

Анализ спектров уходящего теплового излучения, измеренных аппаратурой SI-1

Ю. М. Тимофеев¹, А. В. Поляков¹, В. Делер², Д. Шпенкух^{2,3,4}, Д. Ортел⁵

¹ Санкт-Петербургский государственный университет
Санкт-Петербург, 199034, Россия
E-mail: y.timofeev@spbu.ru

² ранее работал в Метеорологической службе ГДР
E-mail: wdohler@t-online.de

³ ранее работал в Германской службе погоды

⁴ Берлинская научная компания им. Лейбница, Германия

⁵ ранее работал в Институте космических исследований АН ГДР

Анализ интегральной формы уравнения переноса излучения показывает, что важнейшим фактором, определяющим возможности получения характеристик газового состава атмосферы по данным измерений спектров уходящего теплового ИК-излучения (в том числе аппаратурой SI-1), являются величины вертикальных градиентов температуры в атмосфере. При близости вертикального градиента температуры нулю (например, при наличии температурного инверсионного слоя) полоса поглощения метана при 1300 см^{-1} не проявляется в спектрах прибора SI-1 (в измерениях 1977 и 1979 гг.). На основе анализа яркостных температур излучения в разных полосах поглощения (15 мкм полоса CO_2 , полосы озона при 9,6 мкм и метана при 7,6 мкм) получены и исследованы диаграммы рассеяния амплитуд спектральных вариаций уходящего излучения. Показано, что прибор SI-1 чувствует естественные вариации уходящего теплового излучения, обусловленные вариациями не только CO_2 , озона и метана, но и таких газов, как H_2O , HNO_3 и N_2O . Содержание N_2O , CFC-11 и CFC-12 оценить из данных прибора SI-1 невозможно, не используя существенного пространственного усреднения спутниковых измерений для подавления случайных погрешностей измерений.

Ключевые слова: тепловое излучение, спутниковое дистанционное зондирование атмосферы, состав атмосферы

Одобрена к печати: 19.03.2018
DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-236-242

Введение

Уже несколько десятилетий осуществляются измерения спектров уходящего теплового ИК-излучения с помощью спутниковых приборов (Кондратьев, Тимофеев, 1970, 1978). Первые измерения были направлены на определение температуры поверхностей океанов, вертикальных профилей температуры и влажности атмосферы (Hanel, Conrath, 1969; Wark, Hilleary, 1969). В настоящее время ИК- и МКВ-спутниковые зондировщики позволяют получать глобальную информацию высокого качества и высокого пространственного разрешения о важнейших термодинамических параметрах и газовом составе атмосферы (Успенский, Рублев, 2013; Smith et al., 2009). Кроме получения важной метеорологической информации, такие измерения позволяют исследовать климатические изменения, наблюдающиеся на нашей планете (например, калиброванные измерения, проведённые в течение нескольких десятилетий (Anderson et al., 2004; Bertrand et al., 2015; Harries et al., 2001; Kempe et al., 1980)). Анализ таких измерений позволяет оценить изменения компонент радиационного баланса атмосферы, а также вариации различных параметров атмосферы и поверхности. В данной работе анализируются измерения спектров уходящего теплового излучения фурье-спектрометрами SI-1, осуществлённые в 1977 и 1979 гг. на советских спутниках Метеор, как возможный источник информации о газовом составе атмосферы в конце 70-х гг. прошлого столетия. Подобные исследования для японского фурье-спектрометра IMG были осуществлены в работе (Clerbaux et al., 1998).

Спектры уходящего теплового излучения

Спектры интенсивности уходящего теплового излучения описываются с помощью интегральной формы уравнения переноса, которую для абсолютно чёрной поверхности можно представить в традиционном виде (Тимофеев, Васильев, 2003):

$$I(\nu, \infty) = B(\nu, T(0))P(\nu, 0, \infty) + \int B(\nu, T(z)) \frac{dP(\nu, z, \infty)}{dz} dz,$$

где $I(\nu, \infty)$ — интенсивность теплового излучения частоты ν на верхней границе атмосферы; $B(\nu, T(0))$ — функция Планка абсолютно чёрного излучения при температуре поверхности $T(0)$; $P(\nu, 0, \infty)$ и $P(\nu, z, \infty)$ — функции пропускания атмосферы всей толщи атмосферы $(0, \infty)$ и слоя от верхней границы атмосферы до уровня z соответственно; $T(z)$ — вертикальный профиль температуры. Для нашего анализа воспользуемся другим эквивалентным представлением этого уравнения, которое можно получить, используя правило интегрирования по частям:

$$I(\nu, 0) = B(\nu, T(\infty)) - \int \frac{dB(\nu, T(z))}{dz} P(\nu, z) dz, \quad (1)$$

где $T(\infty)$ — температура на верхней границе атмосферы. Из соотношения (1) следует, что основными факторами, определяющими уходящее тепловое излучение, являются высотный градиент функции Планка абсолютно чёрного излучения и функции пропускания, содержащие оптические плотности поглощающих газов (или коэффициенты поглощения и содержания поглощающих (и излучающих) газов). В первом приближении можно записать:

$$I(\nu, 0) \approx B(\nu, T(\infty)) - \left(\frac{dB(\nu, T(z))}{dz} \right)_{\text{cp}} \int P(\nu, z) dz, \quad (2)$$

где $\left(\frac{dB(\nu, T(z))}{dz} \right)_{\text{cp}}$ — производная функции Планка при среднем состоянии атмосферы. Из соотношения (2) видно, что в изотермической атмосфере $\left(\frac{dB(\nu, T(z))}{dz} \right)_{\text{cp}} = 0$, интенсивность уходящего излучения $I(\nu, 0) \approx B(\nu, T(\infty))$ и она не зависит от содержания поглощающих и излучающих газов. Кроме того, величина $\left(\frac{dB(\nu, T(z))}{dz} \right)_{\text{cp}}$ определяет значения вариаций уходящего излучения, обусловленных вариациями поглощающих газов, и возможность (точность) решения обратной задачи по отношению к характеристикам их содержания.

Наглядный пример влияния температурной неоднородности атмосферы на спектры излучения атмосферы демонстрирует *рис. 1*, где приведены два спектра уходящего теплового излучения в полосе поглощения метана вблизи 1300 см^{-1} , измеренные спутниковым прибором SI-1. Эти спектры излучения даны для двух значений спектральных градиентов излучения в полосе 15 мкм , характеризующих вертикальный градиент температуры и функции Планка в тропосфере, — максимального и минимального (близкого к нулю). Измерения для номера орбиты 33022 наглядно демонстрируют спектральную структуру излучения, обусловленную поглощением CH_4 и N_2O , а измерения для орбиты 300100 — полное отсутствие такой структуры, что связано с почти изотермичностью тропосферы для рассматриваемого случая.

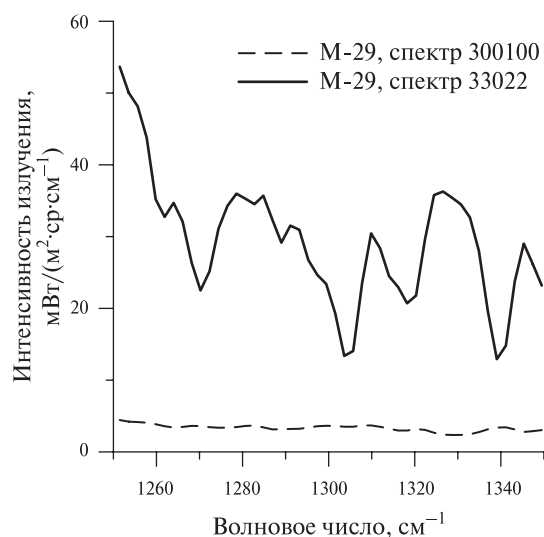


Рис. 1. Спектральный ход уходящего излучения в полосе поглощения метана для двух величин вертикального градиента температуры тропосферы

Анализ излучения SI-1 в полосах поглощения различных газов

С целью анализа возможностей использования данных измерений, выполненных прибором SI-1 в 1977 и 1979 гг., для вычисления газового состава определим спектральные вариации интенсивности уходящего излучения или его яркостной температуры в полосах поглощения CO_2 , озона и метана. На *рис. 2а* представлен средний расчётный спектр уходящего теплового излучения в спектральной области $400\text{--}1600\text{ см}^{-1}$, включающий указанные полосы поглощения (они показаны стрелками). Их центры находятся вблизи 667 , 1070 и 1300 см^{-1} . На *рис. 2б* представлен тот же спектр, но в терминах яркостной температуры уходящего излучения. Он наглядно показывает диапазон изменений яркостной температуры излучения и кинетической температуры атмосферы для рассматриваемого состояния атмосферы. Значения яркостной температуры в разных спектральных областях позволяют определить средний вертикальный градиент температуры, например по измерениям в полосе 15 мкм CO_2 . Минимальные яркостные температуры в средней части полосы характеризуют минимальную температуру тропопаузы, яркостные температуры в крыле полосы — приземную температуру. Температуру поверхности можно оценить также по измерениям в окне прозрачности $8\text{--}12\text{ мкм}$.

Именно наличие минимума и его величина в полосе поглощения газа характеризуют присутствие поглощающего газа в атмосфере планеты и величину его содержания. Вторым важным фактором, определяющим величину амплитуды спектральных вариаций, как показывает соотношение (2), является производная функции Планка по высоте в атмосфере Земли.

На первом этапе исследований был сформирован ансамбль спектров безоблачной атмосферы (1015 реализаций) и проведён анализ поведения уходящего излучения и яркостных температур в полосах поглощения CO_2 , O_3 и метана.

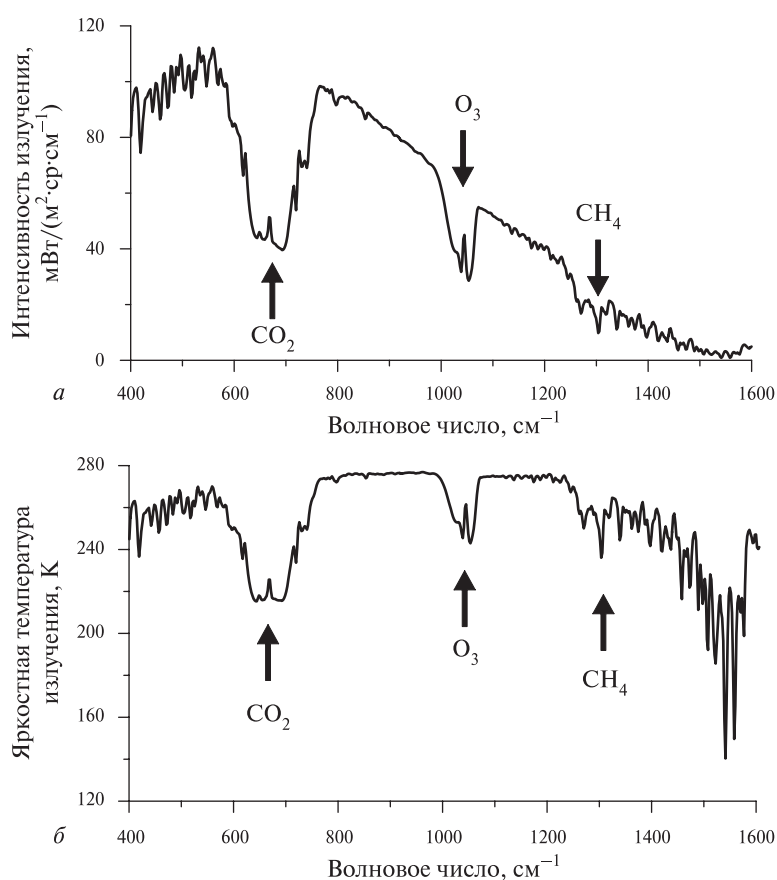


Рис. 2. Средние безоблачные спектры интенсивности (а) и яркостной температуры уходящего излучения (б)

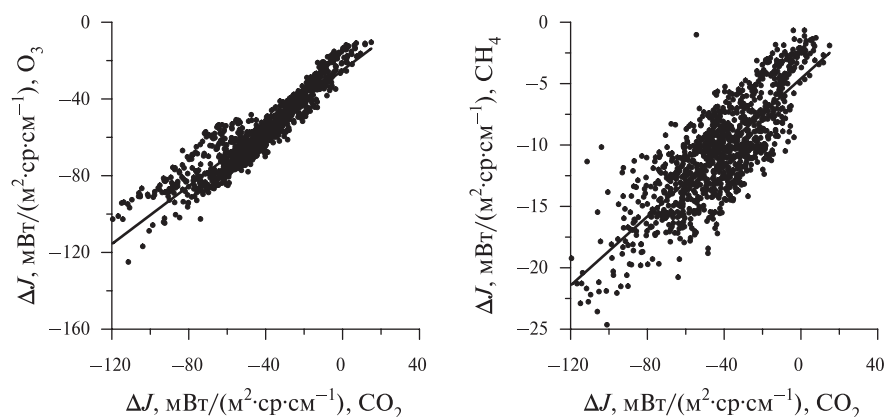


Рис. 3. Диаграммы рассеяния амплитуд спектральных вариаций излучения в полосах CO_2 , O_3 и метана

С помощью этого анализа были определены амплитуды ΔJ спектральных вариаций уходящего излучения в указанных полосах поглощения. Эти амплитуды выбирались для определённых частот в полосах поглощения газов. В полосе 15 мкм выбирались минимальное излучение, характеризующее излучение тропопаузы, и излучение в крыле полосы, характеризующее излучение приземного слоя. Для других полос (O_3 и метана) выбирались частоты с максимальным и минимальным влиянием рассматриваемого газа на уходящее излучение.

Величины вариаций теплового излучения в полосах поглощения приведены на рис. 3 в форме диаграмм рассеяния амплитуд спектральных вариаций интенсивности излучения в спектральных интервалах, включающих полосы CO_2 , O_3 и метана.

Из приведённых рисунков видна большая положительная корреляция между амплитудами спектральных вариаций интенсивности излучения в разных полосах (для CO_2 – O_3 коэффициент корреляции равен 0,933, для CO_2 – CH_4 — 0,809), что обусловлено, прежде всего, влиянием температуры атмосферы на излучение во всех полосах поглощения. Кроме того, виден очень широкий диапазон амплитуд спектральных вариаций интенсивностей излучения: для полосы CO_2 — от положительных малых значений 0–15 мВт/(ср·м²·см^{–1}) (инверсии температуры или почти изотермичность) до –120 мВт/(ср·м²·см^{–1}); для озона — от 0 до –120 мВт/(ср·м²·см^{–1}); для метана — от 0 до –25 мВт/(ср·м²·см^{–1}). Эти диапазоны вариаций обусловлены диапазоном вертикальных градиентов температуры атмосферы, наблюдавшимся для исследуемого ансамбля измерений SI-1.

Учитывая уровень случайных погрешностей измерений прибора SI-1 (~0,3 мВт/(ср·м²·см^{–1})), можно оценить отношение сигнал/шум или число различимых атмосферных состояний (температуры и содержания газов) в различных полосах поглощения. Для полосы CO_2 и O_3 оно достигает ~400 (включая вариации температуры и содержания CO_2 и O_3 в атмосфере), для метана — ~80.

В таблице приведены центры полос поглощения различных газов, в которых можно ожидать минимумы яркостных температур, а также величины вариаций яркостных температур излучения в этих полосах по результатам анализа реальных измерений прибора SI-1.

Максимальная яркостная температура в полосе CO_2 достигает 290–295 К, минимальная — 220–235 К. Таким образом, амплитуда спектральной вариации яркостной температуры составляет в этой полосе 65–75 К. Для полосы озона эта амплитуда составляет 25–45 К, для метана — 20–30 К. Амплитуда вариации для других газов существенно меньше, её значения приведены в таблице. Величины спектральной вариации уходящего излучения в полосе 15 мкм характеризуют значения вертикального градиента функции Планка, яркостной температуры — вертикальные градиенты кинетической температуры в тропосфере. Величины спектральной вариации излучения в полосах O_3 и метана характеризуют как термическую неоднородность атмосферы, так и значения содержания того или иного газа. Сама величина градиента в полосах CO_2 , озона и метана сильно меняется для рассмотренного ансамбля измеренных спектров аппаратурой SI-1.

Оценки влияния различных газовых компонент на уходящее тепловое излучение (по данным SI-1)

Компонента	Центры полос, см^{-1}	Вариация яркостных температур, К
CO_2	670	65–75
O_3	1041	25–45
CH_4	1304	20–30
N_2O	1279	2–5
H_2O	799	8–11
HNO_3	458	9–13
NO_2	790	0,2–0,8
CFC-11	846	0,6–1,5
CFC-12	923	0,4–0,8

Учитывая, что уровень случайного шума для прибора SI-1 в терминах яркостной температуры составляет $\sim 0,3$ К, можно сделать вывод, что прибор чувствует вариации содержания не только CO_2 , озона и метана, но и таких газов, как H_2O , HNO_3 и N_2O . Содержание таких газов, как NO_2 , CFC-11 и CFC-12, оценить из данных прибора SI-1 невозможно, не используя существенного пространственного усреднения спутниковых измерений для подавления случайных погрешностей измерений.

Отметим, что в работах (Головки и др., 1979; Досов и др., 1979) были продемонстрированы успешные примеры решения обратных задач относительно вертикального профиля температуры и содержания озона в атмосфере по данным измерений SI-1.

Основные результаты и выводы

1. Как показывает анализ интегральной формы уравнения переноса теплового излучения, важнейшим фактором, определяющим возможности получения характеристик газового состава атмосферы по данным измерений уходящего теплового ИК-излучения (в том числе аппаратурой SI-1), являются величины вертикальных градиентов температуры в атмосфере. В изотермической атмосфере отсутствуют даже потенциальные возможности определения газового состава атмосферы для рассмотренной модели излучения в ИК-области спектра.

2. Приведён пример влияния вертикальной температурной неоднородности атмосферы на спектральную структуру полосы поглощения метана вблизи 1300 см^{-1} . Продemonстрировано отсутствие спектральной полосы поглощения метана в измерениях уходящего теплового излучения SI-1 при близости вертикального градиента температуры нулю (наличие температурного инверсионного слоя).

3. Определены величины спектральных вариаций уходящего излучения в полосах CO_2 , O_3 и CH_4 для оценки возможностей определения газового состава атмосферы по измерениям спектров уходящего излучения прибором SI-1 в 1977 и 1979 гг. Показано, что вариации излучения в полосе CO_2 для различных спектров изменяются от $+20$ (температурные инверсии!) до $-120 \text{ мВт}/(\text{ср}\cdot\text{м}^2\cdot\text{см}^{-1})$, в полосе озона — от -10 до $-123 \text{ мВт}/(\text{ср}\cdot\text{м}^2\cdot\text{см}^{-1})$, в полосе метана — от -2 до $-25 \text{ мВт}/(\text{ср}\cdot\text{м}^2\cdot\text{см}^{-1})$. Соответствующие вариации яркостных температур излучения в полосе CO_2 изменяются от ~ 1 до -110 К, в полосе озона — от -10 до -75 К, в полосе метана — от -3 до -40 К.

4. Учитывая уровень случайных погрешностей измерений прибора SI-1 ($\sim 0,3 \text{ мВт}/(\text{ср}\cdot\text{м}^2\cdot\text{см}^{-1})$), можно оценить отношение сигнал/шум или число различимых атмосферных состояний (температуры и содержания газов) в различных полосах поглощения. Для полосы CO_2 и O_3 оно достигает ~ 400 (включая вариации температуры и содержания CO_2 и O_3 в атмосфере), для метана — ~ 80 .

Данное исследование выполнено при поддержке РФФИ (проект № 17-05-00768).

Литература

1. Головкин В. А., Куракин В. С., Пахомов Л. А. Одновременное определение температуры, относительного геопотенциала, удельной влажности, общего содержания озона в атмосфере и температуры поверхности океана статистическим методом интерпретации излучения, измеряемого спектрометром-интерферометром // Дистанционное зондирование атмосферы со спутника «Метеор». Л.: Гидрометеиздат, 1979. С. 79–95.
2. Досов В. Н., Пахомов Л. А., Прохоров А. П. Определение общего содержания озона по уходящему тепловому излучению в полосе 9,6 мкм // Дистанционное зондирование атмосферы со спутника «Метеор». Л.: Гидрометеиздат, 1979. С. 113–119.
3. Кондратьев К. Я., Тимофеев Ю. М. Термическое зондирование атмосферы со спутников. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 410 с.
4. Кондратьев К. Я., Тимофеев Ю. М. Метеорологическое зондирование атмосферы из космоса. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 280 с.
5. Тимофеев Ю. М., Васильев А. В. Теоретические основы атмосферной оптики. СПб.: Наука, 2003. 474 с.
6. Успенский А. Б., Рублев А. Н. Современное состояние и перспективы спутникового гиперспектрального атмосферного зондирования // Исследование Земли из космоса. 2013. № 6. С. 4–15.
7. Anderson J. G., Dykema J. A., Goody R. M., Hu H., Kirk-Davidoff D. B. Absolute, spectrally-resolved, thermal radiance: a benchmark for climate monitoring from space // J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2004. V. 85. P. 367–383.
8. Bertrand T., Coppens D., Döhler W., Damiano A., Oertel D., Klaes D., Schmetz J., Spänkuch D. A Glimpse into the past: Rescuing hyperspectral SI-1 data from METEOR-28 and 29 // Proc. 2015 EUMETSAT Meteorological Satellite Conf. 21–25 Sept. 2015. Toulouse, France.
9. Clerbaux C., Chazette P., Hadji-Lazaro J., Midge G., Müller J.-F., Clough S. A. Remote sensing of CO, CH₄, and O₃ using a spaceborne nadir-viewing interferometer // J. Geophysical Research. 1998. V. 103. No. D15. P. 18 999–19 013.
10. Hanel R., Conrath B. Preliminary Results from the Interferometer Experiment on Nimbus III // Science. 1969. V. 165. No. 3899. P. 1258–1260.
11. Harries J. E., Brindley H. E., Sagoo P. J., Bantges R. J. Increases in greenhouse forcing inferred from the outgoing longwave radiation spectra of the Earth in 1970 and 1997 // Nature. 2001. V. 410. P. 355–357.
12. Kempe V., Oertel D., Schuster R., Becker-Ross H., Jahn H. Absolute IR-spectra from the measurement of Fourier-spectrometers aboard Meteor 25 and 28 // Acta Astronautica. 1980. V. 7. No. 12. P. 1403–1416.
13. Smith W. L., Revercomb H., Bingham G., Larar A., Huang H., Zhou D., Li J., Liu X., Kireev S. Technical note: Evolution, current capabilities, and future advances in satellite nadir viewing ultra-spectral IR sounding of the lower atmosphere // Atmospheric Chemistry and Physics. 2009. V. 9. P. 5563–5574.
14. Wark D. Q., Hilleary D. T. Atmospheric Temperature: Successful Test of Remote Probing // Science. 1969. V. 165. No. 3899. P. 1256–1258.

Analysis of spectra measured by SI-1 device

Yu. M. Timofeev¹, A. V. Polyakov¹, W. Döhler², D. Spänkuch^{2,3,4}, D. Oertel⁵

¹ Saint Petersburg State University, St. Petersburg 199034, Russia
E-mail: y.timofeev@spbu.ru

² formerly at GDR Meteorological service

³ formerly at German Weather Service

⁴ Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin e. V., Germany

⁵ formerly at Space Research Institute AS GDR

The analysis of integral form of the radiative transfer equation shows that vertical gradients of temperature profiles in the atmosphere are the major factor defining possibilities for retrieving characteristics of atmospheric gas composition from measurements of outgoing thermal IR radiation spectra (including the SI-1 measurements). When the temperature vertical gradient is close to zero (for example in

the presence of the temperature inversion layer), the absorption band of methane is not detectable in the spectra obtained by the SI-1 instrument in 1977 and 1979. On the basis of the analysis of brightness temperatures in different absorption bands (bands of CO₂ at 15 μ m, O₃ at 9.6 μ m and CH₄ at 7.6 μ m) the scattering diagram of amplitudes of spectral variations of outgoing radiation has been received and studied. It is shown that the SI-1 device is sensitive to natural variations of outgoing thermal radiation caused by not only CO₂, ozone and methane variations, but also variations of such gases as H₂O, HNO₃ and N₂O. The N₂O, CFC-11 and CFC-12 contents cannot be estimated from SI-1 data without the essential spatial averaging of satellite measurements for the suppression of random measurement errors.

Keywords: thermal radiation, satellite remote sensing of atmosphere, atmospheric composition

Accepted: 19.03.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-236-242

References

1. Golovko V. A., Kyrakin V. S., Pakhomov L. A., *Odnovremennoe opredelenie temperatury, otnositel'nogo geopotsiala, udelnoi vlazhnosti, obshchego soderzhaniya ozona v atmosfere i temperatury poverkhnosti okeana statisticheskim metodom interpretatsii izlucheniya, izmeryaemogo spektrometrom-interferometrom* (Simultaneous determination of temperature, relative geopotential, specific humidity, the total ozone in the atmosphere and the ocean surface temperatures by a statistical method of interpretation of the radiation measured by a spectrometer-interferometer), *Distantsionnoe zondirovanie atmosfery so sputnika "Meteor"*, Leningrad: Gigrometeoizdat, 1979, pp. 79–95.
2. Dosov V. N., Pakhomov L. A., Prokhorov A. P., *Opredelenie obshchego soderzhaniya ozona po ukhodyaschemu teplovomu izlycheniyu v polose 9,6 mkm* (Determination of the total ozone from the outgoing thermal radiation in the 9.6 μ m band), *Distantsionnoe zondirovanie atmosfery so sputnika "Meteor"*, Leningrad: Gigrometeoizdat, 1979, pp. 113–119.
3. Kondratyev K. Ya., Timofeev Yu. M., *Termicheskoe zondirovanie atmosfery so spytnikov* (Thermal Sounding of Atmosphere from Satellites), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1970, 410 p.
4. Kondratyev K. Ya., Timofeev Yu. M., *Meteorologicheskoe zondirovanie atmosfery iz kosmosa* (Meteorological Sounding of Atmosphere from Space), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1978, 280 p.
5. Timofeev Yu. M., Vasiliyev A. V., *Teoreticheskie osnovy atmosferno optiki* (Theoretical Foundations of Atmospheric Optics), Saint Petersburg: Nauka, 2003, 474 p.
6. Uspensky A. B., Ryblev A. N., *Sovremennoe sostoyanie i perspektivy spytnikovogo giperspectral'nogo atmosfernogo zondirovaniya* (Current state and perspectives of satellite hyperspectral atmospheric sounding), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2013, No. 6, pp. 4–15.
7. Anderson J. G., Dykema J. A., Goody R. M., Hu H., Kirk-Davidoff D. B., Absolute, spectrally-resolved, thermal radiance: a benchmark for climate monitoring from space, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, 2004, Vol. 85, pp. 367–383.
8. Bertrand T., Coppens D., Döhler W., Damiano A., Oertel D., Klaes D., Schmetz J., Spänkuch D., A Glimpse into the past: Rescuing hyperspectral SI-1 data from METEOR-28 and 29, *Proc. 2015 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference*, 21–25 September, 2015, Toulouse, France.
9. Clerbaux C., Chazette P., Hadji-Lazaro J., Midge G., Müller J.-F., Clough S. A., Remote sensing of CO, CH₄, and O₃ using a spaceborne nadir-viewing interferometer, *J. Geoph. Res.*, 1998, Vol. 103, No. D15, pp. 18 999–19 013.
10. Hanel R., Conrath B., Preliminary Results from the Interferometer Experiment on Nimbus III, *Science*, 1969, Vol. 165, No. 3899, pp. 1258–1260.
11. Harries J. E., Brindley H. E., Sagoo P. J., Bantges R. J., Increases in greenhouse forcing inferred from the outgoing longwave radiation spectra of the Earth in 1970 and 1997, *Nature*, 2001, Vol. 410, pp. 355–357.
12. Kempe V., Oertel D., Schuster R., Becker-Ross H., Jahn H., Absolute IR-spectra from the measurement of Fourier-spectrometers aboard Meteor 25 and 28, *Acta Astronautica*, 1980, Vol. 7, No. 12, pp. 1403–1416.
13. Smith W. L., Revercomb H., Bingham G., Larar A., Huang H., Zhou D., Li J., Liu X., Kireev S., Technical note: Evolution, current capabilities, and future advances in satellite nadir viewing ultra-spectral IR sounding of the lower atmosphere, *Atmos. Chem. Phys.*, 2009, Vol. 9, pp. 5563–5574.
14. Wark D. Q., Hilleary D. T., Atmospheric Temperature: Successful Test of Remote Probing, *Science*, 1969, Vol. 165, No. 3899, pp. 1256–1258.