S. Vasil'chenko, V.I. Serdyukov, L.N. Sinita. **Spectral system with optical fiber tracking system for gaseous atmospheric component measurement and some results of spectra analysis.**

Spectral system for measurement of gaseous atmospheric components is presented. It is based on Fourier Transform Spectrometer (FTS) Bruker IFS 125M, combined with optical fiber tracker. Test results of experiments performed for atmospheric CO_2 and H_2O content in the atmosphere near Tomsk on the basis of atmospheric transmission spectrum analysis of solar radiation registered by FTS are described. The comparison of atmospheric transmission spectra for 34 and 78 degrees of zenith angles of the Sun was conducted which have exhibited a presence in the earth ground layer of a significant quantity of CO_2-CO_2 complexes.